# ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ НАУЧНАЯ СТАНЦИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК в г. БИШКЕКЕ

УДК 550.380+550.837.82+551.242

№ госрегистрации 0155-2014-0001

Инв. № 01/16

#### **УТВЕРЖДАЮ**

Директор НС РАН в г. Бишкеке
д-р физмат. наук
А.К. Рыбин
«20» декабря 2016 г.
State and State
ALL DESCRIPTION OF THE PARTY OF

## 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 за 2016 г.)

Раздел 9 «Науки о Земле»: Подраздел 128 «Физические поля, внутреннее строение Земли и глубинные геодинамические процессы»

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

holy

А.К. Рыбин

Бишкек 2016

### СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

И.о. ст.науч. сотр. ЛГМИ,, канд. геол.- мин. наук

AFam

Е.А. Баталева (введение, разделы 1.1, 2.1, 3.1, 3.2, 4, заключение)

подпись

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

Damanil

В.Ю. Баталев (все разделы)

подпись

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

подпись

В.Е. Матюков (раздел 1.1-построение модели)

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

В.Д. Брагин (раздел 2.2)

подпись

подпись

О.Б. Забинякова (раздел 3.2)

Ученый секретарь НС РАН

Отчет утвержден на заседании Ученого совета НС РАН (Протокол № 7 от 20 декабря 2016 г.)

Ученый секретарь НС РАН

О.Б. Забинякова 2

#### Реферат

Отчет содержит 111 страниц, 59 рисунков, 2 таблицы и список использованных источников, включающий 34 наименования.

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

**Объектом исследования** является глубинная геоэлектрическая структура внутриконтинентального орогена Тянь-Шаня на различных пространственно-масштабных уровнях.

**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 работ

Методы и методика проведения работ обусловлены комплексом геофизических исследований, проводимых Научной станцией РАН для достижения поставленной цели: электромагнитных, основным из которых является метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ) (в трех модификациях – глубинной (ГМТЗ), стандартной (МТЗ) и магнитовариационного зондирования (MB3)) с различными типами аппаратуры и метод зондирования становлением поля, что позволяет получить дополнительную информацию о физических свойствах пород, литологии, реологических свойствах пород, их флюидонасыщенности и т.д., в натурных условиях горного Тянь-Шаня; сейсмических - для верификации построенных геоэлектрических моделей; сейсмологические с целью исследования взаимосвязи распределения неоднородностей в литосфере и сейсмического режима. В отчете также рассматривались результаты геологических построений, выполненные на территории миниполигона Кентор и стационарной сети магнитотеллурического мониторинга как сотрудниками Научной станции РАН, так и коллегами из Геологического Института РАН. Магнитотеллурические зондирования производились аппаратурой Phoenix MTU-5D, произведенной канадской фирмой «Phoenix Geophysics» в диапазоне периодов 0.001-1600 с, что соответствует глубинам 50 м - 100 км. Определение координат и точного времени на станциях Phoenix MTU-5D выполняется в автоматическом режиме с использованием встроенного модуля GPS. Принимая во внимание наличие в Научной станции РАН 2-х стационарных пунктов магнитотеллурического мониторинга, работающих в круглосуточном режиме, регистрация сигналов электромагнитного поля всегда осуществляется синхронно несколькими станциями. Это позволяет получать передаточные функции между компонентами в одной точке (тензор импеданса адмитанса, матрица Визе–Паркинсона), пространственные передаточные функции И

(теллурический тензор, горизонтальный магнитный тензор) и одновременно подавить промышленные помехи. Магнитотеллурические данные, полученные с помощью станций «Phoenix-MTU-5» обработаны стандартной для этой аппаратуры программой SSMT2000 в режимах "local" и "remote reference", реализующей современные алгоритмы спектрального анализа. Программа обработки основана на расчете функции взаимной корреляции всех компонент поля. Далее проводится Фурье-преобразование, в результате чего формируются спектры мощности в широком частотном диапазоне, которые затем пересчитываются в компоненты тензора импеданса. Дополнительно для подавления индустриальных помех и сглаживания передаточных функций в низкочастотном диапазоне использовалась программа CORRECTOR, разработанной 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 магнитотеллурического 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.

Особое внимание уделялось анализу и интерпретации результатов магнитотеллурических и магнитовариационных наблюдений на пунктах режимных наблюдений (тензочувствительных). Геодинамической процессы, происходящие в земной коре, приводят к деформированию земной поверхности и сосредоточению деформаций в зонах динамического влияния разломных структур, что обуславливает возможность применения геофизических методов для мониторинговых целей. Одним из наиболее чувствительных электромагнитных параметров к возникновению деформаций в геологической среде является электросопротивление. С развитием методики азимутального магнитотеллурического мониторинга стало возможным выявление И мониторинг электромагнитных параметров тензочувствительных пунктов, которые, как правило, приурочены к активным разломным структурам. Интенсивность вариаций электромагнитных параметров может служить одним критериев и свидетельствовать об активности тектонических нарушений (повышении трещиноватости, деформациях).

#### Основные результаты работ

С целью построения комплексной геолого-геофизической модели Тянь-Шаня был проанализирован геоэлектрический разрез по профилю Таш Башат, полученный в результате решения обратной задачи - 2D инверсии для миниполигона Кентор. В результате интерпретации магнитотеллурических данных была выявлена структура, которая расположена в интервале глубин 0-6 КМ. пространственно приурочена к Шамси-Тюндукскому разлому и определена пространственная неоднородность этой геоэлектрической структуры вдоль меридионального простирания. Была проведена верификация геоэлектрических моделей посредством сопоставления результатов интерпретации магнитотеллурических данных (2D-инверсия) и геологических разными авторами и построений, выполненных проведена оценка природы коровой электропроводности на различных пространственно-масштабных уровнях.

Анализ распределения гипоцентров сейсмических событий и поведения вариаций электромагнитных параметров был выполнен для стационаров Чон-Курчак и Ак-Суу на примере роя сейсмических событий, произошедших 9-16 февраля 2016 года вблизи пункта электромагнитного мониторинга Кегеты (20 км от стационара Чон-Курчак).

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

Предложен новый подход представлению результатов анализа данных к 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.

Для повышения эффективности системы мониторинга и прогнозирования в целом была выполнена разработка программного обеспечения, предназначенная для расчета электромагнитных параметров и визуализации результатов профильного магнитотеллурического мониторинга. В основу разработки методического обеспечения системы обработки и анализа материалов широкодиапазонного магнитотеллурического мониторинга был положен всесторонний анализ частотно-временных рядов всех электромагнитных параметров.

Рассмотрены вопросы отбеливания помех и выполнено сравнение их с алгоритмами оптимальной обработки сигналов. Анализ алгоритмов отбеливания помех по сравнению с алгоритмами оптимальной обработки сигналов показал, что алгоритмы отбеливания почти всегда по эффективности проигрывают алгоритмам оптимальной обработки. К такому же выводу приводит и анализ алгоритмов подавления помехи на базе квадратурных компенсаторов.

Дополнение базы данных временных рядов вариаций электромагнитных параметров осуществлялось как новыми результатами мониторинговых магнитотеллурических наблюдений, полученными на стационарных пунктах МТ-мониторинга Ак-Суу и Чон-Курчак в 2016 году, так и результатами повторных зондирований, выполненных в широком частотном диапазоне на миниполигоне Кентор на трех режимных пунктах МТ-мониторинга и 2-х сессий профильного магнитотеллурического мониторинга.

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

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение
1 Построение комплексных геофизических моделей литосферы Тянь-Шаня и окружающих
областей на различных пространственно-масштабных уровнях 13
1.1 Построение комплексной геофизической модели литосферы Тянь-Шаня и окружающих
областей (на примере миниполигона Кентор)13
Выводы
2 Исследование временных изменений структурно-физических характеристик и напряженно-
деформированного состояния геосреды на основе изучения динамики различных геофизических
полей
2.1 Оценки взаимосвязи временных изменений параметров геофизических полей и характеристик
напряженно-деформированного состояния геосреды
2.2 Проведение расчетов и разработка помехоустойчивых алгоритмов для выделения откликов
земной коры при воздействии на нее электромагнитных полей специальной формы 55
2.2.1 Краткие сведения из теории оптимального приема 55
2.2.2 Согласованная фильтрация (корреляционная обработка) 58
2.2.3 Сравнение оптимального и классического обнаружителя с обелением
2.2.4 Сравнение оптимального компенсатора с неоптимальным квадратурным 67
2.2.5 Обнаружение сигнала на фоне комплексных помех
2.2.6 Влияние мешающих воздействий на обработку 76
2.2.7 Вопросы программной реализации оптимальных алгоритмов
Выводы
3 Разработка методики проведения и обработки, включая программное обеспечение,

профильного магнитотеллурического мониторинга на примере миниполигона Кентор...... 89

3.1 Развитие методики обработки и анализа временных рядов вариаций электромагнитных
параметров в широком частотном диапазоне по результатам непрерывных магнитотеллурических
наблюдений
3.2 Разработка программного обеспечения профильного магнитотеллурического мониторинга (на примере миниполигона Кентор)
4 Накопление материалов экспериментального изучения динамики электромагнитных параметров
в широком частотном диапазоне
4.1 Дополнение базы данных временных рядов вариаций электромагнитных параметров новыми результатами мониторинговых магнитотеллурических наблюдений за период 01.01.2016 по
31.12.16 г 105
Заключение
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

#### Введение

Данный отчет отражает результаты исследований по теме 155-2014-0001: «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 обратной задачи, которая использовалась для построения региональной геоэлектрической модели по магнитотеллурическому профилю Таш-Башат. Потребность в комплексной интерпретации наблюденных 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 геологогеофизической 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 геологогеофизических 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

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), профильных магнитотеллурических зондирований и режимных глубинных МТЗ. 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 2016 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 наблюденные 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.

Все пункты электромагнитных наблюдений совмещены с пунктами геомагнитных наблюдений. Следует отметить, что метод зондирований 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 явственных 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 НС 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 МТмониторинга, полученных Научной станцией РАН в 2011-2016 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.

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  $\rho_{\tau}$ , 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 геологогеофизической 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 Построение комплексных геофизических моделей литосферы Тянь-Шаня и окружающих областей на различных пространственно-масштабных уровнях

# 1.1 Построение комплексной геофизической модели литосферы Тянь-Шаня и окружающих областей (на примере миниполигона Кентор)

С целью создания комплексной геолого-геофизической модели строения литосферы Тянь-Шаня на различных пространственно-масштабных уровнях в настоящем отчете рассматривается модель глубинного геоэлектрического строения миниполигона Кентор, построенная на основе магнитотеллурических и магнитовариационных данных, полученных вдоль профиля Таш-Башат. В основу комплексной интерпретации наблюденных геофизических данных положена взаимосвязь между отдельными физическими характеристиками геологической среды, что позволяет повысить результативность информации, получаемой при интерпретации данных любого отдельного взятого обстоятельство геофизического метода. Именно ЭТО 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 миниполигона Кентор, где ежегодно проводятся мониторинговые профильные магнитотеллурические зондирования.

В условиях горного рельефа Тянь-Шаня практическое применение МТ-метода осложнено трудностями выбора подходящих площадок для установки измерительной системы, что не позволяет обеспечить равномерное расположение пунктов зондирования вдоль профиля исследования. Учитывая это обстоятельство, миниполигон Кентор был заложен в таких геологических условиях (рис.1), чтобы с одной стороны можно было обеспечить мониторинг современной активной разломной структуры различными геофизическими методами, с другой стороны уровень промышленных помех оставался в допустимых пределах. Для верификации результатов интерпретации МТ-данных по локальному профилю «Таш Башат» данные детальной геологической съемки, выполненной в 2013-2014 гг. [1], а также результаты более ранних исследований.

Байтикская впадина структурно приурочена к зоне сочленения Киргизского хребта и Чуйской впадины, которая является крупным линейным структурным элементом горного сооружения Тянь-Шаня. Эта зона протягивается субширотно более чем на 350 км при ширине до 20 км и включает в себя разломы, флексуры, предгорные форберги и протяженные синклинальные прогибы по поверхности фундамента и в осадочном чехле. Структурно-геологические исследования, выполненные сотрудниками Геологического института и Научной станции РАН (НС РАН), на участках Южночуйской зоны в пределах Бишкекского геодинамического полигона были направлены на изучение позднекайнозойских тектонических деформаций. Данные исследования очень важны для формирования детальной геолого-тектонической основы проводимых здесь многолетних геофизических (магнитотеллурических и магнитовариационных) и геодезических (GPS и линейно-угловых) наблюдений [1].

Более ранние геологические (морфоструктурные) исследования Чуйской впадины проводились А.К. Трофимовым (1976), В.И. Макаровым (1977), О.К. Чедия (1986), К.Е. Абдрахматовым (1988) и другими, основной целью этих работ была реконструкция вертикальных движений по деформациям кайнозойских поверхностей выравнивания. Первые же работы в этом направлении были сделаны С.С. Шульцем (1948), в широко известной монографии которого приводится анализ данных многочисленных предшественников как по геологии, так и геофизике Тянь-Шаня.

Миниполигон «Кентор» расположен восточнее Научной станции РАН в истоках рек Навруз и Кентор и занимает площадь 7×5 км на восточном продолжении Шамсинского разлома. В основании уступа Киргизского хребта на этом участке можно наблюдать валунно-лессовые

аллювиальные и флювиогляциальные отложения залегающих на неогеновых и палеогеновых осадочных комплексах и непосредственно на палеозойском фундаменте. Центральная часть миниполигона «Кентор» представляет собой обширную Кенторскую котловину, имеющую перепад высот 1600–2000 м, ограниченную с юга, запада и востока отрогами Киргизского хребта, а с севера – цепью пологих холмов, отделяющих котловину от более низменной Байтикской впадины [1]. Наиболее существенные деформации дневной поверхности зафиксированы вдоль гряды холмов, разделяющих Байтикскую и Кенторскую котловины, деформация поверхности выравнивания наблюдается также в северо-западной части Кенторской котловины, где девонские породы тектонически надвинуты на красноцветы киргизской серии по Шамсинскому разлому. Начиная с конца плиоцена, территория Кенторской котловины являлась предгорной равниной, и испытала незначительный подъем, наклон и северное смещение в виде единого домена, разбитого редкими зонами трещин. Наиболее значимые деформации приурочены к границам Кенторской котловины и границе с тектонически обособленной Байтикской впадиной, где возникла зона сжатия и коробления слоев.

На основе многолетнего геофизического мониторинга, выполняемого Научной станцией РАН, изучаются и современные движения исследуемой территории, которые могут быть охарактеризованы следующими достаточно устойчивыми тенденциями: при пересечении Южночуйской зоны с юга на север от палеозойских пород (северный склон Киргизского хребта до Шамсинского надвига), через кайнозойский блок предгорий (до Иссыкатинского взброса) к области распространения четвертичных образований Чуйской впадины в среднем наблюдается уменьшение трех компонент скорости (в мм/год): северной (от 2.23 до 0.67), западной (от 0.79 до 1.00) и вертикальной (от 1.01 до 0.05) [1]. Это свидетельствует о тенденции перемещения доменов Южночуйской деформационной зоны относительно Чуйской впадины в северозападном направлении и их сближении в широтном направлении в течение всего четвертичного времени. Важнейшими структурными элементами всего орогенного этапа являются субширотные региональные линейные зоны градиентных смещений взбросового и надвигового типа. отметками 3000 - 4000 м. Чередование комплексов с высокими значениями удельного электрического сопротивления (магматические породы) и зон глубинных разрывных нарушений, таких как глубинные разломы, зоны дробления и растекания коровых масс, взбросовых или надвиговых разрывных нарушений - структур с невысокими значениями удельного электрического сопротивления является залогом успешного применения метода магнитотеллурического зондирования.



Рисунок 1.1 – Геологическая схема и разрез участка «Кентор» (составил Е.С. Пржиялговский [1]): 1) Современные аллювиальные валунно-галечные отложения; 2) аллювиальные валунно-галечные отложения первой надпойменной террасы (здесь и далее штриховка – поверхность террасы); 3) глыбово-галечные гляциальные отложения; 4) раннесреднеордовикские гранодиориты; 5) миоценовая галечно-дресвяно-песчаная толща; 6) рифейские комплексы нерасчлененные; 7 – граница распространения плейстоценовых валунников; 8) кровля шарпылдагских валунников (на разрезе); 9) активизированные разломы и зоны трещиноватости фундамента: а) главные; б) второстепенные; 10) активизированные разломы, предполагаемые под чехлом современных отложений: а) главные; б) второстепенные. Пункты МТЗ профиля Таш Башат показаны синими кружками.

Магнитотеллурические зондирования по профилю «Таш Башат». С целью исследования разрывных нарушений взбросового и надвигового типов были выполнены магнитотеллурические

зондирования вдоль профиля на 18 пунктах (рис.1.1). Локальный профиль «Таш Башат» пересекает Байтикскую впадину в субмеридиональном направлении, его протяженность составляет почти 4 км, шаг зондирований – 200 м. Участок профиля включает в себя горное обрамление, где с хорошим качеством было выполнено 5 пунктов зондирования. Частотный диапазон зондирований профиля расширен за счет использования АМТЗ, что позволило детально исследовать верхнюю часть и оценить влияние рельефа в построение разреза, перепад которого вдоль профиля составляет 500 м (рис.1.1). Измерения выполнялись с помощью аппаратуры Phoenix MTU-5 [2]. Регистрирующие блоки станций используют 24-х разрядный АЦП и GPS приемники, обеспечивающие времени с 1 синхронизацию по точностью мкс. Диапазон измеряемых вариаций магнитотеллурического поля составляет от 0.001 до 1600 с. Средняя длительность записи одни сутки, иногда, в случае неблагоприятных погодных условий, запись МТ-поля продолжается до получения качественных кривых. 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 электродами с марганцево-угольной крошкой, неполяризующимися разработанными И запатентованными Научной станцией РАН [3].

**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 [4].

В записях магнитных и электрических каналов двух синхронных записей возможно есть некоррелируемая помеха. Для её подавления используем алгоритм обработки в режиме двухточечных зондирований с удаленной базой [5,6]. Метод позволяет бороться с помехами, если они не коррелируемы по компонентам разных точек записей. Совместно с робастной статистикой, этот метод дает хорошие результаты [7]. 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 Таш Башат и с мониторингового пункта Ак-Суу. Рассчитаем когерентности спектров компонент Co(H<sup>\*</sup><sub>x</sub>, H<sup>\*</sup><sub>y</sub>), Co(H<sup>\*</sup><sub>x</sub>, E<sup>\*</sup><sub>y</sub>), Co(E<sup>\*</sup><sub>x</sub>, H<sup>\*</sup><sub>y</sub>), Co(E<sup>\*</sup><sub>x</sub>, E<sup>\*</sup><sub>y</sub>). Значение Co(E<sup>\*</sup><sub>x</sub>, E<sup>\*</sup><sub>y</sub>) 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, которая влияет на записи обеих станций зондирования. Борьба с таким шумом методом удаленной базы бессмысленна. Значения Co( $H<sup>*</sup>_x$ ,  $E<sup>*</sup>_y$ ), Co( $E<sup>*</sup>_x$ ,  $H<sup>*</sup>_y$ ) близки к единице. Это говорит о том, что отношение сигнал помеха большое, сигналы хорошо коррелируют. Когерентность Co( $H<sup>*</sup>_x$ ,  $H<sup>*</sup>_y$ ) между магнитными каналами базы и точки резко падает в районе 1-10 герц, что свидетельствует о наличии некоррелируемой помехи. С которой можно эффективно побороться привлечением в обработку удаленных магнитных каналов.

В качестве удаленной базы используются синхронные записи (пункт Ак-Суу) стационарный пункт МТ-мониторинга (удаление около 60 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 1.2 представлены кривые кажущегося сопротивления и фазы импеданса, полученные в результате обработки программы EPI-KIT и SSMT 2000.

На втором этапе обработки с помощью программы MT-Corrector, разработанной сотрудниками российской геофизической (http://nwкомпании «Северо-Запад» geo.ru/products/software/mt-corrector/), было произведено осреднение импедансных кривых (рисунок 1.3). 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 определены вполне устойчиво, что дает возможность надежно отрисовать сводную кривую и использовать их в инверсии данных. Дополнительные компоненты тензора импеданса 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 [8]. 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 «Таш Башат» может свидетельствовать в пользу предположения о квазидвумерности геоэлектрических структур профильного разреза.



Рисунок 1.2 – Результаты обработки записи МТ данных в программах EPI-KIT(A) и SSMT 2000 (Б)

Анализ кривых МТЗ. Для проведения сплайнов использовались все 20 реализаций программы SSMT 2000 и 10 реализаций программы EPI-KIT. Дополнительные компоненты тензора импеданса 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 [8]. 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 [9], поэтому кривые кажущегося сопротивления  $\rho_{xy}$  и  $\rho_{yx}$  можно считать продольными и поперечными кривыми в квазидвумерной модели. Поперечные кривые кажущегося сопротивления чувствительны к высокоомным приповерхностным неоднородностям. При попадании пункта зондирования на приповерхностную неоднородность кривая статически смещается вверх или вниз, при этом наблюдается так называемый эффект статического смещения (static shift) [8].



Рисунок 1.3 – Кривые кажущегося сопротивления (слева) и фазы импеданса (справа) полученные на профиле Таш Башат в пунктах МТЗ 00, 01, 02, 03 с помощью аппаратуры Феникс. (Phoenix MTU5 в стандартном частотном диапазоне (0.0004-100Гц) и Phoenix MTU5A в ауди – диапазоне 100-10000Гц). Синим цветом показаны продольные (широтные) кривые Royx и Fiyx; красным – поперечные (меридиональные) Roxy и Fixy.



Рисунок 1.4 – Кривые кажущегося сопротивления (слева) и фазы импеданса (справа) полученные на профиле Таш Башат в пунктах МТЗ 04, 05, 06 с помощью аппаратуры Феникс. (Phoenix MTU5 в стандартном частотном диапазоне (0.0004-100Гц) и Phoenix MTU5A в ауди – диапазоне 100-10000Гц). Синим цветом показаны продольные (широтные) кривые Royx и Fiyx; красным – поперечные (меридиональные) Roxy и Fixy.



Рисунок 1.5 – Кривые кажущегося сопротивления (слева) и фазы импеданса (справа) полученные на профиле Таш Башат в пунктах МТЗ 07, 08 с помощью аппаратуры Феникс. (Phoenix MTU5 в стандартном частотном диапазоне (0.0004-100Гц) и Phoenix MTU5A в ауди – диапазоне 100-10000Гц). Синим цветом показаны продольные (широтные) кривые Royx и Fiyx; красным – поперечные (меридиональные) Roxy и Fixy.



Рисунок 1.6 – Кривые кажущегося сопротивления (слева) и фазы импеданса (справа) полученные на профиле Таш Башат в пунктах МТЗ 09, 10 с помощью аппаратуры Феникс. (Phoenix MTU5 в стандартном частотном диапазоне (0.0004-100Гц) и Phoenix MTU5A в ауди – диапазоне 100-10000Гц). Синим цветом показаны продольные (широтные) кривые Royx и Fiyx; красным – поперечные (меридиональные) Roxy и Fixy.



Рисунок 1.7 – Кривые кажущегося сопротивления (слева) и фазы импеданса (справа) полученные на профиле Таш Башат в пунктах МТЗ 11, 12 с помощью аппаратуры Феникс. (Phoenix MTU5 в стандартном частотном диапазоне (0.0004-100Гц) и Phoenix МТU5А в ауди – диапазоне 100-10000Гц). Синим цветом показаны продольные (широтные) кривые Royx и Fiyx; красным – поперечные (меридиональные) Roxy и Fixy.



Рисунок 1.8 – Кривые кажущегося сопротивления (слева) и фазы импеданса (справа) полученные на профиле Таш Башат в пунктах МТЗ 13, 14, с помощью аппаратуры Феникс. (Phoenix MTU5 в стандартном частотном диапазоне (0.0004-100Гц) и Phoenix МТU5А в ауди – диапазоне 100-10000Гц). Синим цветом показаны продольные (широтные) кривые Royx и Fiyx; красным – поперечные (меридиональные) Roxy и Fixy.



Рисунок 1.9 – Кривые кажущегося сопротивления (слева) и фазы импеданса (справа) полученные на профиле Таш Башат в пунктах МТЗ 15, 16, с помощью аппаратуры Феникс. (Phoenix MTU5 в стандартном частотном диапазоне (0.0004-100Гц) и Phoenix МТU5А в ауди – диапазоне 100-10000Гц). Синим цветом показаны продольные (широтные) кривые Royx и Fiyx; красным – поперечные (меридиональные) Roxy и Fixy.



Рисунок 1.10 – Кривые кажущегося сопротивления (слева) и фазы импеданса (справа) полученные на профиле Таш Башат в пункте МТЗ 17, с помощью аппаратуры Феникс. (Phoenix MTU5 в стандартном частотном диапазоне (0.0004-100Гц) и Phoenix MTU5A в ауди – диапазоне 100-10000Гц). Синим цветом показаны продольные (широтные) кривые Royx и Fiyx; красным – поперечные (меридиональные) Roxy и Fixy.

На южных пунктах профиля (см.рис. 1, пункты 0-07), расположенные в предгорной зоне впадины, продольные и поперечные кривые имеют схожую форму. Они представлены слегка нисходящими ветвями, осложненными локальными минимумами и максимумами, зачастую совпадающими на обеих кривых. По мере приближения к осевой части Байтикской впадины, расположенной в северной части профиля (пункты 08-17), конформность кривых нарушается и на пунктах зондирования, начиная с 08 точки, наблюдаются крутые нисходящие ветви поперечных (меридиональных) кривых, в то время как продольные кривые не претерпевают значительных изменений. Восхождение высокочастотной ветви поперечных кривых на пунктах зондирования 14 и 15 обусловлено уменьшением интегральной проводимости верхнего слоя, расположенной под точкой зондирования. На всех продольных кривых выделяется минимум на низких частотах (около 100 с), отвечающий коровому проводнику. На поперечных кривых наблюдается гальванический эффект, из-за которого происходит полное экранирование глубинных проводников.



Рисунок 1.12 – Индукционные вектора Визе для точек профиля Таш Башат на периоде 1 с

Для определения тензора импеданса достаточно проводить измерение 4-х компонент электромагнитного поля – E<sub>x</sub>, E<sub>y</sub>, H<sub>x</sub>, H<sub>y</sub>. Если на пунктах наблюдения дополнительно регистрируются вариации вертикальной компоненты магнитного поля, что ДЛЯ магнитотеллурических зондирований, выполняемых Научной станцией PAH. является обязательным условием, то можно использовать методику Визе с построением одноименных векторов. Вектора Визе определяются по соотношению трех компонент геомагнитных вариаций в одной точке наблюдения и характеризуют неоднородность распределения индуцированных в Земле электрических токов, а, следовательно, и неоднородность распределения электропроводности.

$$H_z = W_{zx}Hx + W_{zy}H_y$$

Они направлены от проводника перпендикулярно направлению избыточных токов в нем. Вектора Визе (индукционные стрелки, типперы) строятся по вещественным и мнимым частям компонент матрицы Визе-Паркинсона W:

$$\operatorname{Re} W = \operatorname{Re} W_{zx} I_{x} + \operatorname{Re} W_{zy} I_{y},$$
$$\overline{\operatorname{Im} W} = \operatorname{Im} W_{zx} \overline{I_{x}} + \operatorname{Im} W_{zy} \overline{I_{y}}.$$

Вектор ReW называется вещественным или реальным вектором. Он характеризует влияние токов, которые находятся в фазе с магнитным полем. Вектор ImW называется мнимым вектором, он характеризует влияние реактивных избыточных токов, то есть токов, которые отличаются от фазы горизонтального магнитного поля на 90°.

Отличительной особенностью вещественных векторов является то, что, они направлены от зон повышенной электропроводности к зонам пониженной электропроводности. Это свойство векторов Визе позволяет локализовать геоэлектрические структуры, отличающиеся повышенной или пониженной электропроводностью. Построение карт вещественных векторов обеспечивает лучшую наглядность изображения горизонтальных изменений электропроводности.



Рисунок 1.13 – Индукционные вектора Визе для точек профиля Таш Башат на периоде 10 с





Анализ векторов Визе-Паркинсона позволяет локализовать зоны проводящих неоднородностей с достаточной надежностью на всех глубинах. На рисунках 1.12-1.14 изображены вещественные вектора Визе для профиля «Таш Башат» для периодов 1 с, 10 с, 100 с.

Обычно на коротких периодах индукционные стрелки над впадинами направлены хаотично, что может быть связано с высоким уровнем приповерхностных геоэлектрических неоднородностей. Однако для точек профиля Таш Башат мы наблюдаем закономерное распределение векторов Визе для всех рассматриваемых периодов, стрелки направлены от проводящей Чуйской впадины (Предкиргизский прогиб) и их поведение обусловлено ее влиянием. Для периода 1 с наблюдается четко выраженное различие размеров индукционных стрелок для бортовой части впадины и ее центральной части. Такое поведение векторов Визе говорит о наличии мощной проводящей структуры севернее Байтикской впадины, где и находится Предкиргизский прогиб. С увеличением периода, индукционные стрелки во всех пунктах зондирования, расположенных как во впадине, так и на ее борту, слаженно направлены от проводящего тела и становятся одинаковыми по величине. Возможно, что кроме Чуйской впадины, на периодах больше 10 с на поведение стрелок также

оказывает влияние коровый проводник, расположенный на глубинах около 30 - 35 км, что объясняет уменьшение размера стрелок вдоль всего профиля.

#### Построение профильной геоэлектрической модели «Таш Башат».

Построение геоэлектрических моделей, как правило, начинают с параметризации импеданса, которая включает в себя определение следующих параметров: неоднородности N, углового параметра асимметрии A, амплитудного параметра асимметрии Skew и фазочувствительного параметра Eta. Это выполняется с целью районирования исследуемой территории по «электрической размерности» среды. С помощью вышеуказанных параметров оценивается степень горизонтальной неоднородности среды, локализуются выделяемые структуры. В отечественной магнитотеллурике применяются следующие параметры:

1. Параметр неоднородности определяется по формуле:

$$N = \frac{Z_{p}^{+} - Z_{p}^{-}}{Z_{p}^{+} - Z_{p}^{-}}$$

,

где  $Z_p^+$ ,  $Z_p^-$  - главные значения тензора импеданса, определяемые методом ортогонализации ортогонализации Эггерса [10]. Он характеризует степень горизонтальной неоднородности среды. Если среда горизонтально - однородна (1D), то N = 0.

2. Угловой параметр асимметрии

$$A = \left| \theta_p^+ - \theta_p^- \right| - \frac{\pi}{2} \right| ,$$

где  $\theta_p^+$  и  $\theta_p^-$  - азимуты главных направлений тензора импеданса, определяемые методом ортогонализации Эггерса [10]. Он характеризует степень асимметрии среды. В двумерном случае (2D) A=0. Отклонение A от 0 свидетельствует о трехмерности среды (3D).

3. Амплитудный параметр асимметрии [11]

$$skew = \left| \frac{Zxx + Zyy}{Zxy - Zyx} \right|,$$

*skew (skew - перекос)* также является мерой асимметрии среды. В случае двумерной модели *skew* = 0.

Параметры А и skew дублируют друг друга.

4. Фазочувствительный параметр асимметрии

$$Eta = \frac{\sqrt{2\left|\operatorname{Im}\left(ZyxZxx^* - ZxyZyy^*\right)\right|}}{\left|Zxy - Zyx\right|}$$

где \* обозначает комплексную сопряженность. Этот параметр позволяет распознать среду, в которой на региональную двумерную структуру наложены локальные трехмерные неоднородности (Eta = 0).

Построение интерпретационной модели начнем с анализа псевдоразрезов таких параметров как Skew Z и N, амплитуд кажущегося сопротивления  $\rho_{yx}$  и фазы импеданса  $\phi_{yx}$  (рис.1.15). Обычно анализ псевдоразрезов сводится к выделению аномалий в поведении кажущихся сопротивлений и фаз. Положительные аномалии  $\rho_{xy}$ ,  $\rho_{yx}$  и  $\phi_{xy}$ ,  $\phi_{yx}$  соответствуют плохо проводящим объектам, а отрицательные - хорошо проводящим. Для неоднородных геоэлектрических сред псевдоразрезы кажущегося сопротивлений из верхней части автоматически переносится на более глубинные, маскируя влияние глубинных слоев. Чтобы получить более точную оценку распределения сопротивлений и фаз импеданса. В виду того, что на фазы импеданса приповерхностные неоднородности практически не оказывают влияние мы можем определить пункты зондирований, которые наиболее подвержены эффекту статического смещения. Так на псевдоразрезе фаз импеданса четко разделены пункты зондирований, выполненных в прибортовой части впадины -00-07, непосредственно в самой впадине – 08-12 и в переходной зоне (между впадинами) 13-17, что совершенно не отражено на псевдоразрезе кажущегося сопротивления.



Рисунок 1.15 – Псевдоразрезы магнитотеллурических параметров по профилю Таш Башат

В связи с тем, что псевдоразрез фаз импеданса плохо соотносится с морфологией кривых кажущегося сопротивления Royx, что обусловлено присутствием эффекта статического смещения, необходима нормализация этих кривых. Псевдоразрезы Skew Z и N характеризуют степень горизонтальной неоднородности среды, значения Skew Z до значительных глубин составляет 0,1, что означает возможность применения 2D инверсии МТ-данных. Об этом же свидетельствует и псевдоразрез параметра N.

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  $\rho$ - и S- эффектов [8]. Наличие мелких геоэлектрических неоднородностей порождает *р*- 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 рисунках 1.3-1.10 показаны кривые кажущегося сопротивления по всем пунктам зондирования профиля. Видно, что кривые на отдельных пунктах (например, 04-06) 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 02-06, 09,10, 14, 17 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. Кроме того, в нашем случае поперечные кривые (правые ветви) подвержены ярко выраженному гальваническому эффекту от контакта борт-впадина. При этом следует иметь ввиду, что без знания о размерах геоэлектрических структур, порождающих эти искажения, о гальванической прозрачности подстилающих верхний слой пород мы не может 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, как правило, проводится по низкочастотной ветви продольных кривых кажущегося сопротивления, что и было сделано перед двумерной инверсией МТ-данных.

Двумерная сглаживающая инверсия МТ данных по профилю «Таш Башат» была выполнена в программе Rodi-Mackie. Программа реализует метод нелинейных сопряженных градиентов, который пытается минимизировать целевую функцию, которая представляет собой сумму нормализированных невязок данных и сглаженности модели [12]. Компромисс между невязками данных и сглаженностью модели контролируется параметром регуляризации т. Параметр т задается вручную пользователем. Входными данными инверсии являются продольные и поперечные кривые кажущегося сопротивления и фазы импеданса и типпер по 18 пунктам наблюдения в интервале периодов от 0.01 до 1600 с. 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%, типпер - 0.01%. В результате нескольких тестовых расчетов инверсии было выбрано значение параметра регуляризации τ равное 3. В результате выполнения 200 итераций получена модель, представленная на рисунке 1.16. Значение RMS-невязки составило 1.97.



Рисунок 1.16 – Геоэлектрическая модель (верхняя часть разреза, до глубин 1,6 км) для профиля Таш Башат – результаты 2D инверсии: 1) предполагаемые тектонические нарушения; 2) пункты наблюдения. Цветовая шкала – десятичный логарифм удельного сопротивления в Ом·м.

На рисунке 1.16 представлена модель 2D-инверсии, построенная на основе проведенных магнитотеллурических зондирований. В северной части профиля (пункт 17) в верхней части разреза выделяется зона пониженного сопротивления, расположенная от дневной поверхности до глубины порядка 6-7 км. По форме аномальная зона напоминает разломную структуру, с достаточно крутым углом падения. Эта часть профиля соответствует главному активизированному разлому, наличие которого под чехлом современных отложений предполагается геологическими исследованиями [1]. Аналогичный разлом находится под пунктом зондирования 12, только угол падения этого тектонического нарушения более пологий. На геоэлектрическом разрезе также выявлены скрытые разломные зоны под пунктами 09 и 06, которых нет на геологической карте что может служить дополнительной информацией о глубинном строении Байтикской впадины. Что касается высокоомного объекта, расположенного на глубинах около полутора километров от дневной поверхности под пунктами зондирования 09-02 (рис. 1.16), то он, скорее всего, представляет собой выступ палеозойского фундамента. Рядом с которым находится зона повышенной трещиноватости
фундамента, что соответствует пунктам зондирования 16-10 геоэлектрической модели, где на глубине порядка 1, 5 км находится объект повышенной электропроводности.

## Выводы

Таким образом, с помощью метода МТЗ определено детальное глубинное строение земной коры Байтикской впадины миниполигона «Кентор».

Построена геоэлектрическая профилю «Таш Башат». Определены модель ПО геометрические и электрические характеристики областей пониженного сопротивления в полученном геоэлектрическом разрезе. Не противореча в целом результатам геологической сьемки, выполненной на территории миниполигона Кентор [1], построенный разрез демонстрирует важные новые черты глубинной структуры земной коры. Учитывая то обстоятельство, что на профиле «Таш Башат» находятся режимные пункты (0 и 16) магнитотеллурического мониторинга, построение геоэлектрической модели является важным этапом в развитии нового подхода к анализу вариаций электромагнитных параметров деформируемой геологической среды миниполигона «Кентор», что позволяет осуществлять контроль за наиболее чувствительными к сейсмическим событиям интервалами глубин и отдельным структурам геоэлектрического разреза.

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

2.1 Оценки взаимосвязи временных изменений параметров геофизических полей и характеристик напряженно-деформированного состояния геосреды.

В 2016 г. продолжены 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. Работы выполнялись на стационарных пунктах электромагнитных мониторинговых наблюдений Ак-Суу и Чон-Курчак, а также на территории миниполигона «Кентор», где зондирования проводились на пунктах профильного мониторинга. Предметом мониторинговых исследований являются частотно-временные ряды электромагнитных параметров, которые содержат аномальные особенности различной формы и временной протяженности, возникающие в случайные моменты времени. Наиболее часто рассматриваемым электромагнитным параметром является кажущееся сопротивление, вариации которого включают в себя различного характера аномальные эффекты, возникающие накануне сейсмических явлений, связанные с активностью Солнца и другими внешними и внутренними процессами различной природы. Время появления и интенсивность этих аномалий является полезной для исследователей информацией. Выделение аномалий в вариациях электромагнитных параметров является сложной задачей, поскольку сигналы, с которыми приходится иметь дело при решении задач геофизического мониторинга, являются нестационарными и могут нести в себе разнообразную информацию: от изменения погодных условий, сезонного хода и шумов до промышленных помех и все это накладывает свой отпечаток на основной сигнал. Частотновременные ряды - это одна из наиболее распространенных форм представления исходных данных систем мониторинга в задачах геофизики. Последовательные значения исследуемых характеристик (элементы временных рядов) отражают как внутреннюю динамику составных частей геологического разреза, так и их взаимосвязь. Сглаживание временных рядов является одним из наиболее мощных инструментов их изучения, что позволяет отфильтровать шум и выделить регулярную составляющую. Причем регулярная составляющая рассматривается двух видов: либо тренд, либо сезонная составляющая. На сегодняшний день наиболее известными методами сглаживания являются регрессионный анализ, метод конечных элементов и сплайнов, Фурье- и вейвлет-сглаживания и их обобщения на основе разложений по ортогональным системам функций

38

и частотно-временного анализа. В результате такого подхода аномалиями на временных рядах можно считать фрагменты значительных отклонений временных рядов от своих сглаживаний.

В настоящем отчете мы рассмотрим вариации таких электромагнитных параметров как кажущееся сопротивление, фаза импеданса и типпер (реальную часть) для стационарных пунктов Ак-Суу и Чон-Курчак. 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 Ак-Суу и Чон-Курчак. Обе станции находятся на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП), который в свою очередь является частью Северо-Тяньшаньской сейсмогенерирующей зоны (рис.2.1), регистрация данных осуществляется круглосуточно в интервале периодов 0,01-1000 с.



Рисунок 2.1 – 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 выполнения зондирований в 2011 году

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) [13] с целью установления местоположения аномалиеобразующих объектов в геологической среде.

В исследованиях, связанных с развитием принципиально новой методики азимутального магнитотеллурического мониторинга, рассматриваются временные ряды вариаций (отклонения от среднего) для электромагнитных параметров среды по азимутам 0° - 180° в зависимости от периода зондирования [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. Наиболее востребованным электромагнитным параметром является кажущееся сопротивление, а наиболее устойчивым и менее искажённым – фазы импеданса.

В настоящем отчете рассмотрим частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга вариаций кажущегося сопротивления, фаз импеданса, а также вариаций магнитовариационного параметра – вектора Визе (индукционных стрелок). При анализе вариаций компонент тензора импеданса [15, 16] было установлено, что дополнительные импедансы для магнитотеллурического мониторинга в условиях внутриконтинентального орогена более информативны, чем основные. Этот вывод подтверждают и результаты магнитотеллурического мониторинга за 2016 год, что продемонстрировано на рисунках 2.2 и 2.3, где показаны частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга вариаций основных и дополнительных импедансов пункта «Ак-Суу» в сопоставлении с сейсмичностью. Очевидно, что на рис. 2.3 прослеживается более четкая корреляция проявлением аномалий вариаций дополнительных импедансов и распределением сейсмических событий.

Детальный анализ полученных частотно-временных рядов приращений дополнительных импедансов на разных глубинах представленного разреза (первый квартал 2016 года) позволил выделить 27 сейсмических событий класса выше 6, каждое из которых сопровождается аномалиями двух типов: предшествующими и синхронными (пример Камбаратинского промышленного взрыва). Величина аномалий составляет от 36 до 5 Омм. Также была проанализирована взаимосвязь между распределением аномалий вариаций основных и дополнительных импедансов (вещественной и мнимой частей) и сейсмических событий, произошедших вблизи (до 30 км) стационарного мониторингового пункта и удаленных (более 30 км). Особое внимание уделялось тем аномальным

40

изменениям импеданса, которые происходят на ортогональных азимутах, например, 10 и 12 января 2016 года (рис. 2.2 и рис. 2.3 – Ак-Суу и рис. 2.4 и рис. 2.5 – Чон-Курчак). Наиболее яркая взаимосвязь вариаций кажущегося сопротивления и сейсмических событий в ортогональных направлениях наблюдается для *азимутов* 15°, 105°, 60° и 150°. Наиболее представительными (информативными) являются вариации реальной части основных импедансов для станции «Ак-Суу». Для стационара «Чон-Курчак» очень ярко проявилась взаимосвязь электромагнитных параметров и сейсмических событий в вариациях вещественной части дополнительных импедансов (рис. 2.5). При этом следует отметить, что реакция геологической среды на сейсмические события, зафиксированная мониторинговыми станциями, для стационара «Ак-Суу» и «Чон-Курчак» проявляется по-разному.

Вариации кажущегося сопротивления имеют еще 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 [17,18] 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 стационарных пунктов Ак-Суу и Чон-Курчак уровень промышленных электромагнитных помех достаточно низок и регистрация компонент МТ-поля осуществлялась в благоприятных условиях, поскольку возможности аппаратуры Phoenix позволяют осуществлять фильтрацию помехи в 50 Гц. Аномальные изменения для указанных азимутов частотно-временных рядов азимутального МТ-мониторинга соответствуют гипотезе [17,18] 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» [14] 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.



Рисунок 2.2 – Частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга вариаций кажущегося сопротивления пункта «Ак-Суу» в сопоставлении с сейсмичностью за первый квартал 2016 г. Цветными линиями показаны моменты землетрясений, произошедших за анализируемый период: голубыми - близкие сейсмические события (до 30 км от стационарного пункта наблюдения); голубыми - дальние сейсмические события (более 30 км от стационарного пункта наблюдения).



Рисунок 2.3 – Частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга вариаций дополнительных импедансов пункта «Ак-Суу» в сопоставлении с сейсмичностью за первый квартал 2016 г. Цветными линиями показаны моменты землетрясений, произошедших за анализируемый период: голубыми - близкие сейсмические события (до 30 км от стационарного пункта наблюдения); голубыми - дальние сейсмические события (более 30 км от стационарного пункта наблюдения).



Рисунок 2.4– Частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга вариаций основных импедансов пункта «Чон-Курчак» в сопоставлении с сейсмичностью за первый квартал 2016 г. Цветными линиями показаны моменты землетрясений, произошедших за анализируемый период: голубыми - близкие сейсмические события (до 30 км от стационарного пункта наблюдения); голубыми - дальние сейсмические события (более 30 км от стационарного пункта наблюдения).



Рисунок 2.5 – Частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга вариаций дополнительных импедансов (слева – реальной, справа – мнимой частей) пункта «Чон-Курчак» в сопоставлении с сейсмичностью за первый квартал 2016 г. Цветными линиями показаны моменты землетрясений, произошедших за анализируемый период: голубыми - близкие сейсмические события (до 30 км от стационарного пункта наблюдения); голубыми - дальние сейсмические события (более 30 км от стационарного пункта наблюдения).



Рисунок 2.6 – Частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга вариаций кажущегося сопротивления (слева) и фаз импеданса (справа) пункта «Ак-Суу» в сопоставлении с сейсмичностью за первый квартал 2016 г. Цветными линиями показаны моменты землетрясений, произошедших за анализируемый период: голубыми - близкие сейсмические события (до 30 км от стационарного пункта наблюдения); голубыми - дальние сейсмические события (более 30 км от стационарного пункта наблюдения).

Для анализа взаимосвязи изменений электромагнитных параметров и напряженнодеформированного состояния среды было решено проанализировать частотно-временные ряды, обработанные по методике азимутального МТ-мониторинга, как вариаций реальной части основного импеданса стационарных пунктов в сопоставлении с сейсмичностью, так и мнимой рисунки 2.4 и 2.5. Мнимая часть основного импеданса, на наш взгляд, более информативна, взаимосвязь вариаций и сейсмических событий наиболее четко проявлена на ортогональных азимутах 15°, 105° и 60°, 150°.

Особенно интересными являются изменения во времени дополнительного импеданса, характеризующего степень неоднородности (трёхмерности) среды. На частотно-временных рядах ReZxx и ImZxx, представленных на рисунках 2.3 и 2.5, 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 [17,18] 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 поведения указанных рядов достаточно схожи.

Таким образом установлено, что взаимосвязь сейсмических событий и вариаций импеданса наиболее четко проявляется в изменениях дополнительных импедансов нежели в основных. Что касается удаленности места расположения гипоцентра сейсмических событий от пункта мониторинга, то здесь очень большую роль играет класс землетрясений и азимут, под которым находится эпицентр сейсмического события по отношению к стационарному пункту наблюдения. Наиболее интересными моментами за рассматриваемый период являются события, отраженные в вариациях дополнительных импедансов стационара Чон-Курчак, произошедшие 10, 12,16, 20 и 29 января 2016 года.

Более подробного рассмотрения заслуживает рой сейсмических событий, произошедших в непосредственной близости станции электромагнитного мониторинга Кегеты, пункт 6 на рисунке 2.7, которая расположена в 20 километрах к западу от стационарного пункта магнитотеллурического мониторинга Чон-Курчак. В непосредственной близости станции Кегеты в течении недели (с 9 по 16 февраля 2016 года) было зафиксировано 10 сейсмических событий 6-10 класса, на рисунках 2.8-2.12 это соответствует 40-47 дню.

47



Рисунок 2.7 – Схема расположения стационарных пунктов электромагнитного мониторинга Бишкекского прогностического полигона. 1) а) – пункты стационарных наблюдений МТ-мониторинга, б) – стационарные пункты электромагнитного мониторинга; 2) а) – сеть станций КNET, б) – сейсмические события, произошедшие за время выполнения зондирований в первом квартале 2016 года на расстоянии не более 100 км от стационарного пункта МТ-наблюдения); 3 – региональные разломы, 4 – граница Киргизии

При этом на рисунке очевидно, что отклик среды на сейсмические события существует и его можно условно разделить на 2 типа – 1) изменение кажущегося сопротивления среды в ортогональных направлениях; 2) резкое уменьшение кажущегося сопротивления происходит по всем азимутам.

При анализе участков частотно-временных рядов реальной части типпера (ReW) пунктов Ак-Суу и Чон-Курчак (рис 2.10 и 2.12) перед роем землетрясений в первой половине февраля 2016 г. (40-41 день ЧВР) были выделены следующие азимутальные вариации ReW в рамках гипотезы перераспределения флюида в порово-трещинном пространстве деформируемых массивов горных пород:

- для стационарного пункта Чон-Курчак фиксируется уменьшение электросопротивления (растяжение) по азимуту 135° и увеличение электросопротивления (сжатие) по азимуту 45°;
- для стационарного пункта Ак-Суу фиксируется уменьшение электросопротивления (растяжение) по азимуту 90° и увеличение электросопротивления (сжатие) по азимуту 0°.

Необходимо учитывать, что сейсмические события, инициируемые деформационными процессами, влияющими на блоковую структуру вблизи пункта наблюдения, могут формировать ортогональные положительные и отрицательные вариации по различным азимутам.

48



Рисунок 2.8 – Частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга вариаций кажущегося сопротивления пункта «Чон-Курчак» в сопоставлении с сейсмичностью за первый квартал 2016 г. Цветными линиями показаны моменты землетрясений, произошедших за анализируемый период: голубыми - близкие сейсмические события (до 30 км от стационарного пункта наблюдения); голубыми - дальние сейсмические события (более 30 км от стационарного пункта наблюдения).



Рисунок 2.9 – Частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга вариаций фаз импеданса пункта «Чон-Курчак» в сопоставлении с сейсмичностью за первый квартал 2016 г. Цветными линиями показаны моменты землетрясений, произошедших за анализируемый период: голубыми - близкие сейсмические события (до 30 км от стационарного пункта наблюдения); голубыми - дальние сейсмические события (более 30 км от стационарного пункта наблюдения).



Рисунок 2.10– Частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга вариаций реальной части типпера пункта «Чон-курчак» в сопоставлении с сейсмичностью за первый квартал 2016 г. Цветными линиями показаны моменты землетрясений, произошедших за анализируемый период: голубыми - близкие сейсмические события (до 30 км от стационарного пункта наблюдения); голубыми - дальние сейсмические события (более 30 км от стационарного пункта наблюдения).

Наряду с магнитотеллурической функцией отклика (тензор импеданса), которая определяется из соотношений между горизонтальными компонентами электрического и магнитного полей, можно рассматривать магнитовариационную функцию отклика (индукционные стрелки или вектора Визе), полученную из соотношения между горизонтальной и вертикальной компонентами магнитного поля (рис. 2.10 и рис.2.12). То есть, электрические компоненты электромагнитного поля, которые, как правило, наиболее зашумлены в этом случае не рассматриваются. Высокие значения модуля вещественной стрелки говорят о наличии рядом с аномальной точкой избыточных горизонтальных токов. Минимальные значения индукционного вектора наблюдаются либо в области отсутствия горизонтальных неоднородностей в разрезе, либо над осями проводящих структур, в которых концентрируются избыточные теллурические токи. Период проявления аномального поведения индукционных стрелок говорит нам о глубине залегания проводника. На поведение типпера могут влиять локальные геоэлектрические неоднородности верхней части земной коры, вызывающие аномалии электрического поля. Одной из таких неоднородностей может оказаться разлом субширотного простирания в районе стационарного пункта Ак-Суу (рис.2.11).



Рисунок 2.11 – Панель слева – фрагмент геологической карты вблизи расположения стационарного пункта МТ-мониторинга Ак-Суу (красная точка на геологической карте); панель справа - распределение коэффициента корреляции (дополнительный импеданс Z<sub>xx</sub> и вертикальная компонента приливных воздействий An) в полярных координатах, где по оси радиусов показан корень из периода. Цвет и изолинии показывают значения коэффициента корреляции.



Рисунок 2.12 – Частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга вариаций реальной части типпера пункта «Ак-Суу» в сопоставлении с сейсмичностью за первый квартал 2016 г. Цветными линиями показаны моменты землетрясений, произошедших за анализируемый период: голубыми - близкие сейсмические события (до 30 км от стационарного пункта наблюдения); голубыми - дальние сейсмические события (более 30 км от стационарного пункта наблюдения).

При геодинамических процессах, связанных с подготовкой землетрясения, возможно изменение степени обводненности и минерализации вод в зоне разлома, что может соответственно вызвать перераспределение токовых систем. Деформирование массивов при пород геодинамических процессах, связанных с подготовкой землетрясения, согласно гипотезы Брагина В.Д. [14], влияет на степень обводненности порово-трещинного пространства по направлениям сжатия и растяжения, на изменение минерализации вод в зонах разломов, что может соответственно вызвать перераспределение токовых систем. Как отмечалось в работе Баталевой [15], деформационные процессы в массивах пород вызывают вариации не только активного сопротивления, но и реактивного (или емкостного). Дальнейшие работы предполагается сфокусировать в направлении сопоставления частотно-временных рядов различных электромагнитных параметров и их интерпретации. Особое внимание будет уделено сопоставлению ЧВР магнитовариационных параметров и ЧВР магнитотеллурических параметров, как несущих независимую информацию, а также реальных и мнимых частей компонент тензора импеданса и матрицы Визе-Паркинсона для выделения различных физических механизмов взаимосвязей деформационных процессов с вариациями электромагнитных параметров.

2.2 Проведение расчетов и разработка помехоустойчивых алгоритмов для выделения откликов земной коры при воздействии на нее электромагнитных полей специальной формы

В данной главе представлены физические предпосылки и практически полезные результаты разработки помехоустойчивых алгоритмов [19-25]. Следует сказать пару слов о критериях оптимальности, которые используются ниже. Известна «классическая» теория оптимальности, изложенная в [26-28] и в десятках других первоисточников (см. ссылки на литературу в этих монографиях). Однако, в [3, 4, 6-8] был развит значительно более общий и глубокий подход к синтезу (созданию) критериев оптимальности и оптимальных в целом помехоустойчивых алгоритмов обработки сигналов на фоне комплексов помех с нормальным и негауссовым (в некотором смысле «противоположных» нормальным) многомерным матричным распределением вероятностей; именно подобные алгоритмы называются ниже оптимальными (или оптимальными в целом) в отличие от классических оптимальных алгоритмов, являющихся частными случаями более общих и глубоких оптимальных в целом алгоритмов обработки.

В материалах, изложенных в труде [29] нет упоминания о корреляционной обработке (в частности, согласованной фильтрации), отсутствуют процедуры расчета ошибок, возникающих при приеме сигналов, которые будут рассмотрены ниже с физическими обоснованиями.

# 2.2.1 Краткие сведения из теории оптимального приема

В основе обобщенной теории статистических решений (ОТСР) лежит доказанное теоретически и экспериментально в [19] утверждение – любые условные распределения вероятностей (и их многомерные плотности вероятностей) всегда уже обусловленных (априорных), поскольку, никакие условия, фактические ограничения, не могут увеличить, например, дисперсии случайных процессов. Однако, в конце 60-х годов прошлого века, из-за отсутствия эквивалентного аппарата математической статистики, «реализовать» эту идею не удалось, и только в 75 году Голяницким И.А. был создан адекватный аппарат [22], позволивший создать ОТСР, как весьма частные случаи; общие итоги работы были подведены в [24]. Затем появилась возможность «опробовать» методы ОТСР в актуальных в начале 2000 года проблемах синтеза и анализа многоканальных сетей с кодовым разделением широкополосных сигналов (Б-СДМА) со сложной манипуляцией с большими базами Б, с чем ОТСР [25] успешно «справилась». Возникшая новая проблема с поиском критериев оптимальности была подробно рассмотрена в [30] со значительным расширением практически полезных задач в радиосвязи и радиолокации, решенных методом ОТСР. И, наконец, большинство актуальных проблем в области радиоэлектроники многопозиционных

55

многоканальных адаптивных радиосистем (в том числе синтез «интеллектуальных» антенных сетей) столь же успешно были решены методами ОТСР.

Однако, в задачах ГЭР (геоэлектроразведка) появилось новое существенное ограничение. Подчеркнем, что под «лучом» выше и ниже понимается не поле с малыми углами азимута и места, а лишь только нормаль к фронту (или нормали к фронтам), падающих, отраженных и преломленных ЭМВ (электромагнитная волна). Но ни многолучевость, ни затухания, ни объемность ЭМП (электромагнитных помех) представляют нечто новое; главное ограничение – разные скорости распространения ЭМП в разных слоях земной коры, тем большие, чем выше частота колебаний, следовательно, неизбежно искажающие форму спектров сигналов в ГЭР, и их АКФ и ВКФ, что еще подлежит исследованию.

Итак, конкретизируя результаты ОТСР, рассмотрим простой скалярный случай (один сигнал, помеха любая), когда оптимальный в целом алгоритм обработки содержит (см. рисунок 2.12а) компенсатор (минимизатор) помех на входе; затем в помехах с негауссовым распределением вероятностей следует устройство нелинейной обработки (НО), затем коррелятор или согласованный с сигналом фильтр (СФ) и пороговое устройство (ПУ) для вынесения решения о том, был ли сигнал на входе в помехе, или только одна помеха; обобщенная схема компенсатора (К) изображена на рисунке 2.126, на основной вход которого поступает смесь помехи и сигнала, а на опорный вход поступает каким-то образом искаженная помеха, но с обязательным сохранением корреляционных связей с помехой на основном входе (с коэффициентом корреляции  $\rho$ ) – в свое время именно это обстоятельство явилось трудно преодолимым; далее линии задержки выравнивают «синхронность» подаваемых на перемножитель (X) процессов, и затем следует вычитатор (-), «подсказавший» название минимизатору как компенсатор помех. На рисунке 2.12в приведены важнейшие характеристики обработки (X) во всей теории статистических решений: ведь если на входе присутствует только помеха (заранее это неизвестно, иначе обнаруживать было бы нечего), но она превысила порог решения; это событие называется вероятностью «ложной тревоги» РЛТ, которая при обработке фиксируется на небольшом (как правило) уровне; это есть ошибка первого уровня, а дополняющая ее до единицы (т.к. полная группа событий) вероятность называется правильным необнаружением (порог не превышен), и равна 1-РЛТ. Напротив, если на входе кроме помехи есть и сигнал (опять-таки заранее это неизвестно), то при превышении порога решения получаем событие правильного решения с вероятностью РПО, а дополняющая ее до единицы вероятность называется пропуском сигнала и равна 1-РПО (ошибка второго порядка). Столь простой вариант называется двух альтернативной проверкой гипотез, поскольку их две: либо сигнала на входе нет, либо он присутствует (проверка многоальтернативных гипотез изложена, например в [23-25], там же рассмотрено большое число примеров); на рисунке 2.13в сплошными линиями показаны ХО с компенсацией (и без компенсации помех, см. пунктир), сначала для случая воздействия гауссовой

помехи и схемы К-СФ, а затем для негауссовой помехи с использованием НО самого различного вида [25]; главное заключается в том, что компенсаторы при некоторых условиях обладают очень высокой эффективностью, снижая дисперсию Д помех до 35-40 дБ, и увеличивая до 104 раз отношение С/П=q=М/Д, где М – мощность входного сигнала; при воздействии помехи с негауссовой плотностью вероятностей выигрыш меньше, порядка 30 дБ (проверено экспериментально [25]). Следовательно, схемы, изображенные на рисунке 2.13 следует настойчиво рекомендовать к использованию в задачах ГЭР, хотя окончательные рекомендации пока давать рано – предстоит выполнить ещё целый ряд исследований в рамках новой темы.



Рисунок 2.13 Обобщенная «скалярная» схема оптимальной обработки (a); блок-схема оптимального компенсатора (б); характеристики обработки (XO) (в)

Но подобные дополнительные исследования, выполненные в [19-25], показали теоретически и экспериментально высокую эффективность отдельно (без СФ) компенсатора помех, который

поэтому часто называется «оптимальным». Наибольшей сложностью при синтезе компенсатора является поиск опорной помехи, которая в задачах ГЭР может «поставляться» ближайшим к некоторому пункту приемником с примерно одинаковыми «склонениями» относительно зондируемого слоя земной коры. Если же этого нет, то придется «синтезировать» опорную помеху, что является совсем непростой задачей [25]. Большие надежды кроме компенсации автор отчета возлагает на процедуру накопления и повторов излучений (быть может под разными углами и дальностями, но от одного и того же горизонта отражений). Опять-таки здесь слишком много неизвестного, и поскольку в ТЗ по данной теме №1 эти проблемы не указаны, то исследования предлагается провести в будущем в рамках новой темы №2.

#### 2.2.2 Согласованная фильтрация (корреляционная обработка)

В настоящее время почти любые схемы аналоговой или цифровой обработки являются корреляционными системами (КС), поэтому автор отчета придает особое значение ясному пониманию этого вопроса, что (несмотря на жесточайший дефицит времени) побудило автора отчета к более-менее подробному рассмотрению проблем КС (полное рассмотрение см. [24,25]). Отметим, что (см. рисунок 2.14б) в КС речь идет об измерении ВКФ, поэтому необходимо иметь как минимум две (в чем-то схожие) реализации случайных процессов (сигналов или помех), которые часто получить нет никакой возможности; поэтому этот случай «активной» КС часто нереализуем. При согласованной фильтрации («пассивной» КС с измерением АКФ) достаточно одной реализации случайного процесса (или сигнала), поскольку «вторая» вводится в структуру СФ заранее как копия ожидаемого сигнала. Что же касается эффективности КФ и СФ, то она одинакова при выполнении трех условий: гауссовости плотностей вероятностей помех (или их нормализации); равномерности спектральной плотности мощности (СПМ) помех; стационарности во времени (и однородности по пространству) – это условие не соблюдается при наличии «медленных» трендов, но для адаптивных КС и СФ не имеет принципиального значения (ценою усложнения реализующих схем). Наиболее сложным является требование равномерности СПМ, поскольку разбиение общей полосы частот на поддиапазоны, с примерно постоянными СПМ, связано с большими трудностями сохранения базовых характеристик сигналов (для помех, описываемых, в среднем, мощностями, фазовые характеристики отсутствуют после усреднения). Но еще больший «вред» наносит любой оптимальной обработке процедура «обеления» помех, что будет ниже показано (впрочем, являясь эвристической, процедура «обеления» лишает систему обработки прежней оптимальности, хотя и в этом случае возможны нюансы [25]. Но главное, понятно: по каким причинам далее речь будет идти только о согласованной фильтрации (СФ).

Рассмотрим сразу конкретные примеры СФ, указав только на одно основное их свойство: импульсная характеристика (ИХ) h(t) согласованного фильтра равна зеркальному отображению

сигнала; именно поэтому на выходе СФ всегда наблюдается АКФ сигнала, (если дополнительно, но отдельно измерить АКФ помехи на выходе СФ, то по форме она будет такой же, но с другими весами). На рисунке 2.14а приведен простой импульс-меандр с базой Б=2. На рисунке 2.146 изображена ИХ СФ, первый «отвод» которой отрицательный, поэтому в реализующей схеме СФ на рисунке 2.14в первый отвод в линии задержки (ЛЗ) содержит инвертор; через время Т сигнал сразу поступает в сумматор (+) – принципиально важный элемент [25], несмотря на простоту. В точках 1, 2 и 3 схемы напряжения изображены на рисунке 2.14г последовательно (сверху-вниз); на выходе в точке 3 пунктиром показана АКФ меандра с максимумом в момент времени t=2T величиной БЭ=2Э, где Э – энергия элементарного (одного) импульса-меандра; обострение пика АКФ получило в литературе название «сжатия» сигнала, позволяющее в случае воздействия нескольких сигналов улучшить их разрешение (разделение) друг от друга. На рисунке 2.14д показан только отклик СФ на сигнал-меандр с базой Б=4, поэтому в пике АКФ равна БЭ=4Э (см. пунктир). Пример приведен для того, чтобы подчеркнуть основной недостаток меандровых сигналов – слишком большая близость «боковых» лепестков АКФ к центральному пику, что при наличии сильного шумового фона препятствует правильной фиксации максимума пика АКФ (смещает и искажает его). В теории сигналов хорошо известны сигналы с более сложной фазовой манипуляцией [25], чем «меандровая» манипуляция (-, +, -, +, ...). Для примера показан сигнал Баркера с базой Б=3 на рисунке 2.14е, на рисунке 2.14ж – ИХ СФ (схема не показана), на рисунке 2.14з – процесс сжатия, причем ближайший боковой лепесток отстоит от максимального на 2Т, а максимум, по крайней мере, в три раза больше. Известны сигналы Баркера с Б=4, 5, 7, 9, 11, 13 - других не известно; но существуют и более сложные манипуляции [23]; правда, рекомендовать такие сигналы в ГЭР авторы отчета остерегаются (пока, во всяком случае), помня о сложностях реализации в сильноточных и высоковольтных излучающих диполях.



Рисунок 2.14 Сигнал (а); импульсная характеристика (ИХ) СФ (б); схема СФ (в); отклик на выходе (г) при Б=2; при Б=4 (д); сигнал Баркера (Б=3) (е); ИХ (ж); отклик (з)

На рисунке 2.15 приведен другой случай сжатия сигнала в виде одной полуволны – случай актуален при выделении инфранизких частот (<0,01Гц) в ГЭР; для упрощения произведена аппроксимация прямоугольными ступеньками: а – ИХ, б – сигнала (схема СФ отсутствует, но содержит линию задержки с 10-ю отводами с положительными весами, меняющимися ступенчато через 0,1 от нуля до единицы и обратно; затем все подается на сумматор). Результат сжатия изображен на рисунке 2.15н, форма АКФ очень похожа (в центре) на полуволну сжимаемого

сигнала, в целом же – на гауссовую по форме кривую. Главное же состоит в том, что несмотря на крайне низкий по частоте сигнал сжимается как и любой другой, что в итоге позволяет оценить все необходимые параметры без использования сложных алгоритмов оценки «тренда» - здесь его нет, отсюда и кавычки; следует только помнить, что СФ будет сжимать этот сигнал примерно  $T \ge (0,01_{\rm ry})^{-1}=100$  с; но даже для частоты  $10^{-3}$  Гц потребуется время  $10^3$ с, что для излучающего диполя вполне реально, а для приемных диполей требует дополнительного рассмотрения. На рисунке 2.15 рассмотрен еще более «трудный» случай сжатия импульса длительностью T/4, см. рисунки 2.15а-п, и результат сжатия на рисунке 2.15р.



Рисунок 2.15 Импульсная характеристика (ИХ) СФ (а); сигнал на входе (б); этапы (в)...(м) преобразований в СФ; отклик на выходе (н)



Рисунок 2.16 Сигнал на входе СФ (а); импульсная характеристика СФ (б); этапы преобразований в СФ (в) – (м); реакция на выходе СФ (р); реакции сигналов f<sub>1</sub>(t) и f<sub>2</sub>(t) (рис. 2.14) одинаковы

Для согласованной фильтрации ничего «выходящего вон» не наблюдается, сигнал сжимается точно так же, как и на рисунке 2.15, что после сжатия позволяет выделить все необходимые параметры; если очень надо, можно сформировать сигнал, подобный сигналу «тренда», и уничтожить его вычитанием из входной смеси; если же шумы и другие мешающие сигналы не позволяют сделать этого, то надо воспользоваться схемой компенсации на рисунке -2.13б, найти ВКФ поступающего (и предварительно задержанного) сигнала со сформированной его копией, и минимизировать его мощность. В этом случае можно вполне обойтись без сложной утомительной оценки «тренда» и его последующего нивелирования.

В завершении отметим, что во всех схемах СФ на рисунке 2.14 на выходе обязательно присутствует интегратор типа КС (см. раздел 2.2.4) для интегрирования прямоугольных элементарных импульсов длительностью Т, иначе получить показанные пунктирами отклики невозможно. Практически подобные интегрирующие цепи получаются легко [27,28], с потерей в отношении С/Ш менее 90,5 дБ, при обработке прямоугольного импульса полюса пропускания F=1,37/T; при обработке гауссова (по форме) импульса F=0,63/T.

### 2.2.3 Сравнение оптимального и классического обнаружителя с обелением

В классической литературе часто рекомендуется использовать обеляющий фильтр (ОФ) при воздействии помех с ограниченным спектром. Покажем, что использование ОФ всегда приводит к неэффективному приему, хотя бы из-за неизбежного искажения полезного сигнала [22].

Рассмотрим обнаружение сигнала s(t) со спектром S( $\omega$ ) и полосой частот  $\Delta f_S$  на фоне коррелированной помехи x(t) с энергетическим спектром W<sub>X</sub>( $\omega$ ) и полосой частот  $\Delta f_X$ . Для простоты спектр сигнала и помехи положим приближенно равномерными в соответствующих полосах частот. Классическая схема обнаружения состоит из обеляющего фильтра (OФ) с передаточной функцией  $K_{o\phi} = \sqrt{W_0/W_x(\omega)}$ , с нулевой ФЧХ и следующего за ним согласованного (с новым сигналом) фильтра (СФ), выделяющего сигнала с модулем спектра  $|K_{O\phi}S(\omega)|$  на фоне обеленной помехи со спектральной плотностью W<sub>0</sub>(Вт/Гц) в полосе частот  $\Delta f_0 \leq \infty$  (см. рисунок 2.17 в).



Рисунок 2.17 Спектр помехи и сигнала на входе (а), схема с обеляющим фильтром (б) и следующим за ним согласованным фильтром с АЧХ<sub>СФ</sub> (в).

Мощности сигнала и помехи на входе равны, соответственно:

$$M_{S} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)|^{2} d\omega \approx |S|^{2} \Delta f_{S}, \quad \sigma_{X}^{2} = \int_{-\infty}^{\infty} W_{X}(\omega) d\omega = W_{X} \Delta f_{X}.$$

Поэтому отношение сигнал/шум на входе равно:

$$q_{\rm ex} \frac{M_{\rm S}}{\sigma_{\rm X}^2} = \frac{\left|S\right|^2}{W_{\rm X}} \frac{\Delta f_{\rm S}}{\Delta f_{\rm X}}$$

После идеального обеления мощности сигнала и белой помехи не меняются, поэтому имеем:

$$q_{o\phi} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| K_{o\phi} \right|^2 \left| S(\omega) \right|^2 d\omega \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W_0 d\omega \right]^{-1} = \frac{\left| S \right|^2}{W_X} \frac{\Delta f_S}{\Delta f_0} = q_1 \frac{\Delta f_S}{\Delta f_0}.$$

Следовательно, от использования только ОФ имеем:

$$q' = \frac{q_{o\phi}}{q_{ex}} \frac{\Delta f_X}{\Delta f_0}$$

и т.к. обычно  $\Delta f_0 \ge \Delta f_X$ , использование ОФ приводит к проигрышу в отношении сигнал/шум. Однако, дальнейшая согласованная фильтрация улучшает положение. Действительно, АЧХ СФ равна  $|K_{C\phi}| = |K^*_{O\phi}S^*(\omega)|$ , поэтому для мощности сигнала и помехи на выходе СФ имеем, соответственно:

$$M_{S} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |K_{C\Phi}|^{2} |K_{O\Phi}S(\omega)|^{2} d\omega = \frac{W_{0}^{2}}{W_{X}^{2}} \frac{|S|^{4}}{W_{X}^{2}} \frac{\Delta f_{S}}{\Delta f_{S}}, \quad \sigma_{\rm sour}^{2} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |K_{C\Phi}|^{2} W_{0} d\omega = \frac{W_{0}^{2}}{W_{X}^{2}} \frac{|S|^{2}}{W_{X}^{2}} \frac{\Delta f_{S}}{\Delta f_{S}},$$

поэтому отношение сигнал/шум на выходе системы ОФ-СФ равно:

$$q_{1_{Gblx}} = rac{M_{S_{GGbl}}}{\sigma_{_{Gblx}}^2} = rac{\left|S\right|^2}{W_{_X}} = q_{_{GX}} rac{\Delta f_{_X}}{\Delta f_{_S}} ,$$

откуда дополнительное увеличение сигнал/шум равно:

$$q_1 = \frac{q_{16bix}}{q_{ex}} = \frac{\Delta f_X}{\Delta f_S}$$

Следовательно, относительный выигрыш в системе ОФ-СФ имеет место только тогда, когда полоса частот помехи превосходит полосу частот сигнала:  $\Delta f_X > \Delta f_S$ .

Теперь рассмотрим оптимальный обнаружитель, состоящий из компенсатора и согласованного фильтра, рисунок 2.18.



Рисунок 2.18 Схема компенсатор-СФ (а), спектр сигнала и помехи на входе (б) и выходе (в)

Сохраняя прежнюю величину отношения сигнал/шум на входе, для отношения сигнал/шум на выходе компенсатора получаем:

$$q_{K} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| S \right|^{2} d\omega \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W_{K}(\omega) d\omega \right]^{-1} = \frac{\left| S \right|^{2}}{W_{X}} \frac{\Delta f_{S}}{\Delta f_{K}} = q_{ex} \frac{\sigma_{X}^{2}}{\sigma_{ocm}^{2}},$$

где  $\sigma^2_{ocm} = W_K \Delta f_K$ есть дисперсия остатка компенсации помех в полосе компенсации  $\Delta f_K$ .

 $T.\kappa.\sigma_{oct}^2 < \sigma_x^2$ , то использование только компенсатора приводит к выигрышу в отношении сигнал/шум:

$$q'' = \frac{q}{\sigma_x^2} \frac{\sigma_x^2}{\sigma_{ocm}^2}$$

при этом, выигрыш от использования только компенсатора по сравнению с использованием только ОФ, равен:

$$\frac{q''}{q'} = \frac{q_K}{q_{o\phi}} = \frac{W_X}{W_{ocm}} = \frac{\sigma_X^2}{\sigma_{ocm}^2} \frac{\Delta f_o}{\Delta f_X} = \frac{W_X}{W_K} \frac{\Delta f_O}{\Delta f_K}$$

где спектральная плотность  $W_{ocm} = \sigma^2_{ocm} / \Delta f_0$ , есть «искусственная» равномерная спектральная плотность остатка компенсации помех, но не в полосе компенсации  $\Delta f_K$ , а в полосе обеленной помехи. Ясно, однако, что всегда q'' > q', если  $W_X > W_K$ , и  $\Delta f_0 > \Delta f_K$ . Компенсатор (К) почти всегда эффективнее обеляющего фильтра (ОФ), за исключением случая плохой компенсации ( $K_K \leq W_X$ ), слишком широкой полосе частот ( $\Delta f_K \leq \Delta f_0$ ), когда  $q'' \geq q'$ . Учтем теперь согласованный фильтр (после компенсатора) с модулем передаточной функции, равным  $|S^*(\omega)|$ . Тогда имеем:

$$q_{2_{Bblx}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| S^*(\omega) \right|^2 \left| S(\omega) \right|^2 d\omega \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| S^* \right|^2 W_K d\omega \right]^{-1} = \frac{\left| S \right|^2}{W_X} \frac{\Delta f_S}{\Delta f_S} = q_{ex} \frac{W_X}{W_K} \frac{\Delta f_X}{\Delta f_S} = q_{ex} \cdot \frac{\sigma_X^2}{\sigma_K^2},$$

где  $\sigma^2_{ocm} = W_K \cdot \Delta f_S$  есть мощность помехи на выходе СФ в полосе пропускания СФ, равной  $\Delta f_S$ . Поэтому относительный выигрыш в системе К-СФ равен:

$$q_2 = \frac{q_{2_{6bix}}}{q_{ex}} = \frac{\sigma_X^2}{\sigma_K^2} = \frac{\sigma_X^2}{\sigma_{ocm}^2} \frac{\Delta f_K}{\Delta f_S} \,.$$

Следовательно, относительный выигрыш в системе К-СФ имеет место всегда, и этот выигрыш тем больше, чем лучше компенсация ( $\sigma^2_{oct} << \sigma^2_x$ ) в более широкой полосе частот ( $\Delta f_s << \Delta f_K$ ) по сравнению с сигналом.

Сравнительный выигрыш от использования оптимального обнаружителя (К-СФ) и оптимального (ОФ-СФ) равен:

$$q\frac{q_2}{q_1} = \frac{q_{2_{\textit{GbLX}}}}{q_{1_{\textit{GX}}}} = \frac{\sigma_X^2}{\sigma_{\textit{ocm}}^2} \frac{\Delta f_K}{\Delta f_X} = \frac{W_X}{W_K} > 1, \quad W_X = \frac{\sigma_X^2}{\Delta f_X}, \quad W_K = \frac{\sigma_{\textit{ocm}}^2}{\Delta f_K}, \quad \sigma_X^2 > \sigma_{\textit{ocm}}^2, \quad \Delta f_K \ge \Delta f_X .$$

Оптимальная система с компенсацией всегда эффективнее неоптимальной, и отношение сигнал/шум тем больше, чем больше спектральная плотность входной помехи  $W_X$  по сравнению со спектральной плотностью  $W_K$  остатка  $\sigma^2_{oct}$  некомпенсированной помехи в полосе компенсации  $\Delta f_K$ . Именно поэтому в полученных ранее [25] оптимальных алгоритмах обнаружения остаток компенсации помех Y – BX почти никогда не является белым шумом. Лишь только при отсутствии взаимной корреляции шумов активных и пассивных пунктов и при исходной белости шумов обратная матрица к корреляционной будет диагональной в силу диагональности матрицы белого шума, и остаток компенсации станет также белым, точнее «белоподобным» по спектру [21].



Рисунок 2.19 Трансверсально-рекурсивная схема обработки (а), расположение нулей и полюсов mZ – плоскости (б), модуль передаточной функции (в) и требуемая передаточная функция обеляющего фильтра (г)

В отличие от компенсаторов, при схемной реализации обратных или обеляющих фильтров (ОФ) приходится использовать рекурсивные фильтры с обратными связями, рисунок 2.19а. Передаточная функция в Z – плоскости имеет вид (рис. 2.19б):

$$W_{X}(Z) = \prod_{J=1} (z - Z_{m}) \left[ \prod_{i} (z - Z_{m}) \right]^{-1},$$

где  $Z_{0j}$  есть нули, обеспечивающие провал в спектре, а  $Z_{\Pi i}$  – полюсы, обеспечивающие выбросы в спектр помехи [3] (см. рисунок 2.18 в). Обратим внимание, что элементы задержки Z-круга (или на окружности единичного радиуса), что позволяет раздельно регулировать АЧХ и ФЧХ. Поэтому новые полюсы окажутся вне Z-круга или на окружности. Это означает неустойчивость обратных фильтров и их физическую неосуществимость [22], см. рисунок 2.19 г в точке  $\omega_{nj}$ .

## 2.2.4 Сравнение оптимального компенсатора с неоптимальным квадратурным

Будем называть компенсаторы, полученные ранее (раздел 2.2.1) оптимальными, поскольку они являются неотъемлемой частью обнаружителей, оптимальных в целом. Для конкретности будет иметь в виду активно-пассивный обнаружитель сигнала на фоне белых (но взаимнокоррелированных помех активного и пассивного пунктов с коэффициентом корреляции г), когда алгоритм обнаружения имеет вид: [25]

$$\lambda = \sum_{j=1}^{n} \frac{S_i}{\sigma_y} \left( \frac{y_i}{\sigma_y} - r \frac{x_i}{\sigma_x} \right)^{>} \langle \lambda_{nop} .$$

Обратим внимание на наличие в приведенном выражении нормировки входных процессов на среднеквадратические отклонения  $\sigma_y$  и  $\sigma_x$ . С этой целью в активном канале должна измеряться (т.е. оцениваться) дисперсия  $\sigma^2_y$ , а в пассивном (опорном) –  $\sigma^2_x$ . При оценке дисперсии используются квадратор и интегратор на операционном усилителе для усреднения (см. рисунок 2.20 а).



Рисунок 2.20 Схема нормировки (а) на электронном приборе (б) и напряжением регулирования (в)

Возведение в квадрат осуществляется термопреобразователем, например, терморезистором с большой инерционностью. В радиотехнической аппаратуре удобнее использовать диоды (или транзисторы в диодном включении), рисунок 2.20б. Для нормировки берется корень квадратный из

дисперсии. Устройство такого типа можно получить из предыдущего заменого управления тока на напряжение (или наоборот). Затем  $\sigma_x$  вводится в устройство автоматической регулировки усиления (АРУ), которое в данном случае называется шумовым АРУ или ШАРУ, и вырабатывает управляющее напряжение АРУ U<sub>per</sub>=K· $\sigma_x$ , где K – коэффициент пропорциональности, рисунок 2.20 в. Теперь с ростом усиливаемого процесса x(t) растет отрицательное по величине напряжение регулирования (-U<sub>per</sub>) и смещается рабочая точка электронного прибора усилителя с целью уменьшения полезного тока і через сопротивление нагрузки.

Иногда напряжение регулирования включается лишь при |x|>|x<sub>0</sub>|. Подобные схемы называются схемами АРУ с задержкой на x<sub>0</sub> и обладают повышенной помехозащищенностью.

Для оценки взаимной корреляции после нормировки используется устройство с регулируемой задержкой  $\tau$ , перемножителем и интегратором, см. рисунок 2.21а. В силу конечности времени интегрирования T оценка производится со статистической ошибкой, причем дисперсия этой ошибки [19]  $\sigma^2$  более чем в  $\sqrt{2}$  раз больше при  $\tau=0$ , чем при  $\tau=\infty$ , т.к. отсчеты, формирующие хвосты функции корреляции, статистически независимы. На рисунке 2.216 показана типичная реализация оценки  $\bar{r}(\tau)$  коэффициента взаимной корреляции  $r(\tau)$  для фазомодулированного шумом ФМП.



Рисунок 2.21 Схема оценки коэффициента корреляции (а) , т – личная реализация оценки (б)

Отметим, что  $\bar{r}(\tau)$  см. [19], изменяется не так, как оценка корреляционной функции  $\bar{K}(\tau)$ при воздействии гауссовых процессов, хотя и в этом случае отношение оценок  $\bar{K}(\tau)$  и  $\overline{\sigma^2}$ , приводящее к  $\bar{r}(\tau)$ , в общем случае может отличаться от приведенной на рисунке 2.216 (см. [21-24]).

Дисперсия оценки падает как корень квадратичный с увеличением времени усреднения Т или числа N некоррелированных выборок,  $\tau_{\text{кор}}$  – время корреляции,  $\Delta f_x$  – ширина энергетического спектра помехи x(t):

$$\sigma^{2} = \frac{1}{\sqrt{T}} = \frac{1}{\sqrt{T\tau_{_{KOP}}}}, \qquad \tau_{_{KOP}} \cong \frac{1}{\Delta f_{_{X}}}.$$

Затем в алгоритме производится перемножение г на  $x/\sigma_x$ . Существуют самые разнообразные методы и схемы перемножения. Проще всего перемножить а и b можно путем реализации формулы:  $(a+b)^2-(a-b)^2=4ab$ , требующей два вычитатора, один сумматор, два квадратора. Известны балансные перемножители, различные диодные и транзисторные схемы. Вообще говоря, с практической точки зрения по развитию средств перемножения можно составить достаточно адекватное представление о развитии радиоэлектроники на данный момент в целом: операция перемножения является эффективной при гетеродировании, при амплитудной модуляции, стробировании, дискретизации, бланкировании (для запирания устройств при воздействии нежелательных сигналов), и т.д. Отметим, что гетеродирование является удобной операцией при перемножении комплексных огибающих  $U_j \cdot exp(i\phi_j)$  сигналов в CBЧ диапазоне, т.к. появляется возможность регулировки амплитуд  $U_j$  и фаз  $\phi_j$ .

Если схемы, изображенные на рисунках 2.20 и 2.21, дополнить вычитатором для компенсации активной помехи  $(y_j/\sigma_j)$  взвешенной пассивной  $rx_j/\sigma_x$ , то получим схему оптимального компенсатора. Можно показать, что дисперсия остатка компенсации равна [22]:

$$\sigma_{ocm}^2 = \sigma_X^2 \left(\frac{\tau}{\tau_{\kappa op}}\right)^2 \approx \sigma_X^2 \left(\frac{\Delta f_x}{\Delta f_{ocm}}\right)^2,$$

где  $\Delta f_{ocm}$  – есть ширина полосы частот остатка, много большая ширины спектра помехи  $\Delta f_x$ . Эффективность компенсации тем выше, чем ближе  $\tau$  к нулю, т.к. это определяет близость г к единице.

Сравним этот оптимальный компенсатор (ОК) с реально используемым квадратурным компенсатором помехи (кратко КК), который в 1963 г был предложен и изучен профессором Я.Д. Ширманом с сотрудниками (см. рисунок 2.22а), где использованы комплексные амплитуды и веса.



Рисунок 2.22 Схема квадратурного автокомпенсатора (а), векторные диаграммы при отсутствии (б) и наличии (в) сигнала на входе.

На два коррелятора в цепи обратной связи поступает, соответственно, помеха  $x_1(t) = A(t)\cos(\omega t + \varphi(t))$ , и сдвинутая на 90° квадратура помехи:  $x_2(t) = A(t)\sin(\omega t + \varphi(t))$ , причем  $x_1^2 + x_2^2 = A^2(t)$ . На другие входы корреляторов поступает напряжение остатка компенсации, равное:

$$\varepsilon(t) = y_1(t) - K_1 x_1(t) - K_2 x_2(t),$$

где К<sub>1</sub> и К<sub>2</sub> есть весовые коэффициенты. Если К<sub>1</sub> $\rightarrow \infty$  и К<sub>2</sub> $\rightarrow \infty$ , то дисперсия остатка компенсации стремится к нулю при  $|r| \rightarrow 1$ , [22]:

$$\sigma_{ocm} = \sigma_{s}^{2}(t) = \sigma_{y}^{2}(1-|r|^{2}), \qquad \sigma_{x}\sigma_{y}r = \langle yx_{1}^{*}\rangle = \langle yx_{2}^{*}\rangle.$$

Компенсатор будет работать и при одной ветви (К2= 0):

$$\sigma_{\varepsilon}^{2} = \left\langle \left( y - K_{1} x_{1} \right)^{2} \right\rangle = \sigma_{y}^{2} - 2K_{1} \sigma_{x} \sigma_{y} r + K^{2} \sigma_{x}^{2}.$$

Минимум дисперсии остатка наблюдается при условии, что

$$\frac{\partial \sigma_{\varepsilon}^2}{\partial K_1} = 0, \qquad K_{1opt} = \frac{\sigma_y r}{\sigma_x}, \qquad \sigma_{\varepsilon \min}^2 = \sigma_y^2 (1 - r^2).$$

При таком оптимальном значении веса остаток  $\varepsilon(t)$  и помеха декоррелированы, т.к. {  $\varepsilon(t) x_1(t)$  } = 0. Обычно на выходе коррелятора имеется усилитель с большим коэффициентом усиления *а*. Поэтому удобно переписать коэффициент K<sub>1</sub> в виде:  $K_1 = 2K_1\sigma_x\sigma_y r = \alpha \langle \varepsilon(t)X_1(t) \rangle$ .

Подставив сюда величину є=у-К1х1, получим формулу для весового коэффициента

$$K_1 = \alpha \langle (y - K_1 x_1) x_1 \rangle = \alpha (\sigma_x \sigma_y r - K_1 \sigma_x^2), \quad K_1 = \frac{2\sigma_x \sigma_y r}{1 + \alpha \sigma_x^2} \xrightarrow{\rightarrow} \frac{\sigma_y r}{\sigma_x}.$$

Поэтому только в пределе при бесконечно большом усилении в цепи корреляционной обратной связи будет наблюдаться декорреляция остатка компенсации и помехи. Компенсация поясняется векторной диаграммой Ра рисунке 2.226. Вектор  $K_1x_1$  противоположен вектору  $x_1$ , между векторами  $K_1x_1$  и  $K_2x_2$  угол равен 90<sup>0</sup>. Ясно, что при неэффективной работе одного корреляционного канала наличие квадратурного канала может повысить в целом результат подавления помех. Однако, уже сейчас можно охарактеризовать основные недостатки неоптимальных квадратурных автокомпенсаторов (КК) (см. также [22,23]).

- Прежде всего, компенсатор работает при условии, что ошибка ε(t)≠0.И этот момент является принципиальным: при отсутствии ошибки нет регулирования, и нет компенсации.
- 2) КК относится к регулируемым устройствам, и при высоком коэффициенте режекции помехи способны самовозбудиться из-за близости полюсов системной функции к окружности единичного радиуса. Из рисунка 2.22 ясно, что если угол ψ между векторами помех основного и опорного (корреляционного) каналов стремится к 90<sup>0</sup>, то коэффициент К<sub>1</sub> надо уменьшить до 0, тогда как К<sub>2</sub>→∞.
- 3) Это приводит к увеличению ошибки компенсации, и требует, вообще говоря, в зависимости от коэффициента корреляции г=соsу подстраивать и веса К<sub>1</sub> и К<sub>2</sub> по

некоторому закону, что приводит, в свою очередь, к практически очень громоздкой и плохо управляемой схеме.

- Крупным недостатком КК является попадание снова на вход полезного сигнала из цепи обратной связи с выхода системы, что приводит по крайней мере к сильному искажению полезного сигнала.
- 5) Если же развязка между основным (активным) и опорным (пассивным) каналами недостаточна, то просачивание сигнала s(t) в опорный канал приводит не только к сильному искажению и уменьшению полезного сигнала s(t) на выходе, но и одновременно к увеличению помехового остатка. При этом, как следует из векторной диаграммы рисунок 2.22в, угол ψ(t) меняется непрерывно во времени, процесс компенсации становится нестационарным, и сопровождается большими динамическими ошибками.

# 2.2.5 Обнаружение сигнала на фоне комплексных помех

Эти проблемы весьма актуальны в ГЭР. Действительно, неоднократно подчеркивалось, что для достижения высокой эффективности компенсации требуется управлять комплексными огибающими помех и сигналов, т.е. огибающими и фазами этих процессов. Поэтому рассмотрим проблему выделения узкополосного комплексного сигнала на фоне гауссовой и также узкополосной комплексной помехи Z(t)=x(t)+iy(t) оптимальной активно-пассивной системой. Компоненты x(t) и y(t) полагаются действительными нормальными процессами с нулевыми средними значениями: (x)=(y)=(Z)=0. Обозначая звездочкой операцию транспонирования с одновременным комплексным сопряжением, условную многомерную плотность вероятностей можно записать в виде [21]:

$$f(Z_1/Z_2) = (2\pi)^{-\frac{N_1}{2}} \left(\frac{\det|K_{22}|}{\det|K|}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(Z_1 - BZ_2)D(Z_1 - BZ_2)^*\right\},$$
  
$$B = K_{12}K_{22}^{-1}, \quad D^{-1} = K_{11} - K_{12}K_{22}^{-1}K_{21}, \quad K_{ij} = \langle Z_i/Z_j^* \rangle = K_{ji}^*, \quad (i, j) = 1, 2, \quad K = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{pmatrix},$$

где Z<sub>1</sub> есть составной вектор коррелированных помех от всех активных пунктов, Z<sub>2</sub> – также коррелированных помех от всех пассивных пунктов. Тогда комплексная матрица взаимных корреляций, учитывая коррелированность (в общем узкополосных) помех активных и пассивных пунктов, равна:

$$K_{nm} = \left\langle Z_{n} Z_{m}^{*} \right\rangle = \left\langle \left( \left| Z_{n1} \right| e^{i\varphi_{n1}}, \dots \left| Z_{nN_{1}} \right| e^{i\varphi_{nN_{1}}} \right)^{T} \left( \left| Z_{m1} \right| e^{-i\psi_{m1}}, \dots \left| Z_{mN_{1}} \right| e^{-i\psi_{mN_{1}}} \right) \right\rangle = K_{mn}^{*} = \left\langle Z_{m} Z_{n}^{*} \right\rangle = \left\langle \left( \left| Z_{m1} \right| e^{i\psi_{m1}}, \dots \left| Z_{mN_{1}} \right| e^{i\psi_{mN_{1}}} \right)^{T} \left( \left| Z_{n1} \right| e^{-i\psi_{n1}}, \dots \left| Z_{nN_{1}} \right| e^{-i\psi_{nN_{1}}} \right) \right\rangle =$$

$$= \begin{pmatrix} \langle |Z_{n1}||Z_{m1}|\exp[i(\psi_{n1} - \psi_{m1})]\rangle, \dots, \langle |Z_{n1}||Z_{mN_{1}}|\exp[i(\psi_{n1} - \psi_{mN_{1}})]\rangle \\ \dots, \langle |Z_{m1}||Z_{mN_{1}}|\exp[i(-\psi_{m1} + \psi_{mN_{1}})]\rangle, \dots, \langle |Z_{mN_{1}}||Z_{nN_{1}}|\exp[i(\psi_{nN_{1}} - \psi_{mN_{1}})]\rangle \end{pmatrix}$$

Всегда комплексными являются недиагональные элементы матриц, что сразу получается из приведенной формулы заменой индекса n на m (или m на n). При этом обращение матриц осуществляется стандартным способом. Особое значение имеет комплексность матричного веса B, что обеспечивает полную (в идеале) компенсацию помех. Проиллюстрируем сказанное рассмотрением системы (1/1) размерности (1x1). В этом случае исходный помеховый массив состоит всего из двух отсчетов:

$$(Z_1Z_2) = (x_1 + iy_1 = |Z_1| \exp[i\psi_1]; \quad x_2 + iy_2 = |Z_2| \exp[i\psi_2]),$$

недиагональные элементы матрицы корреляций являются комплексными величинами, поэтому получаем:

$$K = \begin{pmatrix} \langle |Z_{1}|^{2} \rangle, & \langle |Z_{1}||Z_{2}|\exp[i(\psi_{1}-\psi_{2})] \rangle \\ \langle |Z_{1}||Z_{2}|\exp[i(\psi_{2}-\psi_{1})] \rangle, & \langle |Z_{2}|^{2} \rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{11}, & |K_{12}|\exp[i\varphi] \\ |K_{12}|\exp[-i\varphi], & K_{22} \end{pmatrix}, \quad \varphi = \psi_{1}-\psi_{2},$$

$$D^{-1} = K_{11} - K_{12}K_{22}^{-1}K_{21} = \langle |Z_{1}|^{2} \rangle - \langle |Z_{2}|^{2} \rangle^{-1} |K_{12}|^{2}, \quad B = K_{12}K_{22}^{-1} = \langle |Z_{1}|^{2} \rangle^{-1} \times \langle |Z_{1}||Z_{2}|\exp[i(\psi_{1}-\psi_{2})] \rangle = |B|\exp[i\varphi], \quad |B| = \langle |Z_{1}|^{2} \rangle^{-1} |K_{12}|,$$

$$\varepsilon = Z_{1} - BZ_{2} = |Z_{1}|\exp[i\psi_{1}] - |B|\exp[i\varphi] \cdot |Z_{2}|\exp[i\psi_{2}] = |\varepsilon|\exp(i\arg\varepsilon).$$

Из последней формулы сразу получаем, что остаток компенсации будет равен нулю при условии, что, либо  $|\varepsilon| = 0$ , либо arg $\varepsilon = 2\pi m$ , m = 0, 1, 2, ...

Поэтому цель оптимальной обработки и заключается в отыскании комплексных весовых множителей В и матрицы  $D^{-1}$ . Это положение имеет место и в общем случае обнаружения комплексного вектора сигналов S в смеси с помехой  $Z_1(t)$ . Действительно [25], многомерное отношение правдоподобия равно:

$$\Lambda = \frac{f(Z_1 - S_1 / Z_2)}{f(Z_1 / Z_2)} \exp[L + L^* - q_{_{Bblx}}] = \exp[2\operatorname{Re} L^* - q_{_{Bblx}}]$$
$$L = S^* D(Z_1 - BZ_2) \Big|_{<}^{>} L_{_{nop}}, \qquad q_{_{Bblx}} = S^* DS, \quad \lambda = \operatorname{Re} L_{_{<}}^{>} \lambda_{_{nop}}.$$

Для вынесения решения о наличии сигнала с пороговой величиной сравнивается случайная Действительная величина  $\lambda = ReL$ , которая может быть получена различными способами, что предопределяет различие алгоритмов обнаружения. Простейший способ использует расщепление всех комплексных элементов на модули и фазы с дальнейшей раздельной скалярной обработкой,
показанной на рисунке 2.23 недвойными (одинарными) линиями. Кроме блоков расщепления (Расщ.) необходимо вычисление косинуса суммарных углов, что осуществляется блоком соз. Комплексность функций корреляций приводит к необходимости выравнивать модули и разности фаз компенсируемых активных помех  $Z_{mj} = |Z_{mj}| \exp(i \psi_{mj})$ , и формируемых помех от пассивных пунктов BZ<sub>2</sub>, равных:

$$B_{nj}Z_{nj} = |B_{nj}||Z_{nj}|\exp[i(\varphi_{Bj} + \psi_{nj})]$$

После вычитания и расщепления получаем скалярные величины:

$$|\varepsilon| = (Z_1 - BZ_2), \quad \arg \varepsilon = \arg(Z_1 - BZ_2).$$



Рисунок 2.23 Оптимальный обнаружитель сигналов с компенсацией узкополосных помех

Аналогично формируются скалярные величины  $d_y$  и  $\phi_{dy}$ , после обращения блочной матрицы корреляций К и расщепления элементов  $D_{Kj} = d_{Kj} \exp[i\varphi_{d_{Kj}}]$ . Копия сигналов из запоминающего устройства (ЗУ) после расщепления подвергается комплексному расщеплению, все фазы меняют знак (модули, естественно, не меняются). После перемножения всех модулей и сложения всех фаз формируется величина

$$\lambda = \operatorname{Re} L = \sum_{i} \sum_{j} S_{ij} d_{ij} |Z_{ij}| \cos \left[-\psi_{S_{ij}} + \varphi_{d_{ij}} + \psi_{Z_{ij}}\right]_{<}^{>} \lambda_{nop} ,$$

все величины суммируются в накопителе (Накоп.), сравниваются в пороговом устройстве (ПУ) с порогом  $\lambda_{nop}$ . Показанный на рисунке 2.23 хронизатор синхронизирует работу всех блоков и систем обнаружителя. Фактически блок-схема компенсатора не меняется, но зато сильно преобразуется вся весовая матричная согласованная обработка сигналов.

Для пояснения работы довольно сложной схемы обнаружителя рассмотрим практически полезный пример активно-пассивной системы обнаружения комплексного сигнала на фоне белых по спектру нормальных помех активных и пассивных пунктов с единичными матрицами корреляции  $K_{YY} = K_{XX} = E$ . Взаимный шум между каналами положим нормальным и комплексным со взаимным коэффициентом корреляции  $\rho_{YX} = \rho_{XY}^* = \rho e^{i\varphi_{\rho}}$ .

С методических позиций полезно получить оптимальный алгоритм из отношения правдоподобия, которое в данном случае (в силу белости шумов) распадается на произведение условных отношений правдоподобия [22]:

$$\lambda = \ln \Lambda = \ln \prod_{j=1}^{n} f\left(Z_{1j} - S_{j} / Z_{2j}\right) f^{-1} \left(Z_{1j} / Z_{2j}\right) = \left(1 - |\rho|^{2}\right)^{-1} \sum_{j=1}^{n} \operatorname{Re}\left[\frac{S_{j}^{*}}{\sigma_{1}}\left(\frac{Z_{1j}}{\sigma_{1}} - \rho \frac{Z_{2j}}{\sigma_{2}}\right)\right] = C \operatorname{Re}\sum_{j=1}^{n} S_{j}^{*} \varepsilon_{j},$$

$$C^{-1} = 1 - |\rho|^{2}, \quad S_{j}^{*} = \frac{S_{j}^{*}}{\sigma_{1}}, \qquad \varepsilon_{j} = \frac{Z_{1j}}{\sigma_{1}} - \rho \frac{Z_{2j}}{\sigma_{2}},$$

$$\lambda = \operatorname{Re}\sum_{j=1}^{n} S_{j}^{*} \varepsilon_{j} \stackrel{>}{<} \lambda_{nop} = C^{-1} \ln \Lambda_{nop} + \sum_{j=1}^{n} \frac{|S_{j}|^{2}}{2\rho_{2}^{2}}, \qquad \sigma_{1}^{2} = \sigma_{2}^{2} = \sigma^{2}.$$

Существо комплексной компенсации выясняется из рассмотрения остатка:

$$\varepsilon(t) = |Z_1| e^{i\psi_{1Z}} - |\sigma| e^{i\varphi_{\rho}} |Z_2| e^{i\psi_{2Z}} = |\varepsilon| \exp[i\varphi_{\varepsilon}], \qquad \varphi_{\varepsilon} = \arg \varepsilon(t).$$

Остаток компенсации  $\varepsilon(t)=0$  в условиях идеальной компенсации тогда, когда для любого момента времени имеем:  $|\varepsilon|=0$ ; arg $\varepsilon=2\pi m$ , m=0,1,2... Однако, в силу статистической постановки задачи величина  $\rho$  может обеспечивать минимум остатка и при  $|\rho|=1$ ,  $\varphi_{\rho}=0$ , если в среднем имеем:

$$|Z_1| \rightarrow |Z_2|, \quad \psi_{Z1} \rightarrow \psi_{Z2}$$

В процессе компенсации практически придется вычислять квадратуры:

$$\begin{cases} |\varepsilon|\cos\varphi_{\varepsilon} = |Z_1|\cos\psi_{Z1} - |\rho||Z_2|\cos(\psi_{Z2} + \varphi_{\rho}) \\ |\varepsilon|\sin\varphi_{\varepsilon} = |Z_1|\sin\psi_{Z1} - |\rho||Z_2|\sin(\psi_{Z2} + \varphi_{\rho}) \end{cases}$$

т.е. комплексное уравнение для  $\varepsilon(t)$  распадается на два квадратурных (но действительных) после сравнения мнимых и действительных частей уравнения справа и слева. Возводя оба квадратурных уравнения в квадрат и складывая, получим формулу для  $|\varepsilon|$ , а деля второе уравнение на первое – формулу для результирующей фазы  $\varphi_{\varepsilon}$ :

$$|\varepsilon|^{2} = |Z_{1}|^{2} + |\rho Z_{2}|^{2} - 2|Z_{1}||\rho||Z_{2}|\cos(\psi_{Z_{1}} + \psi_{Z_{2}} + \varphi_{\rho}), \quad tg \varphi_{\varepsilon} = \frac{|Z_{1}|\sin\psi_{Z_{1}} - |\rho||Z_{2}|\sin(\psi_{Z_{2}} + \varphi_{\rho})}{|Z_{1}|\cos\psi_{Z_{1}} - |\rho||Z_{2}|\cos(\psi_{Z_{2}} + \varphi_{\rho})}.$$

Обратим внимание, что и модуль и фаза остатка компенсации помех є(t) существенно зависят от модулей и фаз всех слагаемых, поэтому одно из достаточных условий эффективных компенсаций выглядит так:

$$|\varepsilon|\cos\varphi_{\varepsilon}=0, \qquad |\varepsilon|\sin\varphi_{\varepsilon}=0, \qquad |\varepsilon|=0, \qquad \varphi_{\varepsilon}=2\pi m, \qquad m=0,1,2,\dots$$

Именно эти уравнения должны моделироваться при синтезе спецвычислителя. Поскольку обнаружитель в целом должен моделировать величину

$$\lambda = \operatorname{Re} L = \operatorname{Re} \sum_{j=1}^{n} S_{j}^{*} \varepsilon_{j} = \sum_{j=1}^{n} \left| S_{j}^{*} \right| \varepsilon_{j} \left| \cos \left( \varphi_{\varepsilon_{j}} - \varphi_{S_{j}} \right) \right|^{>} \lambda_{nop} ,$$

то, подставляя сюда величины  $|\varepsilon_j|\cos \varphi_{\varepsilon_j}$  и  $|\varepsilon_j|\sin \varphi_{\varepsilon_j}$  из последней пары основных квадратурных уравнений, получим развернутую формулу алгоритма обнаружения, учитывающего квадратуры всех помех, сигналов, коэффициентов корреляции, и их перекрестные перемножения (см. рисунок 2.24 а, на котором квадратуры получаются путем поворота фаз на 90<sup>0</sup>).



Рисунок 2.24 Оптимальный обнаружитель с компенсацией белых помех (a) и характеристики качества обработки (б).

Реальная схема несколько более сложная, поскольку, например, помеха равна:

$$y(t) = A(t)\cos(\omega t + \Phi(t)) = A\cos\Phi\cos\omega t - A\sin\Phi\sin\omega t,$$

и квадратуры помехи умножаются на *coswt* и *sinwt*, cooтветственно. То же самое следует учитывать и для опорной помехи x(t) с другими, в общем, огибающей, фазой и несущей частотой.

Необходимо в заключение вычислить характеристики качества обнаружения. В силу нелинейности случайной величины  $\lambda = ReL$  удобнее рассматривать полусумму комплексносопряженных величин:

$$\lambda = \operatorname{Re} L = \frac{1}{2} \left( L + L^* \right) = \frac{1}{2} \left( \sum_{j} S_j^* \varepsilon_j + \sum_{j} S_j \varepsilon_j^* \right) > \lambda_{nop}, \qquad \varepsilon_j = Z_{1j} - \rho Z_{2j},$$
$$\left\langle \lambda_0 \right\rangle = 0, \quad \sigma_0^2 = \left\langle \lambda^2_0 \right\rangle = \left\langle \lambda_0 \lambda^*_0 \right\rangle \le 2q_{ex} = \sum_{i=1}^n \frac{\left| S_j \right|^2}{\sigma_1^2}, \qquad \left\langle Z_{1j} \right\rangle = \left\langle Z_{2j} \right\rangle = \left\langle \varepsilon_j \right\rangle = 0.$$

Если  $q_{BX} \leq l$ , то в этом (самом трудном случае обнаружения) дисперсия  $\sigma^2_0$  падает на порядок из-за компенсации помех. При наличии сигнала имеем:

١

$$\left\langle \lambda_{S} \right\rangle = \frac{1}{2} \left\langle \sum_{j} S_{j}^{*} \left( \varepsilon_{j} + s_{j} \right) + \sum_{j} S_{j} \left( \varepsilon_{j}^{*} + s_{j}^{*} \right) \right\rangle = 2q_{\theta X} = \sigma_{0}^{2} = \sigma_{S}^{2} .$$

Отношение сигнал/шум на выходе  $\langle \lambda_s \rangle^2 / \sigma_s^2 = 2q_{ex}$  достигает больших величин при больших сигналах на входе. Поэтому интеграл вероятностей и вероятность Р<sub>ПО</sub> быстро нарастает при больших значениях  $q_{BX}$ , рисунок 2.24 б (практически при  $q_{BX} \ge l$ ).

## 2.2.6 Влияние мешающих воздействий на обработку

Высокое качество совместной активно-пассивной обработки имеет место при идеальной развязке активных и пассивных пунктов, отсутствии взаимного неконтролируемого влияния друг на друга, а также в условиях пренебрежимо малых собственных шумов. Рассмотрим эти вопросы подробнее, следуя [22].

Итак, за счет недостаточной развязки каналов (по цепям питания, или по общим элементам конструкции) происходит паразитное просачивание полезных сигналов из активных каналов в пассивные. Возможно, конечно, и прямое попадание зондирующего или отраженного сигнала во всенаправленные диаграммы направленности антенн пассивных пунктов, либо прием по боковым лепесткам мешающих отражений от ионосферы или местных предметов. Так или иначе, из-за недостаточной пространственной или временной развязок паразитное просачивание сигнала s(t) возможно наряду с приемом полезного сигнала S(t). Полагая для простоты элементы вектора s малыми по сравнению со среднеквадратическими отклонениями помех или мощностями полезных сигналов, для отношения правдоподобия после разложения в ряд Тейлора по s функций f(Y-S, X - s) и ограничения только двумя первыми членами, получаем [8]:

$$\ln \Lambda = \ln \left[ f\left(Y - S, X - s\right) / f\left(Y, X - s\right) \right] \approx \ln \left[ f\left(Y - S / X\right) \right] - \ln(1 - A) \approx \lambda + A + o(s),$$
$$\lambda = \ln \left[ f\left(Y - S / X\right) f\left(Y / X\right) \right] = S^{T} D(Y - BX),$$

где o(s) есть малая второго и более высокого порядков по s,  $\lambda$  есть оптимальный алгоритм, матрица A равна:

$$A = (S^{T}, grad_{X} f(Y - S, X))f^{-1}(Y - S, X) - (S^{T}, grad_{X} f(Y, X))f^{-1}(Y, X),$$
$$grad_{X}^{T} f(X) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_{1}}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_{n}}\right).$$

Здесь *grad<sub>x</sub>f* есть вектор-столбец градиентов, который скалярно перемножается с вектором строкой s. И хотя компенсация помех в алгоритме сохраняется, тем не менее матричная поправка A имеет нелинейный по помехам (Y,X) и полезному сигналу S характер, что приводит к увеличению ошибок типа ложной тревоги. Если же просачивающийся сигнал s большой по величине (и содержит полезную информацию, как сигнал S), то целесообразно объединить вектора Y – S и X – s в некоторый новый составной полезный вектор  $Z - \tilde{S}$ , и рассматривать алгоритм обнаружения в виде [25]:

$$\ln \Lambda = \widetilde{S}^{T} K_{1}^{-1} Z - q_{\scriptscriptstyle Gblx} - \frac{K+L}{2} \ln(2\pi), \qquad q_{\scriptscriptstyle Gblx} = \widetilde{S}^{T} K_{1}^{-1} \widetilde{S} ,$$

где составной вектор сигналов, помех Z=(Y,X), матрица корреляций  $K_1 = \langle Z \cdot Z^T \rangle$  зависит от всех авто- и взаимных корреляций помех Y и X. Явное разбиение на блоки не требуется, поэтому компенсация пропадает, заменяется классическим обелением (крайне неэффективным) помехи перед согласованной фильтрацией.

Однако, часто не удается произвести четкую идентификацию поля сигналов, т.е. осуществить точное указание на соответствие определенной группы сигналов в силу неодинакового выравнивания пространственных (азимутальных и угловых) характеристик в активных (и пассивных) пунктах, неодинаковой компенсации различных временных задержек, допплеровских частот, затуханий амплитуд, паразитных сдвигов фаз, поляризаций и т.д. Поэтому паразитное просачивание сигналов и помех может резко ухудшить качество обнаружения.

К аналогичному эффекту приводит воздействие собственных шумов как активных пунктов, так и пассивных. Обозначим матрицы корреляций шумов через Q<sub>1</sub> и Q<sub>2</sub>, соответственно, и учитывая белость собственных шумов по спектру и статистическую независимость друг от друга, для общей шумовой корреляционной матрицы Q получаем выражение (i=1,2):

$$Q = \begin{pmatrix} Q_1 & 0 \\ 0 & Q_2 \end{pmatrix}, \qquad Q_i = \begin{pmatrix} \sigma_{i1}^2, 0, \dots, 0 \\ \dots, \dots, \dots, 0 \\ 0, 0, \dots, \sigma_{iN_i}^2 \end{pmatrix} \qquad N_1 = K, \quad N_2 = L.$$

Теперь в оптимальном алгоритме потребуется обращать сумму матриц  $(K+Q)^{-1}$ . После двукратного применения леммы об обращении суммы матриц получаем алгоритм обработки, изображенной на рисунке 2.25а (на рисунке 2.256 приведен граф корреляций):

$$\begin{split} \lambda &= \widetilde{S}^{T} \Big( F^{-1} - \Gamma^{-1} \Big) \Big[ Y - \big( T - W \big) X \Big], \quad F = G_{1} - K_{YX} G_{2}^{-1} K_{XY}, \quad T = K_{YX} G_{2}^{-1}, \quad D^{-1} = F^{-1} - \Gamma^{-1}, \\ \Gamma^{-1} &= F^{-1} \Big[ E + PF^{-1} \Big]^{-1} PF^{-1}, \quad P = K_{YX} + K_{XY} \Big( G_{2} K_{XX}^{-1} G_{2} + G_{2} \Big)^{-1} K_{YX} \\ B &= K_{YX} G_{2}^{-1} - W, \quad W = K_{YX} \Big( K_{XX}^{-1} G_{2} + E \Big) G_{2}^{-1}, \qquad G_{2}^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{21}^{-2}, & 0, \dots, 0 \\ \dots, \dots, & 0 \\ 0, & 0, \dots, & \sigma_{22}^{-2} \end{bmatrix}. \end{split}$$

Алгоритм записан в форме, сохраняющей компенсацию, но весовой блок В заменился на Т– W, и появились два дополнительных параллельных канала с матричными коэффициентами передачи  $F^{-1}$  и  $\Gamma^{-1}$ , учитывающих влияние собственных шумов. Анализ показывает, что из-за нарушения когерентности помех Y и X компенсация резко ухудшается, что сильно снижает качество обнаружения сигнала. Не улучшает обнаруживаемость как увеличение числа L пассивных пунктов в силу роста суммарной дисперсии остатка компенсации, так и увеличение числа K активных пунктов в силу снижения результирующего полезного сигнала за счет вредной компенсации паразитным сигналов. Уже при 50% просачивании сигнала и коэффициенте взаимной корреляции активных и пассивных сигналов порядка 0,9 активно-пассивная система оказывается неработоспособной. Точно так же теряются полезные свойства более сложной системы уже при 25% просачивании паразитного сигнала в каждый из двух активных пунктов. Вообще часто оказывается, что системы являются более помехоустойчивыми, нежели более сложные системы [25].



Рисунок 2.25 Оптимальный алгоритм с компенсацией (а), график корреляций (б).

Для примера рассмотрим практически полезный случай обнаружения сигнала S(t) на фоне белой по спектру и нормально-распределенной помехи y(t), корреляционной с белой же по спектру и нормальной помехой x(t) опорного канала, в который просачивается сигнал s(t). Белость по отдельности помех y(t) и x(t) позволяет считать отсчеты помех (y<sub>1</sub>,y<sub>2</sub>...) и (x<sub>1</sub>,x<sub>2</sub> ...) некоррелированными между собой, а нормальность приводит к тому, что многомерные плотности вероятности по отдельности распадаются на произведения одномерных. Однако, взаимная коррелированность помех сохраняется при совпадении индексов, и равна нулю для несовпадающих индексов. Поэтому совместная плотность вероятностей  $f(y_i, x_i) = f(y_i) \cdot f(x_i)$ ). Итак, функция правдоподобия распадается на произведение двумерных, поэтому логарифм точного (безо всяких приближений) отношения правдоподобия равен (алгоритм изображен на рисунке 2.26а):

$$\ln \Lambda = \ln \prod_{i=1}^{n} f(y_{i} - S_{i} / x_{i} - s_{i}) f^{-1}(y_{i} / x_{i}) = \sum_{i=1}^{n} \ln \left\{ \left( \sqrt{2\pi\sigma_{y}} \sqrt{1 - r^{2}} \right)^{-1} \exp \left[ -\left( 2\left(1 - r^{2}\right) \right)^{-1} \times \left( \frac{y_{i} - S_{i}}{\sigma_{y}} - \frac{r(x_{i} - s_{i})}{\sigma_{x}} \right)^{2} \right] \right\} - \sum_{i=1}^{n} \ln \left\{ \left( \sqrt{2\pi\sigma_{x}} \sqrt{1 - r^{2}} \right)^{-1} \exp \left[ -\left( 2\left(1 - r^{2}\right) \right)^{-1} \left( \frac{y_{i}}{\sigma_{y}} - \frac{rx_{i}}{\sigma_{x}} \right)^{2} \right] \right\},$$
$$\lambda = \sum_{i=1}^{n} \left( \frac{y_{i}}{\sigma_{y}} - \frac{rx_{i}}{\sigma_{x}} \right) \left( \frac{S_{i}}{\sigma_{y}} - \frac{rs_{i}}{\sigma_{x}} \right)^{2} \langle \lambda_{nop}(1 - r^{2}) + q_{\text{\tiny 6bix}}, \quad q_{\text{\tiny 6bix}} = \sum_{i=1}^{n} \left( \frac{S_{i}}{\sigma_{y}} - \frac{rs_{i}}{\sigma_{x}} \right)^{2}.$$



Рисунок 2.26 Оптимальный алгоритм обработки (а) и характеристики обработки (б)

Появление паразитного просачивания сигнала s(t) приводит к снижению опорного нормированного полезного сигнала S(t) на величину rs(t), что снижает качество обработки. Снижается также величина отношения сигнал/помеха  $q_{вых}$ . Если нормировку в активном и пассивном каналах на  $\sigma=\sigma_y=\sigma_x$  производить заранее, а коэффициент г взаимной корреляции активной y(t) и пассивной x(t) помех равен единице (r = 1), то получаем:

$$q_{GDX} = \sigma^{-2} \sum_{i=1}^{n} (S_i - s_i)^2 = \begin{cases} 2q_{GX} = \sigma^{-2} \sum_{i=1}^{n} S_i^2, & s_i = 0\\ 0, & S_i = s_i, & i = \overline{1, n}. \end{cases}$$

Итак, при  $S_i = s_i$  эффективность обнаружителя падает до нуля, т.к. сигнал  $S_i - rs_i = 0$ , и компенсация в данном конкретном случае просто не нужна. В матричной записи алгоритм обнаружения равен:

$$\lambda = (S - B_s)^T D(Y - BX), \qquad B = K_{YX} K_{XX}^{-1}, \qquad D^{-1} = K_{YY} - BK_{XY},$$
$$K_{YX} = K_{XY} = \begin{pmatrix} \sigma_Y \sigma_X r, \dots 0 \\ \dots \dots \dots \\ 0, \dots \dots \\ \sigma_Y \sigma_X r \end{pmatrix}, \qquad K_{YY} = diag \sigma_Y^2 \begin{pmatrix} \sigma_Y^2, \dots 0 \\ \dots \\ 0, \dots \\ \sigma_Y^2 \end{pmatrix}, \qquad K_{XX} = diag \sigma_X^2 \begin{pmatrix} \sigma_X^2, \dots 0 \\ \dots \\ 0, \dots \\ \sigma_X^2 \end{pmatrix}$$

Среднее значение и дисперсии случайной величины λ равны:

$$\langle \lambda_0 \rangle = 0, \quad \langle Y \rangle = \langle X \rangle = 0, \quad \langle \lambda_s \rangle = \sigma_0^2 = \sigma_s^2 = 2(1 - r^2)^2 q_{ex}, \quad q_{ebax} = 2q_{ex},$$

$$\sigma_0^2 = \langle \lambda_0^2 \rangle = \sum_{i=1}^n \left\langle \left( \frac{y_i}{\sigma_y} - \frac{rx_i}{\sigma_x} \right)^2 \right\rangle \left( \frac{S_i}{\sigma_y} - \frac{rs_i}{\sigma_x} \right)^2 = \begin{cases} (1 - r^2)^2 q_{ebax}, & i = j \\ 0, & i \neq j, \quad \langle y_i x_i \rangle = 0. \end{cases}$$

При этом отношение  $(\lambda_s)$  к новому порогу  $\lambda_{\text{пор}} (1-r^2)$  равно  $2q_{ex}(1-r^2) \rightarrow 0$  при  $r \rightarrow 1$ , т.е. прирост среднего значения убывает быстрее, чем порог. Поэтому при  $r \rightarrow 1$  и  $S_1 \rightarrow s_1$  в пределе вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения одинаковы и равны 0,5; вместо обнаружения сигнала можно подбрасывать монету и угадывать ответ. На рисунке 2.266 штрихпунктиром показана кривая обнаружения.

# 2.2.7 Вопросы программной реализации оптимальных алгоритмов

Вопросы реализации алгоритмов в той или иной мере обсуждались, например, в [19-25], вопросы нормировки, компенсации, квадратурной обработки см. выше. Однако, ряд важных моментов остались открытыми, в частности, проблема реализации оптимальных алгоритмов в виде программы для большой ЭВМ или персонального компьютера. В этом случае при моделировании возникает важный вопрос: каким образом можно создать помехи с заданными статистическими свойствами (в частности, с требуемой функцией взаимной корреляции).

1. Начнем с последнего вопроса. Рассмотрим линейную систему (рисунок 2.27), содержащую в прямых ветвях фильтр  $\Phi_{11}$  с импульсной характеристикой  $h_{11}(t)$  и фильтр  $\Phi_{22}$  с импульсной характеристикой  $h_{22}(t)$ , а в перекрестных ветвях фильтры  $\Phi_{11}$  обладают импульсными характеристиками  $h_{11}(t)$ ,  $i \neq j$ . На выходе реакции суммируются, поэтому [19]:



Рисунок 2.27 Схема формирования помех с заданными свойствами

Аналогично находится и X(t). Обозначая интеграл свертки звездочкой, имеем систему двух интегральных соотношений:

$$Y(t) = y^* h_{11} + x^* h_{22}$$
  $X(t) = y^* h_{21} + x^* h_{22}$ .

Обозначая через Н вектор-строку отсчетов импульсной характеристики h(t), и, сохраняя обозначения Y и X для вектор-строки помех, после усреднения и отыскания смешанных моментов второго порядка получим систему четырех матричных уравнений для поиска четырех неизвестных H<sub>ij</sub>, (i,j)=1,2 (звездочка малая обозначает транспонирование одновременно с комплексным сопряжением):

$$\begin{cases} \langle Y_{1}Y_{2}^{*} \rangle = (H_{11}, H_{12})K(H_{11}, H_{12})^{*} \\ \dots \\ \langle X_{1}X_{2}^{*} \rangle = (H_{22}, H_{21})K(H_{22}, H_{21})^{*}, \end{cases} \qquad K = \begin{pmatrix} K_{YY} & K_{YX} \\ K_{XY} & K_{XX} \end{pmatrix}$$

Полученная система минимальна в том смысле, что не придется искать усреднение сложных смешанных произведений типа (X<sub>i</sub>, H<sub>ij</sub>, H<sup>\*</sup><sub>ij</sub>, Y<sup>\*</sup><sub>j</sub>). Это упрощает вычисления и значительно уменьшает время счета на ЭВМ. Однако ясно, что полученная система матричных уравнений не всегда совместна даже при возбуждении фильтров на входе одним и тем же белым шумом y(t)=x(t). Несмотря на то, что подблоки матрицы корреляций диагонализируются, что упрощает вычисления, физически ясно, что при белых шумах на входе и выходе взаимный шум является обеленным только при условии, что  $h_{11}(t)=h_{22}(t)=\delta(t)$ ,  $h_{12}(t)=h_{21}(t)=0$ , т.е. когда перекрестные фильтры отсутствуют (если же и перекрестное суммирование отсутствует), то тогда все  $h_{ij}(t)=\delta(t)$ . Тем более, матричная система уравнений может оказаться несовместимой при небелых шумах  $y(t)\neq x(t)$ , или если один из них – белый шум. Заметного упрощения системы уравнений можно достичь только переходом в робласть Лапласа (или в Z-круг единичного радиуса). Переходя для конкретности к изображениям Лапласа, заменяя свертку перемножением соответствующих изображений, получаем [22]:

$$Y(p) = y(p)H_{11}(p) + x(p)H_{12}(p), \qquad X^*(p) = y^*(p)H_{21}^*(p) + x^*(p)H_{22}^*(p).$$

Тогда корреляция взаимных изображений равна:

$$\langle Y(p_1)X^*(p_2)\rangle = S_{YX}(p_1, p_2) = (H_{11}, H_{12})S(p_1, p_2)(H_{21}, H_{22})^*, \qquad S(p_1, p_2) = \begin{pmatrix} S_{YY} & S_{YX}^*\\ S_{XY}^* & S_{XX} \end{pmatrix},$$

где все функции  $H_{ij}$  зависят от  $p_1$  или  $p_2$ , а подблочные матрицы – от ( $p_1$ ,  $p_2$ ). Фактически  $S_{YX}$  ( $p_1$ ,  $p_2$ ) – есть взаимная спектральная матричная функция. Задавая ее значение в N точках плоскости ( $p_1$ ,  $p_2$ ), решаем систему 8N уравнений для отыскания неизвестных модулей и фаз четырех передаточных функций  $H_{ij}(p)$ . Это значительно проще, чем исходная матричная система для импульсных характеристик. Особые упрощения наблюдаются в том случае, когда корреляционная (или спектральная) функции факторизуются, т.е. могут быть представлены в виде произведения треугольных или (блочно-диагональных) матриц. Разработана специальная техника факторизации, и существуют стандартные подпрограммы различной мощности, на чем мы коротко остановимся (подробности см. в [19-22]).

2. Рассматриваемый вопрос имеет большее значение, чем задачи факторизации корреляционных или спектральных матриц. Даже в классической задаче (а тем более в оптимальных обнаружителях) может быть применен метод факторизации специфического вида. Дело в том, что используемые при обнаружении сигнала в корреляционном нормальном шуме матрицы корреляции К относятся к типу не только симметричных (или эрмитовых), но и теплицевых. По определению матрица Т называется теплицевой, если элементы t<sub>ij</sub> зависят от разности индексов (i–j). Теплицева матрица является частным случаем персимметричной матрицы П, симметричной относительно кроссдиагонали (что означает одинаковость и симметричность элементов относительно второй главной кроссдиагонали, идущей справо-налево и сверху-вниз). Вводя матрицу замещения 3, содержащую только единицы на кроссдиагонали (все остальные элементы равны нулю), получаем, что:

$$T = 3T^{T}3, \quad \Pi = 3\Pi^{T}3, \quad 3 = 3^{-1}, \quad 3 = \begin{pmatrix} 0, & 0, \dots & 0, & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1, & 0, \dots & 0, & 0 \end{pmatrix}.$$

Попутно заметим, что матрица H=3T является ганкелевой, и элементы ее зависят от суммы индексов (i+j), причем одинаковы все элементы в любой кодиагонали, параллельной кроссдиагонали. Ценные свойства теплицевых (ганкелевых) матриц теряются при обращении, или при произведении двух теплицевых (ганкелевых) матриц. Тем не менее, доказано, что обратная к теплицевой матрица образуется двумя слагаемыми, каждое из которых равно произведению верхних и нижних треугольных теплицевых матриц специального вида. Так как H<sup>-1</sup>=T<sup>-1</sup> 3<sup>-1</sup>= T T<sup>-1</sup>3, то по тем же правилам можно построить и H<sup>-1</sup>, умножая T<sup>-1</sup> справа на матрицу замещения. Поясним на примерах, способ обращения теплицевой матрицы имеющей практический интерес. Так, рассмотрим две аппроксимации некоторой функции корреляции r(t) – треугольную (более точную, см. рисунок 2.28 a), и прямоугольную, см. рисунок 2.286. Для конкретности будем считать площади совпадающими и равными времени корреляции  $\tau_{\kappa}$ . В первом случае теплицева матрица корреляции равна:

$$K = \begin{pmatrix} 1; & 0,5; & 0\\ 0,5; & 1; & 0,5\\ 0; & 0,5; & 1 \end{pmatrix}, \qquad K^{-1} = (\det K)^{-1} \begin{pmatrix} 0,75; & -0,5; & 0,25\\ -0,5; & 1; & -0,5\\ 0,25 & -0,5; & 0,75 \end{pmatrix}, \qquad \det K = \frac{1}{2}.$$



Рисунок 2.28 Треугольная (а) и прямоугольная (б) аппроксимации коэффициента корреляции Матрица К<sup>-1</sup> получена стандартным способом, и в данном частном случае является точно теплицевой. Рассмотрим теперь пример алгоритма без прямого обращения, см. [23]:

$$K^{-1} = a_0^{-1} \begin{pmatrix} a_0 & 0 & 0 \\ a_1 & a_0 & 0 \\ a_2 & a_1 & a_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_0 & b_1 & b_2 \\ 0 & b_0 & b_1 \\ 0 & 0_1 & a_0 \end{pmatrix} - a_0^{-1} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ b_2 & 0 & 0 \\ b_1 & b_2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & a_2 & a_1 \\ 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = a_0^{-1} A_H B_B - a_0^{-1} B'_H A'_B.$$

Первая нижняя треугольная матрица  $A_H$  имеет нулевые элементы сверху главной диагонали, которая состоит из одинаковых элементов  $a_1$ , и т.д. до исчерпания размерности матрицы  $A_H$ , совпадающей с размерностью искомой матрицы  $K^{-1}$  и исходной К. Матрица  $A_H$  умножается на верхнюю треугольную матрицу  $B_B$  с очевидной заменой переменных  $a_{ij}$  на  $b_{ji}$ . Такое «мультипликативное» представление имеет место для невыраженной матрицы, однако удается избежать обращения любой из матриц. Но именно из-за этого появляются повторные слагаемые, уничтожаемые произведением нижней треугольной матрицы  $B'_H$  на верхнюю треугольную  $A'_B$ , у которых на главных диагоналях расположены одни нули, на параллельных ближних кодиагоналях в ту (или другую) сторону расположены элементы  $b_{ij}$  (или  $a_{ji}$ ) с максимальными индексами =maxlijl, и т.д. до минимальных значений индексов, равных единице. Для отыскания неизвестных коэффициентов ( $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  ...) формируется вспомогательная неоднородная система линейных уравнений, правая часть которой равна (1, 0, 0,...), а коэффициентами являются элементы исходной матрицы К. Почти аналогично формируется система для отыскания коэффициентов  $b_{ij}$ , начиная с максимального индекса до  $b_0$ , поэтому правая часть равна (0, 0,... 1). Системы и решения таковы:

$$K = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{cases} a_0 + 0.5a_1 + 0 \cdot a_2 = 1 \\ 0.5a_0 + 1 \cdot a_1 + 0.5a_2 = 0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \qquad K = \begin{pmatrix} b_2 \\ b_1 \\ b_0 \end{pmatrix} = \begin{cases} b_2 + 0.5b_1 + 0 \cdot b_0 = 0 \\ 0.5b_2 + 1 \cdot b_1 + 0.5b_0 = 0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \qquad A_0 = \frac{3}{2}, \quad a_1 = -1, \quad a_2 = 0.5; \qquad b_2 = 0.5, \quad b_1 = -1, \quad b_0 = \frac{3}{2}. \end{cases}$$

Решения системы уравнений оказались идентичными в данном примере только в силу теплицевости и обратной матрицы К<sup>-1</sup>. Подстановкой найденных коэффициентов в треугольные матричные сомножители A<sub>H</sub>, A<sub>B</sub>, B<sub>B</sub>, B<sub>H</sub> позволяет записать коэффициент К<sup>-1</sup> в явном виде. Обратим внимание, что  $a_0 = (3/2) \neq 0$ . В противном случае треугольное мультипликативное

разложение не имело бы места, как, например, для матрицы корреляции, получаемой при прямоугольной аппроксимации r(τ):

$$K = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad \det K = -1, \quad K^{-1} = -\begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Прямое обращение приводит также к теплицевой матрице. Однако,

$$K = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \qquad \begin{cases} a_0 + a_1 + 0 = 1 \\ a_0 + a_1 + a_2 = 0 \\ 0 + a_1 + a_2 = 0 \end{cases} \qquad a_0 = 0, \qquad a_1 = 1, \qquad a_2 = -1$$

отсюда  $a_0 = 0$ , и во избежание деления на нуль пользоваться треугольным разложением для этой матрицы нецелесообразно.

3. Теперь отметим, что обращение любой матрицы потребует порядка  $n^{3}/3$  операций, где  $(n \times n)$  – размер матрицы К. Разложение на треугольные множители позволяет заменить обращение решением двух линейных систем, что в итоге потребует  $n^{3}/2$  операций. В этом суть упрощений, хотя в общем случае система уравнений может быть и нелинейной (как в методе Холецкого, или корня квадратного). В последнем случае  $K = A_H \cdot A^T_H$ , и ищутся элементы  $a_{ij}$  нижней  $A_H$  и верхней  $A_B = A^T_H$  треугольной матриц, обращение которых осуществляется гораздо быстрее:  $K^{-1} = A^T_H \cdot A^{-1}_H = = A^{-1}_B A^{-1}_H$ , причем сохраняется вид треугольности (т.е. если  $A_H$  – нижняя треугольная, то  $A^{-1}_H$  – остается по форме такой же с другими, естественно, элементами). Существенное достоинство метода Холецкого – численная устойчивость для любых неотрицательных матриц. Кроме того, время счета почти всегда наименьшее. Например, тестовая симметричная случайная матрица с элементами, равномерно распределенными на интервале (0,1), для решения на машине IBM 360/75 системы размера ( $n \times n$ ) требует времени в секундах [30], см. таблицу 2.1:

Таблица 2.1

N	25	50	100	200
Метод Холецкого (сек)	0,05	0,23	1,30	8,60
Метод Гаусса (сек)	0,05	0,33	2,43	18,71

Для малоразмерных матриц (n≤25) время счета почти везде одинаково (t≤0,05 c). С увеличением размерности в К время растет примерно в 2K<sup>2</sup>, но не все равно как минимум вдвое меньше времени счета по классическому способу Гаусса.

4. Наряду с методом Холецкого эффективным вычислительным средством является сингулярное разложение на три матричных множителя [30]. Ведь на практике вполне возможно, что корреляционные или спектральные функции могут порождать матрицы неполного ранга (ибо в расчетах с линейными фильтрами система уравнений может оказаться недоопределенной или

переопределенной с матрицей прямоугольной формы), или по другим причинам, но во всех этих случаях обратная матрица не существует. Чтобы избежать подобные затруднения, вместо несуществующей обратной матрицы H<sup>-1</sup> для системы уравнений *Y*=*HX* вводят в рассмотрение псевдообратную матрицу Мура-Пенроуза H\*, обеспечивающую минимум ошибки /*Y*-*HX*|, см. [20-21]:

$$H_{(n\times m)}^{+} = (H^{T}H)^{-1}, \qquad (H^{+})^{+} = H, \qquad (H^{T})^{+1} = (H^{+})^{T},$$

в которых перестановка матриц недопустима. Тогда сингулярное разложение имеет вид:

$$H^{+} = V \sum_{i=1}^{+} U^{T}, \qquad U^{T} = U^{-1}, \qquad V^{-1} = V, \qquad \left\| H H^{+} H - H \right\| \leq \varepsilon,$$

т.е. норма невязки меньше є; U и V унитарные (ортогональные) матрицы,  $\sum$ =diag есть в точности диагональная матрица с элементами  $\sigma_{ii}^+ = 1/\sqrt{\lambda_i}$  при  $\sigma_{ii}^+ \ge \varepsilon$ , и  $\sigma_{ii}^+ = 0$  при  $\sigma_{ii} < \varepsilon$ , где  $\lambda_i$  есть собственные значения матричного уравнения  $HH^T = H^T H$ , причем произведение  $HH^T$  является уже квадратной матрицей размера (n×n) или (m×m). Достоинства сингулярного разложения в том, что:

a) строки (или столбцы) с нулевыми собственными значениями (т.е. сингулярные значения) можно отбросить, что никак не повлияет на результаты перемножения;

б) в пакете программ любой современной ЭВМ или ПК имеются версии алгоритмов сингулярного разложения на различных алгоритмических языках; в настоящее время используются более сложные языки объектно-ориентированного программирования, однако для практических приложений часто вполне достаточно стандартного пакета программ типа MATLAB;

в) часто матрица Н\* далека от классической обратной H<sup>-1</sup>, но для квадратных матриц полного ранга процедура разложения сохраняется полностью (при этом равно нулю количество нулевых собственных чисел λ<sub>i</sub>=0, т.е. собственные числа отличны от нуля).

5. Особые упрощения при вычислениях могут наблюдаться при использовании различных дискретных преобразований (ДП). Например, прямое и обратное преобразование Фурье равны:

$$y = F_n x, \quad x = F_n^* y, \quad F_n = (f_{Km}), \quad f_{Km} = \exp\left[\frac{2\pi i}{n}(K-1)(m-1)\right], \quad n > m.$$

Элементы  $f_{Km}$  матрицы ДПФ  $F_n$  есть поворачивающие множители с единичным модулем, и являются собственными векторами симметричной унитарной матрицы  $(1/\sqrt{n})F_n$ . Любая теплицева матрица допускает разложение

$$T_{n-1} = (E_n, O)C_m(E_n, O)^T, \qquad m \ge 2n-1, \qquad E_n = \begin{pmatrix} 1, & 0, \dots & 0 & 0 \\ 0, & 0, \dots & 0 & 1 \end{pmatrix}_{(n \times n)},$$

где С<sub>т</sub> есть циркулянтная (циклическая) матрица с первым столбцом

 $(C_0 \ , \ C_1 \ \ldots \ \ C_{n\text{--}1}, \ \ 0 \ \ldots \ 0, \ C_{\text{--}n\text{--}1}, \ \ldots, \ C_{\text{--}1} \ )^T \ ,$ 

задающим всю структуру матрицы  $C_m$ , т.к. у циклической матрицы строчные элементы  $C_{j-1}$  равны столбцовым элементам  $C_{n+1}$ ,  $j \ge 1$ . Циркулянтная (циклическая) матрица  $C_m$  сдвигает столбцовые координаты вверх на одну позицию (а  $C_m^+$  - вниз), и геометрически описывает вращение правильного выпуклого многогранника, координаты вершин которого образуют матрицы перестановок. Полезным примером являются циркулянты:



где на свободных местах стоят нули. Ясно, что К-ая степень циркулянта Ц<sup>к</sup> сдвигает единицу в первой строке на (К-1) позиций вправо. Важно, что сумма, произведение и обращение сохраняют циркулянтность исходных циркулянтов. Если известны собственные числа λ<sub>i</sub>, матрицы C<sub>K</sub>, то имеет место треугольное разложение:

$$C_{n} = F_{n}D(\lambda_{K})F_{n}^{*}, \qquad D(\lambda_{K}) = F_{n}^{*}C_{n}DF_{n}, \qquad C_{n} = \begin{pmatrix} C_{0}, & C_{n-1}, \dots & C_{2}, & C_{1} \\ C_{1}, & C_{0}, \dots & C_{3}, & C_{2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{n-1}, & C_{n-2}, & C_{1}, & C_{0} \end{pmatrix},$$

где  $D=diag(\lambda_0 \dots \lambda_{n-1})$ . Если собственное число одно, то матрица  $C_n$  называется примитивной. Если же собственных чисел больше одного, то матрица  $C_n$  называется импримитивной. При этом существует матрица П перестановок такая, что останется только n ненулевых блоков в матрице  $\Pi C_n \Pi^T$ . В частности, может быть  $\Pi = \mathcal{U}_n$ . Чаще всего отыскание собственных чисел является крупной проблемой, решаемой только итеративными методами, [30].

6. Вернемся к рассмотрению классических обнаружителей [30]. Используя сначала метод Холецкого, при отсутствии пассивных пунктов имеем алгоритм оптимального обнаружения равен:

$$\lambda = S^{T} K^{-1} X = S^{T} (A_{H} A_{B})^{-1} X = S^{T} A_{B}^{-1} A_{H}^{-1} X = (A_{H}^{-1} S)^{T} E (A_{H}^{-1} X),$$

где E – единичная матрица E=diag(1,1,...1). Из такой симметричной записи сразу ясно, что  $A^{-1}_{H}$  есть алгоритм обеления коррелированной помехи X линейным фильтром, отчеты импульсной характеристики которого заполняют нижнюю треугольную матрицу  $A_{H}^{-1}$ , и сложно (и нелинейно) зависят от всех коэффициентов корреляции исходной матрицы. При этом искажается и сигнал, т.к. имеем  $A^{-1}_{H}S$ . Пример:

$$K = A_{H}A_{B} = \begin{pmatrix} a_{1} & 0 \\ a_{2} & a_{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{1} & a_{2} \\ 0 & a_{3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{1}^{2} & a_{1}a_{2} \\ a_{1}a_{2} & a_{2}^{2} + a_{3}^{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{1} & K_{2} \\ K_{3} & K_{4} \end{pmatrix},$$

$$\det K = K_1 K_4 - K_2 K_3 = a_1^2 \left(a_2^2 + a_3^2\right) - (a_1 a_2)^2, \quad K_1 = a_1^2, \quad K_2 = K_3 = a_1 a_2, \quad K_4 = a_2^2 + a_3^2,$$
$$K^{-1} = \left(\det K\right)^{-1} \begin{pmatrix} K_4 & -K_2 \\ -K_3 & K_1 \end{pmatrix} = \left(\det K\right)^{-1} \begin{pmatrix} a_2^2 + a_3^2 & -a_1 a_2 \\ -a_1 a_2 & a_1^2 \end{pmatrix};$$
$$a_1 = \sqrt{K_1}, \qquad a_2 = \frac{K_2}{\sqrt{K_1}} = \frac{K_3}{\sqrt{K_1}}, \qquad a_3 = \sqrt{K_4 - K_2^2 K_1^{-1}}, \quad A_H^{-1} \begin{pmatrix} a_1^{-1}, & 0 \\ -\frac{a_2}{a_1 a_3}, & a_3^{-1} \end{pmatrix} = A_B^{-T},$$
$$K^{-1} = A_B^{-1} A_B^{-1} = \left(a_1 a_3\right)^{-2} \begin{pmatrix} a_2^2 + a_3^2 & -a_1 a_2 \\ -a_1 a_2 & a_1^2 \end{pmatrix}, \qquad A_H^{-1} X = A_H^{-1} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1^{-1} x_1 \\ -\frac{a_2 x_1}{a_1 a_3} + a_3^{-1} x_2 \end{pmatrix}.$$

Обеленный шум имеет вид *A*<sup>-1</sup><sub>*H*</sub>*X*, и всегда дельта-коррелирован, т.к. при любой размерности матриц имеем:

$$\left\langle \left(A_{H}^{-1}X\right)\left(A_{H}^{-1}X\right)^{T}\right\rangle = A_{H}^{-1}KA_{H}^{-T} = A_{H}^{-1}A_{H}A_{B}A_{H}^{-T} = A_{B}A_{H}^{-T} = A_{B}A_{B}^{-1} = E$$

Получаем обеляющий фильтр трансверсального типа в силу конечности импульсной характеристики. Особенность фильтра – в его нестационарности, т.к. для первого отсчета х<sub>1</sub> нормирующий множитель равен  $a_1 = K_1^{+1/2}$ , а для второго отсчета (через время задержки T) масштабный коэффициент равен:  $a_3 = \sqrt{K_1K_4 - K_2^2}/\sqrt{K_1}$ . Если же пренебречь переходным процессом (т.е.  $x_1/a_1$ ), то можно оставить в схеме ОФ один масштабируемый усилитель  $a^{-1}_3$  с изменением веса после задержки на ( $-a_2/a_1$ ). Намеченную процедуру несложно обобщить на случай произвольной размерности п матрицы корреляций, и построить схему обеляющего трансверсального фильтра (n-1) порядка с таким же числом элементов задержки.

7. Если же по каким-либо причинам (например, из-за нестационарности) предварительная нормировка нежелательна, то можно воспользоваться более сложным методом факторизации матрицы корреляций путем разложения на три матричных множителя К=A<sub>H</sub>DA<sub>B</sub>, где A<sub>H</sub> и A<sub>B</sub> остаются нижней и верхней треугольными матрицами с единицами по главным диагоналям, а D=diag(d<sub>11</sub>, ...d<sub>nn</sub>) есть диагональная матрица. Тогда алгоритм обработки имеет вид [19]:

$$\lambda = S^{T}K^{-1}X = S^{T}A_{B}^{-1}D^{-1}A_{H}^{-1}X = (A_{B}^{-1}S)^{T}D^{-1}(A_{H}^{-1}X), \qquad D^{-1} = diag(d_{11}^{-1},...,d_{nn}^{-1})$$

Обеляющий фильтр *А*<sup>-1</sup><sub>*H*</sub> является нестационарным, и хотя выходной шум является дельтакоррелированным:

$$\left\langle \left(A_{H}^{-1}X\right)\left(A_{H}^{-1}X\right)^{T}\right\rangle = A_{H}^{-1}KA_{H}^{-T} = A_{H}^{-1}A_{H}DA_{B}A_{B}^{-1} = D,$$

но дисперсия отсчетов выходного шума резная, и равна d<sub>n</sub>. Естественно, легко перейти от трех множителей к двум нелинейным по формуле Холецкого (хотя алгоритмы будут более громоздкими):

$$D = D_{H}D_{H} = diag(\sqrt{d_{11}}, ...\sqrt{d_{nn}})diag(\sqrt{d_{11}}, ...\sqrt{d_{nn}}), \quad D_{H} = D_{B},$$
  
$$K = A_{H}DA_{B} = A_{H}D_{H}D_{B}A_{B} = U_{H}U_{B}, \qquad U_{H} = A_{H}D_{H}, \qquad U_{B} = D_{B}A_{B} = U_{H}^{T}$$

# Выводы

В разделе 2.2 были кратко приведены сведения по теории оптимального приема и проведены расчеты алгоритмов помехоустойчивого выделения сигналов ГЭР из помех (см. раздел 2.2.2 и рисунки 2.14 - 2.16). Использование в [19] алгоритма весового отбеливания помехи заставило авторов отчета подробнее рассмотреть вопросы отбеливания помех и сравнить их с алгоритмами оптимальной обработки сигналов (рисунки 2.17-2.19). Анализ алгоритмов отбеливания помех по сравнению с алгоритмами оптимальной обработки сигналов проигрывают алгоритмам оптимальной обработки. К такому же выводу приводит анализ алгоритмов подавления помехи на базе квадратурных компенсаторов.

3 Разработка методики проведения и обработки, включая программное обеспечение, профильного магнитотеллурического мониторинга на примере миниполигона Кентор

3.1 Развитие метолики обработки временных вариаций И анализа рядов электромагнитных параметров В широком частотном диапазоне результатам по 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 [13,14,31,32]. Именно с этой целью проводились исследования характеристик вариаций геофизических полей на миниполигоне Кентор силами Научной станции РАН в 2014-2016 году на основе профильных электромагнитных зондирований, обработанных с помощью методики азимутального магнитотеллурического мониторинга. На территории миниполигона существует сеть светодальномерных наблюдений, которая состоит из шести пунктов, с основной направленностью на изучение деформационных процессов в зоне Шамси-Тюндюкского разлома. Сеть пунктов профильного МТ-мониторинга на территории миниполигона Кентор, состоит из трёх профилей (см. рисунок 3.1), которые заложены в различных геоэлектрических условиях.





Пункт «0» на профиле Таш Башат 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 Таш Башат расположен на неоген-четвертичных отложениях Чуйской впадины.

Уровень кажущегося сопротивления в верхней части разреза для пункта «0» на профиле Таш Башат 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 [33]. На рисунке 3.2 показаны кривые кажущегося сопротивления с пункта «0» на профиле Таш Башат.



Рисунок 3.2 – Кривые кажущегося сопротивления с пункта «0» на профиле Таш Башат. Синим цветом показана продольная кривая, красным - поперечная

Особое внимание уделялось поведению частотно-временных рядов вариаций МТпараметров 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 [34]. 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 2016 году был продолжен анализ частотно-временных рядов данных МТ-мониторинга на режимных 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, полученный по результатам профильного магнитотеллурического мониторинга за 2014-2016 гг., обработанный по различным методикам.

Длительность краткосрочных записей в пунктах МТ-мониторинга, расположенных в Центральном Тянь-Шане, как правило, составляет 1-3 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 МТреализаций 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. зондирований значительно больше, что обеспечивает мониторинг Глубинность таких электропроводности в интервале глубин корового проводящего слоя (30-55 км). Эти частотновременные ряды являются долгосрочными, и их длительность в НС РАН составляет более 13 лет.

Особенностью азимутального МТ-мониторинга является возможность представления вариаций электромагнитных параметров среды в виде частотно-временных рядов по азимутам от  $0^{0}$  до  $180^{0}$ . При этом, на одном рисунке отображается информация о зависимости амплитуды вариаций ЭМ-параметров как от периода и азимута, так и от времени [13,14]. В настоящем отчете показан способ представления результатов МТ-мониторинга в виде корреляционных полярных диаграмм,

отражающих взаимосвязь компонент гравитационных приливных воздействий и вариаций электромагнитных параметров. Особое внимание уделялось поведению векторов Визе и дополнительных импедансов. На профиле Таш Башат выбраны три пункта 0, 4, 16 в качестве режимных, где измерения проводятся с регулярностью 2-3 раза в год. В качестве примера рассмотрим пункт 0 (рис.3.5), где приведена геологическая карта, на которой красной точкой показан пункт наблюдения и корреляционная полярная диаграмма, которая отражает распределение коэффициента корреляции вертикальной компоненты приливных воздействий (An) И индукционными стрелками (векторами Визе). Коэффициент корреляции (красный цвет на диаграмме) соответствует простиранию разломной структуры, расположенной вблизи пункта наблюдения 0. Несмотря на невысокие значения коэффициента корреляции, на полярных диаграммах они распределены закономерно (кластерно).



Рисунок 3.5 - 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 An) в полярных координатах, где по оси радиусов показан √Г (Т-период). Цвет и изолинии показывают значения коэффициента корреляции.

На этом же профиле пункт 5 (рис. 3.6) используется как контрольный, где выполняются поверки аппаратуры Phoenix перед началом полевого сезона.



Рисунок 3.6 - Панель слева – фрагмент геологической карты вблизи расположения режимного пункта МТ-мониторинга Кентор (5); панель справа - распределение коэффициента корреляции (вещественная часть дополнительного импеданса (Re<sub>xx</sub>) и вертикальная компонента приливных воздействий An) в полярных координатах, где по оси радиусов показан √T (T-период). Цвет и изолинии показывают значения коэффициента корреляции.

Для этого пункта наблюдения также были построены корреляционные полярные диаграммы для различных электромагнитных параметров. В качестве примера приведена диаграмма, показывающая распределение коэффициента корреляции между вещественной частью дополнительного импеданса и вертикальной компоненты приливных воздействий An. Этот пункт зондирования характеризуется очень высокими коэффициентами корреляции (до 0,9), что говорит об его очень хорошей тензочувствительности. Ввиду того, что миниполигон Кентор, на котором расположен этот пункт наблюдения, находится в непосредственной близости от Научной станции, пункт 5 является очень перспективным для мониторинговых наблюдений.

# **3.2** Разработка программного обеспечения профильного магнитотеллурического мониторинга (на примере миниполигона Кентор)

Геофизический мониторинг земной коры представляет собой систему целенаправленных регулярных наблюдений за геологическими объектами, основная задача которого заключается в получении объективной информации о состоянии тех или иных геологических объектов в конкретный момент времени и о динамике их параметров. Требования, предъявляемые к системе геофизического мониторинга, осуществляемого Научной станцией РАН и предназначенного для слежения за геодинамическими процессами и связанными с ними изменениями физических свойств земной коры, определяются условиями сбора и обработки информации в режиме реального времени, а также необходимостью незамедлительной реакции на аномальное поведение наблюдаемого параметра. При этом предполагается, что обработка полученной информации быть завершена К моменту следующего опроса информационных должна каналов магнитотеллурических станций. Поэтому кроме требований к точности и надежности регистрации геофизических необходимо разработать полей такое программное обеспечение магнитотеллурического мониторинга, которое позволит обеспечить повышение эффективности системы мониторинга и прогнозирования в целом. Разработка программного обеспечения, представленная в настоящем отчете, в первую очередь предназначена для визуализации результатов профильного магнитотеллурического мониторинга и повышения его эффективности.

Для работы и анализа данных магнитотеллурического мониторинга (МТ-мониторинга) разработано сервисное программное обеспечение. Написание программного кода осуществлялось в интегрированной среде Microsoft Visual Studio 2010 на объектно-ориентированном языке программирования С#, используемая версия программной платформы – .NET Framework 4.

При проектировании интерфейса программы использовались стандартные элементы управления Microsoft Visual Studio 2010, которые позволили разработать графический интерфейс: программа работает в интерактивном режиме, то есть пользователь вручную (через диалоговые окна) может выбирать файлы с исходными данными, необходимыми для дальнейшей работы, просматривать содержимое выбранных файлов, выполнять и отслеживать некоторые дополнительные расчеты с использованием исходных данных.

Так как при исследовании магнитотеллурических данных принято анализировать зависимость от периода (частоты) магнитотеллурических функций, то в программе осуществляется расчет значений этих функций и их графиков в зависимости от параметра T – периода. Для функций, определяемых в пространстве комплексных величин построение графиков зависимости от T выполняется покомпонентно: отдельно для действительной части Re, отдельно для мнимой части Im.

При выполнении расчетов значений компонент тензора импеданса и для построения их азимутальных кривых (*а* – азимут) используются формулы [8]:

$$Z_{xx}^{\alpha}(T) = Z_{xx}\cos^{2}\alpha + Z_{yy}\sin^{2}\alpha + (Z_{xy} + Z_{yx})\sin\alpha\cos\alpha, \qquad (3.1)$$

$$Z_{xy}^{\alpha}(T) = Z_{xy}\cos^{2}\alpha - Z_{yx}\sin^{2}\alpha - (Z_{xx} - Z_{yy})\sin\alpha\cos\alpha, \qquad (3.2)$$

$$Z_{yx}^{\alpha}(T) = Z_{yx} \cos^2 \alpha - Z_{xy} \sin^2 \alpha - (Z_{xx} - Z_{yy}) \sin \alpha \cos \alpha , \qquad (3.3)$$

$$Z_{yy}^{\alpha}(T) = Z_{yy}\cos^{2}\alpha + Z_{xx}\sin^{2}\alpha - (Z_{xy} + Z_{yx})\sin\alpha\cos\alpha. \qquad (3.4)$$

Формула (3.5) используется для построения кривых кажущегося сопротивления:

$$\rho_m(T) = \frac{T \left| Z_m(T) \right|^2}{2\pi\mu_0}, m = xx, xy, yx, yy, \qquad (3.5)$$

а формула (3.6) – для построения соответствующих азимутальных кривых:

$$\rho_m^{\alpha}(T) = \frac{T \left| Z_m^{\alpha}(T) \right|^2}{2\pi\mu_0}, m = xx, xy, yx, yy.$$
(3.6)

Графики фаз различных компонент тензора импеданса, а также азимутальные кривые фаз строились по значениям фаз соответствующих комплексных компонент тензора импеданса:

$$\varphi_m(T) = Arg\left(Z_m(T)\right),\tag{3.7}$$

$$\varphi_m^{\alpha}(T) = Arg\left(Z_m^{\alpha}(T)\right). \tag{3.8}$$

Расчет и построение графика средних значений по всем сессиям для различных магнитотеллурических параметров (МТ-параметров) осуществляется по формуле:

$$F_{avrg}(T) = \frac{\sum_{i=1}^{n} F_i(T)}{n},$$
(3.9)

где  $F_{avrg}$  – искомая функция средних значений,  $F_i$  – соответствующая функция по данным i – той сессии,  $i = \overline{1, n}$ , n – количество сессий.

Расчет значений для построения графика функции вариации (отклонения от соответствующих средних значений) различных МТ-параметров выполняется по формуле:

$$F_{\text{var}}(T)\Big|_{i} = F_{i}(T) - F_{avrg}(T),$$
 (3.10)

где  $F_{var}|_{i}$  – искомая функция вариации,  $F_{i}$  – соответствующая функция по данным *i*-той сессии,  $i = \overline{1, n}$ , n – количество сессий,  $F_{avrg}$  – функция средних значений.

Значения азимутальных средних вычисляются по формуле:

$$F_{avrg}^{\alpha}(T) = \frac{\sum_{i=1}^{n} F_{i}^{\alpha}(T)}{n},$$
(3.11)

где  $\alpha$  - азимут,  $F_{avrg}^{\alpha}$  – искомая функция азимутальных средних значений,  $F_i^{\alpha}$  – азимутальная кривая соответствующего МТ-параметра по данным i – той сессии,  $i = \overline{1, n}$ , n – количество сессий.

Расчет значений, по которым для каждого фиксированного азимута выполняется построение азимутальных кривых вариаций различных МТ-параметров, осуществляется по формуле:

$$\left. F_{\text{var}}^{\alpha}(T) \right|_{i} = F_{i}^{\alpha}(T) - F_{avrg}^{\alpha}(T), \qquad (3.12)$$

где  $F_{var}^{\alpha}(T)\Big|_{i}$  – искомая функция вариации азимутальных кривых,  $F_{i}^{\alpha}$  – азимутальная кривая соответствующего МТ-параметра по данным *i* – той сессии, *i* =  $\overline{1, n}$ , *n* – количество сессий,  $F_{avrg}^{\alpha}$  – функция азимутальных средних значений.

Далее кратко представим основные возможности разработанной программы на примере магнитотеллурических данных по профилю «Центральный» миниполигона Кентор (центральная часть Бишкекского геодинамического полигона).

Программа может работать в двух режимах, причем пользователь сам выбирает нужный режим в меню стартового рабочего окна (Рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 – Стартовое рабочее окно программы. Выбор режима работы с данными МТмониторинга

• Режим 1. Анализ данных по одной точке профиля.

В программу загружаются файлы с данными МТ-мониторинга по всем необходимым сессиям (в процессе работы программы сессии автоматически располагаются в хронологическом порядке от первой к последней) для одной конкретной точки профиля (Рисунок 3.9).

ция о edi-файлах	
ество временных точек для анализа 5 🚊	
ентор\10 2016\CENTR\01.xlsx Обзор	
збрать	
анные файлы	
D:\1\Kentop\052014\C\01xlsx	
D:\1\Кентор\05 2015\C\01.xlsx D:\1\Кентор\05 2016\central\01.xlsx	
D:\1\Кентор\07.2014\C\01.xlsx	
D. (TREATOR TO CONTRACT AND A	
Изменить список Ок	

Рисунок 3.8 – Выбор файлов с МТ-данными, режим 1. Пункт наблюдения №1, сессий: 5

После чего у пользователя появляется возможность работать во вкладке «Исходные данные»: для каждой из сессий просматривать таблицы с исходными данными полевых наблюдений для разных МТ-параметров во вкладке «Таблица исходных данных» (Рисунок 3), а также просматривать их графики во вкладке «Функции» (Рисунок 3.9).

Информация о н	б-файлах Иско	EH-HARD BAR-HARD	Средние велика	ины Графики от	времени													
05 2014 07 2014	05.2015 05.201	6 10.2016																
Тэблица исходи	ыхданных фу-	excapse																
FREQ	ZROT	ZXXR	Z)00	200_VAR	ZNYR	ZXM	ZXY_VAR	ZYXR	ZYXI	ZYX_WAR	ZYYR	2991	ZYYY_VAR	FIHOROT	RHOXY	RH0XY_ERR	FIH0YX	RHO
<ul> <li>20.9</li> </ul>	0	7,57	17,05	6.678	308,4	281	23,03	-493,4	-508,8	3857	55,25	-20,65	1439	0	118.9	1,723	118,9	636.5
251,2	0	6,57	15,64	6.192	207.9	265,7	57,64	-447,1	475.2	3479	51,47	-14,71	2788	0	122.2	3,616	122.2	751,2
215.4	0	5.69	14.35	3.979	268.8	251.2	35.62	-405	-442.6	2130	47.61	-9.496	917.2	0	125.6	2.34	125.5	537.2
184,5	0	4,927	13,17	6.356	250.8	237,4	14,51	-365,4	-411,1	421,9	43,64	-4,966	100,6	0	129,1	1,501	129,1	63,5
158,5	0	4,279	12.08	5.199	233,7	224,4	6,808	-330,3	-380.9	504	39,57	-1,146	93,34	0	132,4	1,108	132,4	123,5
135.9	0	3,74	11,1	2.689	217,3	211,9	5,198	-296,1	351,9	490,9	35,41	1,954	60.51	0	135,5	1,015	135.5	154,9
116.6	0	3,299	10,21	2.24	201,6	199.8	20.5	263.0	324,1	002,3	31,22	4,35	70	0	130.2	3,083	138,2	126.7
100	0	2.94	9.416	11.22	186.3	188.3	34.76	-232.7	-297.4	1004	27.12	6.058	47.43	0	140.3	6.858	140.3	249.8
85.77	0	2,649	8,712	3.699	171,4	177,1	20,01	-203,9	-271,8	312	23,2	7,249	24,84	0	141,7	4,82	141,7	79,46
73,55	0	2,429	8,079	1,265	157,1	165,4	7,171	-177,8	247.6	275,9	19,55	7,932	23,82	0	142,3	2,35	142,3	122,7
63.1	0	2,21	7,501	0.9522	143.3	155	2,157	-154,8	224,7	421	16,25	5,244	24.24	0	542,2	1,041	142,2	210,1
64,12	0	2,043	6,962	0.6691	130,1	145.9	3,392	-134,9	-203,4	111,4	13.31	8,284	22.05	0	141.3	1,264	143,3	43,77
46.42	0	1.9	6,454	0.8429	117,7	136,2	6,307	-117,9	-183.9	73.68	10.75	8.136	37,69	0	139.6	1,797	139.6	57.5
39.81	0	1,775	5,967	0.9956	106.2	125.8	1,384	-103.5	-166	71,36	8.55	7,862	19,67	0	137.4	0,9064	137,6	47,36
34,15	0	1,665	5,499	0.3058	95.4	117,8	0,2372	-91.29	-149.7	56.57	6.7	7,498	12.54	D	134.6	0.3446	134,6	45,41
29,29	0	1,566	5,946	0.1191	85.52	109,3	0.544	-80.95	-105,1	44,69	5.175	7,08	10,78	0	131.5	0,9009	131,5	45,5
25.12	0	1,478	4,606	0.07465	76.52	101,1	2,524	-72.25	-121,9	36,13	3,945	6.638	8.528	0	128	1,369	128	44,15
21,54	0	1,397	4,179	0.08642	68,36	93.34	2,796	-64.95	-110,2	24,51	2.965	6.203	7,319	0	124,3	1,855	124,3	31.83
18,48	0	1,322	3,766	0.2763	61	86,01	0,5381	58.81	99,61	25,72	2.193	5,793	7,715	0	120,3	0,8712	120.3	10,53
15,85	0	1,252	3.37	0.3525	54,38	79.09	0.9124	-53.63	90.2	56,13	1.584	5,421	2,803	0	116.3	1,199	116.3	13,16
13.59	0	1,187	2,992	0.6325	48,46	72,57	0,1131	-49.2	-01,05	27,66	1.050	5,09	0.8013	0	112	0.3851	112	29,41
11.66	0	1.128	2.636	0.2073	43.16	56.43	0.9432	-4535	-74.42	13.88	0.705	4.796	1,163	Û	102,7	1.577	107.7	25.28
10	0	1,076	2,308	0.1227	38,44	50.66	1,117	-41.94	-67,74	5,677	0.3826	4.533	0,9821	0	103,1	2,372	103,1	8,343
8,577	0	1,032	2,008	0.0801	34,24	55.26	0,4681	-38,85	-61,71	5,513	0.1134	4,296	2,113	0	\$8.55	1,266	98,55	10,3
7,356	0	0,9941	1,74	0.0634	30,51	50.24	0,7293	35.97	-56,25	3,765	-0,1184	4,077	1,318	0	93,91	1,37	93,91	9.876
6.31	Ċ.	6,9629	1,501	0.1749	27,18	45.50	0,9619	-33.26	-51,29	1,239	-0.3215	3.87	0,9609	0	89,28	1,23	85.28	4.157
5,412	0	0,9373	1,292	0.2711	24.23	41.29	0.1127	-30.68	-46,77	0.9652	-0,4981	3.67	1.022	0	84,71	0.5476	84,71	2.552
4,642	0	0.9163	1,111	0.01328	21,59	37.37	0,1961	-28.22	-42,63	1,235	-0.6497	3.473	0.2696	0	60.25	0,6324	80.23	5946
3,981	0	0.8984	0.9537	0.008753	19.25	33.8	0.1355	25.85	-38.83	0.8138	-0.7903	3.279	0.2618	0	76.02	0,7101	76.02	3.706
3,415	0	0.8827	0,8186	0.01244	17,15	30.57	0,1092	-23.59	-35.32	0,9799	-0,8946	3.059	0.09955	0	71,95	0,6551	71,96	3.625
2,929	0	0,0689	0,7034	0.0234	16,27	27.64	0,08326	-21.44	-32,09	0.9541	-0,9903	2,903	0.02902	0	68,1	0,696	60,1	2,967
2,512	0	0.8571	0.6059	0.01545	13.57	25	0.07252	-19.41	-29.1	0.626	-1.099	2,721	0.1851	0	64.42	0,5765	64,42	2619
2,154	0	0,6478	0.5242	0.006432	12,04	22.61	0.08091	-17.54	26,34	0,403	-1,199	2.54	0,4549	0	60.9	0.6549	60.9	2.266
1.848	0	0.8413	0.4563	0.01039	10.65	20.44	0.08992	-15.82	23.81	0.3533	-1.303	2.358	0.4872	0	57.5	0.7391	57.5	2.049
1,585	0	0.8384	0,4009	0.03863	5,377	18.48	0,1934	-14.27	21,49	0,2619	-1,41	2,17	0.5254	Ó	54,2	1,475	54.2	1,918
1,359	0	0,8393	0,3565	0.0652	8,216	16.7	0,264	-12.91	-19,39	0,2035	-1,614	1,973	0.3584	0	60.95	1,943	60.95	1989
1,365	0	0,0443	0.3223	0.01022	7,16	15.07	0,02012	-11.72	-12.49	0,2995	-1,61	1,766	0,03913	0	47,74	2,263	47,74	2,591
1	0	0.8529	0,297	0.01325	6,296	13.58	0,01696	+10.7	-15,79	0,5063	-1,691	1,55	0.05563	0	44,69	0,2405	44,59	4.524
0.8577	0	0.8642	0.28	0.008142	5,351	12.22	0.01041	-9.838	-14,23	0.5363	-1,749	1,329	0.08334	0	41,5	0,1583	41,5	4 745
0.7356	0	0.0775	0.2702	0.009232	4,531	10.97	0,01162	9,115	12.94	0,7001	-1,79	1,103	0,1574	0	38,47	0.2355	30,47	6.724
(A 454	12		0.0010	In entrees		10000				4.4334			la crea		100.00			

Рисунок 3.9 – Таблица с МТ-данными по первой сессии.

Вкладка «Функции» состоит из двенадцати разделов, каждый из которых соответствует одной из исследуемых магнитотеллурических функций (компоненты тензора импеданса:  $Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}$ ; кажущиеся сопротивления; фазы компонент тензора импеданса:  $\varphi_{xx}, \varphi_{xy}, \varphi_{yy}, \varphi_{yy}$ ). Каждый раздел, в свою очередь, делится на шесть блоков:

- График функции выбранного параметра, построенный по исходным данным, и график функции, построенный по средним значениям параметра по всем сессиям (используется формула (3.9); Рисунок 3.10-1);
- Графики азимутальных кривых (используются формулы (3.1) (3.8) соответственно; Рисунок 3.10-2);
- График функции вариации (используется формула (3.10); Рисунок 3.10-3);
- Графики кривых азимутальных средних (используется формула (3.11); Рисунок 3.10-4);
- Графики вариаций азимутальных кривых (используется формула (3.12); Рисунок 3.10-5);
- Таблица со значениями азимутальных кривых (используются формулы (3.1) (3.8) соответственно; Рисунок 3.10-6);



Рисунок 3.10 – Вид вкладки «Функции». Режим анализа данных по одной точке профиля

Далее пользователь может перейти к работе во вкладке «Графики от времени». Эта вкладка ориентирована на визуализацию динамики (зависимости от времени) какого-либо МТ-параметра: для выбранной точки на фиксированной частоте формируются временные зависимости (по всем сессиям) Здесь отрисовка осуществляется так же, как и во вкладке «Функции»: присутствуют

первые пять из описанных выше блоков. При этом пользователь может самостоятельно задавать следующие параметры отрисовки:

- магнитотеллурический параметр (Рисунок 3.11-а);
- частота/период (Рисунок 3.11-б);
- азимут (Рисунок 3.11-в).



Рисунок 3.11 – Задание параметров отрисовки временных зависимостей.

• Режим 2. Анализ данных по профилю

В программу загружаются файлы с данными МТ-мониторинга по одной сессия для всех точек профиля (Рисунок 3.12).

🖳 Анализ данных по профилю		23
Исходные файлы		
Количество точек профиля		
Папка с фалами по профилю		
D:\1\Кентор\102016\CENTR 06	зор	
Файлы, содержащиеся в выбранной папке		
1. D:\1\Кентор\10 2016\CENTR\01.xlsx 2. D:\1\Кентор\10 2016\CENTR\02.xlsx 3. D:\1\Кентор\10 2016\CENTR\03.xlsx 4. D:\1\Кентор\10 2016\CENTR\04.xlsx 5. D:\1\Кентор\10 2016\CENTR\05.xlsx 6. D:\1\Кентор\10 2016\CENTR\06.xlsx 7. D:\1\Кентор\10 2016\CENTR\07.xlsx 8. D:\1\Кентор\10 2016\CENTR\08.xlsx 9. D:\1\Кентор\10 2016\CENTR\09.xlsx 10. D:\1\Кентор\10 2016\CENTR\10.xlsx 11. D:\1\Кентор\10 2016\CENTR\11.xlsx		
Выбрать другую папку	Ок	

Рисунок 3.12 – Выбор файлов с МТ-данными, режим анализа данных для одной сессии по всем точкам профиля. Профиль с 11-ю пунктами наблюдений

При данному режиме работы программы вкладка «Исходные данные» функционирует аналогично, отличается лишь тем, что количество разделов для данного режима определяется числом пунктов наблюдения по исследуемому профилю. Для каждой точки профиля имеется таблица с исходными МТ-данными, а также соответствующие шесть блоков с графиками и таблицами (Рисунок 3.13).



Рисунок 3.13 – Вид вкладки «Функции». Режим анализа данных по всем точкам профиля

Вкладка «Вид по профилю», аналогична вкладке «Графики от времени» при работе программы в режиме 1, и включает отрисовку по пяти описанным выше блокам. Пользователь также может самостоятельно задавать параметры отрисовки: магнитотеллурический параметр, частота/период, азимут. Следующая вкладка предназначена для отслеживания изменений выбранного МТ-параметра вдоль всего профиля при фиксированной частоте (период) и азимуте (рисунок 3.14).



Рисунок 3.14 – Вкладка «Вид по профилю». Режим анализа данных по всем точкам профиля

На рисунке 3.15 представлен алгоритм работы пользователя в программе.



Рисунок 3.15 – Алгоритм работы пользователя в программе

Разработка и совершенствование программно-алгоритмических средств, предназначенных для интерпретации и визуализации результатов магнитотеллурических зондирований, позволяют более эффективно анализировать данные электромагнитного мониторинга и оценивать вариации электромагнитных параметров и их взаимосвязь с изменением характеристик напряженнодеформированного состояния геологической среды.

#### Выводы:

Для повышения эффективности системы мониторинга и прогнозирования в целом была выполнена разработка программного обеспечения, представленная в настоящем отчете, в первую очередь предназначена для расчета электромагнитных параметров и визуализации результатов профильного магнитотеллурического мониторинга. В OCHOBY разработки методического обеспечения системы обработки И анализа материалов широкодиапазонного магнитотеллурического мониторинга был положен всесторонний анализ частотно-временных рядов всех электромагнитных параметров.

Развитие методики обработки и анализа временных рядов вариаций электромагнитных параметров в широком частотном диапазоне по результатам непрерывных магнитотеллурических наблюдений осуществлялось на основе анализа результатов электромагнитных зондирований, полученных стационарных пунктах МТ-мониторинга Ак-Суу и Чон-Курчак, а также при проведении профильных и режимных магнитотеллурических зондирований. В результате получены более точные и надежные количественные оценки кажущегося сопротивления и других электромагнитных параметров в наиболее чувствительных к изменениям интервалах глубин геоэлектрических разрезов.

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 (Ro, ф, ReZxy, ImZxy, ReZxx, ImZxx, 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 Накопление материалов экспериментального изучения динамики электромагнитных параметров в широком частотном диапазоне

4.1 Дополнение базы данных временных рядов вариаций электромагнитных параметров новыми результатами мониторинговых магнитотеллурических наблюдений за период 01.01.2016 по 31.12.16 г.

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, данные в существующую подгружать новые 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 – Нх, Ну, Нz, и двух взаимно перпендикулярных измерительных линий (диполей), длиной 50 м, являющихся датчиками электрического поля Ex и Ey. Использовалась стационарная электродная система - специальные неполяризующиеся электроды, состоящие из угольного стержня, помещенного в спрессованный порошок марганцево-угольной смеси [3], 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 2016 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 Таш Башат 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 Таш Башат 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 2016 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 2016 году на стационарных мониторинговых пунктах Аксуу и Чон-Курчак, данными режимных наблюдений миниполигона Кентор, а также результатами профильных магнитотеллурических наблюдений.

# 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 северной части Киргизского Тянь-Шаня - Байтикской впадине. Построена двумерная геоэлектрическая модель литосферы Тянь-Шаня вдоль профиля Таш Башат на основе исследований вариаций естественного электромагнитного поля Земли. Определены геометрические и областей пониженного электрические характеристики сопротивления В полученном геоэлектрическом разрезе Выявлены основные особенности глубинного геоэлектрического строения. Установлено четкое соответствие зон пониженного сопротивления разломным структурам, в том числе и предполагаемым, выявленным по результатам геологической съемки. На геоэлектрическом разрезе также выявлены скрытые под чехлом современных отложений две разломные зоны, которых нет на геологической карте, что может служить дополнительной информацией о глубинном строении Байтикской впадины.

Установлено, что характер взаимосвязи лунно-солнечных приливных воздействий и электромагнитных параметров среды зависит от геоэлектрической структуры пункта зондирования. Дальнейшее развитие получил 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 лунно-солнечными приливными воздействиями. 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 всех электромагнитных параметров – основных и дополнительных импедансов, кажущегося сопротивления, фаз импеданса, а также вектора Визе, на основании чего сделан вывод о необходимости использования в первую очередь дополнительных импедансов (как реальной, так и мнимой частей) и кажущегося сопротивления 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. Как показали результаты электромагнитных наблюдений в 2016 г., вариации р<sub>к</sub>

отражают изменения напряженно-деформированного состояния геосреды не только перед значимыми сейсмическими событиями.

С целью дальнейшей разработки методического обеспечения системы обработки и анализа материалов широкодиапазонного магнитотеллурического мониторинга были выполнены опытнометодические работы на миниполигоне Кентор, расположенном в непосредственной близости от местоположения Научной станции РАН. Показано, что в регистрируемых временных рядах удается 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.

Использование алгоритма весового отбеливания помехи заставило авторов отчета подробнее рассмотреть вопросы отбеливания помех и сравнить их с алгоритмами оптимальной обработки сигналов. Анализ алгоритмов отбеливания помех по сравнению с алгоритмами оптимальной обработки сигналов показал, что алгоритмы отбеливания почти всегда по эффективности проигрывают алгоритмам оптимальной обработки. К такому же выводу приводит анализ алгоритмов подавления помехи на базе квадратурных компенсаторов.

Дополнение базы данных временных рядов вариаций электромагнитных параметров осуществлялось как новыми результатами мониторинговых магнитотеллурических наблюдений, полученными на стационарных пунктах МТ-мониторинга Ак-Суу и Чон-Курчак в 2016 году, так и результатами повторных зондирований, выполненных в широком частотном диапазоне на миниполигоне Кентор на трех режимных пунктах МТ-мониторинга и 2-х сессий профильного магнитотеллурического мониторинга.
## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Пржиялговский Е.С., Кузиков С.И. Детальные морфоструктурные исследования в районе Бишкекского геодинамического полигона // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Материалы докл. 6 Междунар. симпозиума, г. Бишкек, 23-29 июня 2014 г. – Бишкек: НС РАН, 2015. – С.11-17.
- 2 Fox L. Satellite-Synchronized 3-D Magnetotelluric System, U.S. Patent № 6 191 587 B1, issued February 20, 2001.
- 3 Неполяризующийся электрод для наземной геофизической электроразведки : Пат. Российская Федерация, RU 123979 U1/ Л.Н. Лосихин, Е.К. Матюков, В.А. Пазников, П.П. Петров, Г.Н. Тимонин ; заявитель и патентообладатель Научная станция РАН ; заявл. 28.03.12; опубликовано 10.01.13 г.
- 4 Жданов М.С. Теория обратных задач и регуляризации в геофизике / М.С. Жданов М.: Научный Мир. 2007. 710 с.
- 5 Goubau, W. M. MT data: removal of bias [Text] / W. M. Goubau, T.D. Gamble, J. Clarke // Geophysics 1978. V.43. P.1157 1162.
- 6 Сафонов, А.С. Повышение точности МТ разведки / А.С. Сафонов, В. П. Бубнов // Прикладная геофизика. 1979 № 96 С. 136 142.
- 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.
- 8 Бердичевский М. Н. Модели и методы магнитотеллурики / М. Н. Бердичевский, В. И. Дмитриев – М.: Научный мир. – 2009. – 680 с.
- 9 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.
- 10 Eggers, D.E. An Eigenstate formulation of the magnetotelluric impedance tensor [Text] / D.E. Eggers // Geophysics. 1982. V.47. P.1204-1214.
- 11 Swift C.M. A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the Southwestern United States / C.M. Swift Cambridge. 1967. 94 p.
- 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.
- 13 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.

- 14 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.
- 15 Баталева Е.А. Корреляционные зависимости электромагнитных и деформационных параметров/ Е.А. Баталева // Докл. АН. 2016 Т.468 № 3 С. 319–322.
- 16 Баталева Е.А. Вариации электромагнитных параметров среды и их связь с сейсмической активностью/ Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев, А.К. // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: XI Международная сейсмологическая школа: Мат. докл. участников из Киргизской Республики. Бишкек: НС РАН 2016. С. 21-29.
- 17 Брагин В.Д. Изучение вариаций анизотропии электрического сопротивления в земной коре на территории Бишкекского геодинамического полигона / В.Д. Брагин, В.А. Мухамадеева // В сб. Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы. Москва-Бишкек – 2009. – С.74-84.
- 18 Bogomolov L. Comparative analysis of GPS, seismic and electromagnetic data on the Central Tien Shan Territory / L. Bogomolov, V.Bragin, A.Fridman, V.Makarov, G.Sobolev, E.Polyachenko, G.Schelochkov, V.Zeigarnik, A. Zubovich // Tectonophysics – 2007 – Vol. 431 – P. 143-151.
- 19 Голяницкий И.А. Пространственно-временные статистические характеристики модулирования полей и процессов / И.А. Голяницкий М.: МАИ, 1991 160 с.
- 20 Голяницкий И.А. Оптимальная пространственно-временная обработка негауссовых полей и процессов / И.А. Голяницкий М.: МАИ, 1994 208 с.
- 21 Голяницкий И.А. Анализ и оптимизация нелинейных информационных систем / И.А. Голяницкий М.: МАИ, 1996 178 с.
- 22 Голяницкий И.А. Многопозиционные системы оптимальной обработки негауссовых процессов / И.А. Голяницкий, В.И. Годунов М,: МАИ, 1997 624 с.
- 23 Ахрипкин В.Я. В-СДМА: Синтез и анализ системы фиксированной радиосвязи / В.Я.Ахрипкин, И.А. Голяницкий– М.: Эко-Трендз, 2002 196 с.
- 24 Громаков Ю.А. Оптимальная обработка сигнала большими системами / Ю.А. Громаков, И.А. Голяницкий, В.А. Швецов М.: Эко-Трендз, 2004 324 с.
- 25 Голяницкий И.А. Математические модели и методы в радиосвязи / И.А. Голяницкий /Под ред. проф. д.т.н. Громакова Ю.А. М.: Эко-Трендз, 2005 440 с.
- 26 Тихонов В.И. Статистическая радиотехника / В.И. Тихонов М.: Сов. радио, 1966 678 с.
- 27 Матерон Ж. Случайные множества и интегральная геометрия / Ж. Матерон /Под редакцией Максимова Б.М., пер. с англ. М.: Мир, 1978 318 с.
- 28 Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента / В.В. Федоров М.: Наука, ГРФМЛ.1971 312 с.

- 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 Тамм И.Е. Основы теории электричества / И.Е. Тамм М.: Наука, ГРФМЛ. 1989 504 с.
- 31 Баталева Е.А. Проявление геодинамических процессов в вариациях электропроводности (по результатам магнитотеллурических исследований) / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев, А.К. Рыбин // В сб.: Современное состояние наук о Земле: материалы международной конференции, посв. Памяти В.И.Хаина. Изд-во МГУ. – 2011. – С.193-198.
- 32 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.
- 33 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
- 34 Busby J.P. The effectiveness of azimuthal apparent-resistivity measurements as a method for determining fracture strike orientations / J.P.Busby // Geophysical Prospecting. 2000. Vol. 48. P. 677-695.