

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
НАУЧНАЯ СТАНЦИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК В Г. БИШКЕКЕ**

УДК 004.414.2+004.414.3

№ госрегистрации 0155-2015-0001

Инв. №5/16

УТВЕРЖДАЮ

Директор НС РАН в г. Бишкеке

д-р. физ.-мат. наук


А. К. Рыбин

«24» ноября 2016 г.



ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**РАЗВИТИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ,
ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА ТЯНЬШАНСКОГО РЕГИОНА**

(годовой за 2016 г.)

Программа фундаментальных исследований Президиума РАН I.5

«Проблемы создания высокопроизводительных распределенных и облачных систем и технологий. Интеллектуальные информационные технологии и системы»

Раздел «Проблемы создания высокопроизводительных распределенных и облачных систем и технологий» (часть ОНИТ РАН)»

Раздел 9 «Науки о Земле»:

Подраздел 138. Научные основы разработки методов, технологий и средств исследования поверхности и недр Земли, атмосферы, включая ионосферу и магнитосферу Земли, гидросферы и криосферы; численное моделирование и геоинформатика (инфраструктура пространственных данных и ГИС-технологии)

Руководитель темы
директор НС РАН,
д. ф.-м. н.



А.К. Рыбин

Бишкек 2016

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Ученый секретарь НС РАН

О.Б. Забиякова

(введение,
главы 1, 2, 3,
заключение)

Ведущий научный
сотрудник лаборатории
ЛГМИ НС РАН

В.Ю. Баталев

(глава 2)

Младший научный
сотрудник лаборатории
ЛГМИ НС РАН

А.Н. Мансуров

(раздел 3.3)

Отчет утвержден на заседании Ученого совета НС РАН (Протокол № 6 от 24 ноября 2016 г.)

Ученый секретарь НС РАН

О.Б. Забиякова

СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1 СРЕДСТВА РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ	6
1.1 Платформа .NET Framework.....	6
1.2 Интегрированная среда разработки Microsoft Visual Studio.....	7
1.3 Язык программирования C#.....	8
1.4 Пространства имен и библиотеки.....	9
2 ПРОГРАММА ДЛЯ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА И ПОДГОТОВКИ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ, К ПРОВЕДЕНИЮ КАЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ	12
2.1 Руководство программиста.....	12
2.2 Руководство пользователя	14
3 ПРОГРАММЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ, К ПРОВЕДЕНИЮ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ	27
3.1 Руководство программиста.....	28
3.2 Руководство пользователя	30
3.3 Визуализация магнитотеллурических данных.....	38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	42
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	43

РЕФЕРАТ

Отчет содержит 43 страницы, 32 рисунка и список использованных источников, включающий 10 наименований.

РАЗВИТИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ, ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТЯНЬШАНСКОГО РЕГИОНА.

В отчете изложены результаты, полученные при выполнении проекта в 2016 году по следующим направлениям (основным задачам):

1. Разработка и создание сервисного программного обеспечения для подготовки полевых данных, полученных методом магнитотеллурического зондирования, к проведению качественной интерпретации.
2. Разработка и создание сервисного программного обеспечения для подготовки полевых данных, полученных методом магнитотеллурического зондирования, к проведению количественной интерпретации.

Целью данной работы является разработка сервисного программного обеспечения для решения задач по изучению глубинного геоэлектрического строения Тянь-Шаня и проведению электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов, протекающих в земной коре Тяньшанского региона, с помощью метода магнитотеллурического зондирования.

Основные задачи:

Решение проблемы, связанной с хранением и обработкой информации, содержащейся в ed1-файлах, которые получаются в результате экспресс-обработки полевых записей 5-ти компонент электромагнитного поля Земли при проведении полевых наблюдений методом магнитотеллурического зондирования.

Разработка программных приложений, позволяющих выполнять расчет всех компонент тензора импеданса и фазового тензора в зависимости от угла поворота системы координат по часовой стрелке относительно исходной ориентации составляющих электромагнитного поля на разных периодах, построение полярных диаграмм тензора импеданса и фазового тензора.

Создание интерактивного программного инструмента для конвертации набора ed1-файлов в dat-файлы, которые необходимы для эффективного решения двумерных и трехмерных обратных задач магнитотеллурического зондирования в сложных геоэлектрических условиях Тяньшанского региона.

Перечень ключевых слов: метод магнитотеллурического зондирования, полевые магнитотеллурические данные, качественная интерпретация, количественная интерпретация.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования, осуществляемые Научной станцией Российской академии наук в г. Бишкеке с использованием метода магнитотеллурических зондирований, направлены на изучение глубинного геоэлектрического строения земной коры и верхней мантии на территории Центральной Азии и анализ современных геодинамических процессов, происходящих в этом регионе. Основным инструментом исследования является метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ): при этом осуществляется как постоянный магнитотеллурический мониторинг в стационарных пунктах наблюдения, так и отдельные профильные работы в регионах, представляющих особый интерес с точки зрения глубинной геоэлектрики.

Анализ полевых магнитотеллурических данных принято проводить в два этапа, соответствующих качественной и количественной интерпретации, при этом вся подготовка проводится вручную и является достаточно трудоемким процессом. Отсюда и следует необходимость создания сервисного программного обеспечения, позволяющего ускорить процесс подготовки полевых данных к этапам качественной и количественной интерпретации.

В первой главе отчета представлено описание используемых средств разработки сервисного программного обеспечения.

Вторая глава отчета посвящена описанию программы по подготовке магнитотеллурических данных к проведению этапа их качественной интерпретации. Здесь представлено руководство программиста, руководство пользователя, а также результаты практического применения разработанной программы.

Третья глава отчета посвящена описанию программы по подготовке магнитотеллурических данных к их количественной интерпретации. Здесь представлено руководство программиста, руководство пользователя и результаты практического применения разработанной программы. Также в третьем разделе главы приводится описание разработанных средств по визуализации данных полевых наблюдений и результатов решения обратных задач магнитотеллурического зондирования.

1 СРЕДСТВА РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Данная глава отчета носит обзорный характер и содержит общие сведения о средствах разработки сервисного программного обеспечения, описанного во второй и третьей главах.

1.1 Платформа .NET Framework

.NET Framework — это программная платформа, созданная компанией Microsoft для разработки разного рода приложений: .NET Framework допускает создание Windows-приложений, web-приложений, web-служб и др. Эта платформа впервые была разработана в начале двухтысячных годов и одной из основных причин к её созданию послужила идея объединения разнородных операционных систем. Технология .NET Framework разрабатывалась таким образом, чтобы была возможность преодолеть барьер языковой несовместимости, то есть обращаться к ней и работать в ней из любого языка программирования: C#, C++ , Visual Basic, JScript, COBOL и др.. Но, благодаря .NET Framework, все эти языки обладают не только доступом к самой платформе, но и возможностью взаимодействовать друг с другом. Все это обеспечивает высокий уровень гибкости, поэтому использование .NET Framework является перспективным [1].

.NET Framework состоит из разбитой определенным образом на несколько различных модулей библиотеки программ, к которой можно обращаться и использовать ту или иную её часть (в зависимости от требуемых результатов) из разных языков программирования с помощью соответствующих технологий объектно-ориентированного программирования (ООП, object-oriented programming). Часть библиотеки .NET Framework (*Common Type System* или *CTS* — *единая система типов*) посвящена описанию некоторых базисных *типов данных* — фундаментальных способов представления данных. Это необходимо для облегчения совместного использования языков программирования с помощью .NET Framework. Также в состав системы входит *Common Language Runtime* или *CLR* — *единая система выполнения программ*, благодаря которой выполняются все приложения, разработанные с использованием технологии .NET [1, 2].

Microsoft .NET Framework содержит и обширную библиотеку классов, которая помогает существенно упростить процесс решения задач, наиболее часто встречающихся при создании различных автономных приложений: библиотека насчитывает десятки тысяч классов, готовых к употреблению, что позволяет программистам использовать в своих разработках уже готовые и отлаженные модули [2].

Таким образом, Microsoft .NET Framework является удобной средой выполнения приложений. В качестве интегрированной среды разработки этих приложений используют Microsoft Visual Studio .NET.

1.2 Интегрированная среда разработки Microsoft Visual Studio

Создание сервисного программного обеспечения, описанного в данном отчете, осуществлялось в среде Microsoft Visual Studio 2010. Microsoft Visual Studio 2010 – это набор инструментов от компании Microsoft для создания различного рода программного обеспечения: позволяет планировать и разрабатывать как консольные приложения, так и приложения с интерактивным графическим пользовательским интерфейсом, а также создавать, тестировать, отлаживать и анализировать программный код, его качество и производительность. Эта система является наиболее привлекательным средством разработки в .NET. Далее перечислим некоторые её преимущества [3]:

- Microsoft Visual Studio автоматически компилирует исходный код, при этом разработчик может управлять всеми используемыми опциями, если их необходимо переопределить (технология IntelliSense);

- текстовый редактор Microsoft Visual Studio настроен таким образом, что он может интеллектуально обнаруживать ошибки и подсказывать программисту в процессе ввода, какой именно код необходим, указывать на возможные допущенные ошибки;

- в состав Microsoft Visual Studio входит редактор форм, позволяющий быстро и легко создавать приложения в Windows Forms и Web Forms с интерактивным графическим интерфейсом путем перетаскивания мышью встроенных в систему элементов пользовательского интерфейса.

- многие типы проектов, создаваемые на C#, могут разрабатываться на основе "каркасного" кода, заранее включаемого в программу: вместо того чтобы каждый раз писать программный код с нуля, Microsoft Visual Studio позволяет разработчикам использовать уже имеющиеся файлы с исходным кодом, что ускоряет процесс создания проекта.

- в состав Microsoft Visual Studio входит несколько вспомогательных программ, которые позволяют автоматизировать процесс выполнения наиболее распространенных задач, причем многие из этих программ способны добавлять необходимый код в уже существующие файлы проекта самостоятельно, так что программисту не приходится беспокоиться о соблюдении некоторых синтаксических правил;

- Microsoft Visual Studio, благодаря встроенному отладчику, допускает использование совершенных методов отладки при разработке проектов, например, пошаговое построчное

выполнение кода, что позволяет отслеживать текущее состояние приложения и исправлять найденные в программном коде ошибки.

По умолчанию Visual Studio обеспечивает поддержку следующих языков программирования: C#, C и C++, JavaScript, F# и Visual Basic.

1.3 Язык программирования C#

C# — объектно-ориентированный язык программирования, разработанный в компании Microsoft для создания и запуска приложений на платформе Microsoft .NET Framework. Так как C# относится к семье языков с C-подобным синтаксисом и близок к языку C++, то принято считать, что C# — это результат эволюции языков C и C++. Являясь новейшей разработкой, C# конструировался очень тщательно, с учетом наилучших возможностей других языков, предназначенных для решения специфических проблем. Поэтому создавать приложения на C# легче, чем на C++. C#, в отличие от C++, способен осуществляется контроль безопасности использования типов, то есть если некоторые данные отнесены к определенному типу, то впоследствии они не могут самостоятельно преобразовываться в другие типы данных. Поэтому существуют строгие правила, которым необходимо следовать при выполнении программного преобразования из одного типа в другой, что зачастую приводит к большим объемам кода, но при этом разработчик может быть уверен, что он получает надежную программу и ее отладка упрощается, поскольку .NET помогает постоянно отслеживать происходящие преобразования типов переменных в каждый конкретный момент времени. Но главным преимуществом языка C# является то, что это единственный язык, который был разработан для платформы .NET Framework "с нуля" и может быть основным языком для различных версий .NET. Поэтому, в отличие от других языков, C# позволяет по максимуму использовать любые возможности, предоставляемые библиотекой программ .NET Framework [1].

Язык C# тесно связан с такими широко распространенными и популярными среди программистов языками программирования, как C, C++ и Java. В настоящее время практически все профессиональные программисты знают эти языки, поэтому переход к базирующемуся на них языку C# не представляет особых трудностей.

Генеалогическое древо языка C# представлено на рисунке 1.1. Основу языка C# составляет принцип объектной модели, которая была определена в языке C++. Синтаксис, некоторые ключевые слова и операторы C# унаследовал от языка C. Связь же языков C# и Java является более сложной: они оба являются последователями C и C++, но существует множество принципиальных отличий [4].

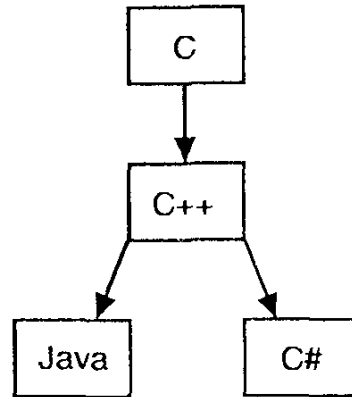


Рисунок 1.1 – Генеалогическое древо языка C#

1.4 Пространства имен и библиотеки.

Так как разработанное сервисное программное обеспечение предназначено для работы с файлами, представленными в международном формате EDI (считывание, анализ и обработка данных, хранящихся в этих файлах), то посчиталось целесообразным в рамках первой главы отчета представить обзорное описание библиотек и пространств имен, с помощью которых осуществляется функционирование программ. Описания взяты с электронного сайта библиотеки Microsoft Developer Network (MSDN или MSDN Library) – библиотеки официальной технической документации для разработчиков под операционную систему Microsoft Windows (www.msdn.microsoft.com) [3].

System – пространство имен, которое содержит фундаментальные и базовые классы, определяющие часто используемые типы значений и ссылочных данных, события и обработчики событий, интерфейсы, атрибуты и обработки исключений. Строка подключения этого пространства имен в программном коде:

```
using System;
```

System.Collections.Generic – пространство имен, которое содержит интерфейсы и классы, определяющие универсальные коллекции, благодаря чему пользователи имеют возможность создавать строго типизированные коллекции, обеспечивающие повышенную производительность и безопасность типов (по сравнению с неуниверсальными строго типизированными коллекциями). Строка подключения этого пространства имен в программном коде:

```
using System.Collections.Generic;
```

System.Drawing – пространство имен, которое обеспечивает доступ к базовым функциональным возможностям графического интерфейса GDI+. Строка подключения этого пространства имен в программном коде:

```
using System.Drawing;
```

System.Text – пространство имен, которое содержит классы для работы с символами в различных кодировках (ASCII, Юникод), абстрактные базовые классы для преобразования блоков символов в блоки байтов и обратно, а также класс, управляющий объектами типа String. Строка подключения этого пространства имен в программном коде:

```
using System.Text;
```

System.Windows.Forms – пространство имен, которое содержит классы, необходимые разработчику при создании приложений для работы в операционной системе Microsoft Windows, имеющих преимущественно полный графический интерфейс пользователя. Строка подключения этого пространства имен в программном коде:

```
using System.Windows.Forms;
```

System.IO – пространство имен, позволяющее осуществлять чтение и запись данных в файлы и потоки данных, а также оно содержит специальные типы данных для поддержки работы пользователя с файлами и папками. Строка подключения этого пространства имен в программном коде:

```
using System.IO;
```

Microsoft.Office.Interop.Excel – одна из основных сборок взаимодействия программного проекта с продуктом Excel программного пакета Microsoft Office. Для работы с этой сборкой необходимо добавить ссылку на библиотеку Microsoft.Office.Interop.Excel.dll и подключить ее к проекту, добавив в программный код соответствующую строку подключения (строка добавляется с одновременным созданием псевдонима пространства имен):

```
using Excel = Microsoft.Office.Interop.Excel;
```

System.Numerics – пространство имен, содержащее числовые типы, дополняющие числовые типы-примитивы, определенные в .NET Framework (Byte, Double и Int32). Особый интерес представляет структура Complex, которая позволяет работать с числами комплексного пространства (типа $z = x + iy$, где $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица). Для работы с пространством имен System.Numerics необходимо добавить ссылку на файл библиотеки System.Numerics.dll и добавить в программный код соответствующую строку подключения этой библиотеки

```
using System.Numeric;
```

ZedGraph – библиотека, являющаяся удобным компонентом для рисования различных видов графиков при работе под платформой .NET Framework. Для работы с ним необходимо добавить ссылку на файл библиотеки классов ZedGraph.dll и добавить соответствующую строку подключения

```
using ZedGraph;
```

Далее при составлении руководства программиста к программам будем лишь перечислять какие из описанных выше пространств имен и библиотек были задействованы.

2 ПРОГРАММА ДЛЯ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА И ПОДГОТОВКИ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ, К ПРОВЕДЕНИЮ КАЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Большую роль при проведении качественной интерпретации данных мониторинга, полученных методом магнитотеллурического зондирования, играют псевдорезы кажущего сопротивления, фазы импеданса, параметра асимметрии, параметра неоднородности среды, а также полярные диаграммы различных компонент тензора импеданса и фазового тензора [5, 6]. Для оперативного создания excel-таблиц, по которым можно построить эти псевдорезы и полярные диаграммы, например, с помощью программы Surfer, понадобился дополнительный интерактивный инструмент (конвертер EDI2XLSX), позволяющий из набора стандартных edi-файлов оперативно генерировать необходимые таблицы и сохранять их в xlsx-файлы.

2.1 Руководство программиста

Создание конвертера EDI2XLSX осуществлялось в среде Microsoft Visual Studio 2010: в программной среде, которая позволяет разработчикам достаточно легко создавать приложения различной сложности для работы в операционной системе Windows. Код программы написан на объектно-ориентированном языке программирования C#. Требуемая 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 выбирает исходные данные, необходимые для дальнейшей работы, может просматривать содержимое выбранных файлов, выполнять и отслеживать некоторые дополнительные расчеты, а также сохранять необходимые значения параметров в excel-таблицы.

Функционирование конвертера осуществляется с помощью следующих библиотек и пространств имен: System, System.Collections.Generic, System.Text, System.Windows.Forms, System.IO, Microsoft.Office.Interop.Excel, System.Numerics.

Таблицы, формируемые при работе приложения, содержат значения следующих магнитотеллурических функций:

- *вектор тиннера* [5]:

$$T = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \end{pmatrix}$$

Компоненты этого вектора являются комплексными величинами, определяемыми по вертикальному (аномальному) магнитному полю. Согласно [5], эти функции отражают горизонтальную асимметрию избыточных токов гальванической и индукционной природы, возникающих в Земле вследствие горизонтальных изменений электропроводности. Табличные значения функций считываются из выбранных edi-файлов.

- *тензор импеданса* [5]:

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix}$$

Компоненты тензора импеданса являются комплексными величинами, характеризующими взаимосвязь горизонтальных электрических и магнитных составляющих магнитотеллурического поля. Согласно [5], тензор импеданса отражает электрическую структуру Земли. Из edi-файлов считываются значения действительных и мнимых частей четырех компонент тензора импеданса. Так же в программе рассчитываются азимутальные значения тензора импеданса (для построения полярных диаграмм), получаемые при повороте системы координат на некоторый угол α по формулам (2.1)-(2.4) [5]:

$$Z_{xx}^{\alpha}(T) = Z_{xx} \cos^2 \alpha + Z_{yy} \sin^2 \alpha + (Z_{xy} + Z_{yx}) \sin \alpha \cos \alpha, \quad (2.1)$$

$$Z_{xy}^{\alpha}(T) = Z_{xy} \cos^2 \alpha - Z_{yx} \sin^2 \alpha - (Z_{xx} - Z_{yy}) \sin \alpha \cos \alpha, \quad (2.2)$$

$$Z_{yx}^{\alpha}(T) = Z_{yx} \cos^2 \alpha - Z_{xy} \sin^2 \alpha - (Z_{xx} - Z_{yy}) \sin \alpha \cos \alpha, \quad (2.3)$$

$$Z_{yy}^{\alpha}(T) = Z_{yy} \cos^2 \alpha + Z_{xx} \sin^2 \alpha - (Z_{xy} + Z_{yx}) \sin \alpha \cos \alpha. \quad (2.4)$$

Значения кажущихся сопротивлений и фазы импеданса определяются с помощью соответствующих соотношений:

$$\rho_m(T) = \frac{T |Z_m(T)|^2}{2\pi\mu_0}, m = xx, xy, yx, yy, \quad \rho_m^{\alpha}(T) = \frac{T |Z_m^{\alpha}(T)|^2}{2\pi\mu_0}, m = xx, xy, yx, yy \quad (2.5)$$

$$\varphi_m(T) = \text{Arg}(Z_m(T)), \quad \varphi_m^{\alpha}(T) = \text{Arg}(Z_m^{\alpha}(T)) \quad (2.6)$$

- *фазовый тензор* [6]:

$$\Phi = \begin{pmatrix} \Phi_{xx} & \Phi_{xy} \\ \Phi_{yx} & \Phi_{yy} \end{pmatrix}$$

Компоненты тензора – действительные величины, вычисляемые с помощью значений тензора импеданса по формулам (2.7)-(2.10):

$$\Phi_{xx} = \frac{\operatorname{Re} Z_{yy} \operatorname{Im} Z_{xx} - \operatorname{Re} Z_{xy} \operatorname{Im} Z_{yx}}{\operatorname{Re} Z_{xx} \operatorname{Re} Z_{yy} - \operatorname{Re} Z_{xy} \operatorname{Re} Z_{yx}} \quad (2.7)$$

$$\Phi_{xy} = \frac{\operatorname{Re} Z_{yy} \operatorname{Im} Z_{xy} - \operatorname{Re} Z_{xy} \operatorname{Im} Z_{yy}}{\operatorname{Re} Z_{xx} \operatorname{Re} Z_{yy} - \operatorname{Re} Z_{xy} \operatorname{Re} Z_{yx}} \quad (2.8)$$

$$\Phi_{yx} = \frac{\operatorname{Re} Z_{xx} \operatorname{Im} Z_{yx} - \operatorname{Re} Z_{yx} \operatorname{Im} Z_{xx}}{\operatorname{Re} Z_{xx} \operatorname{Re} Z_{yy} - \operatorname{Re} Z_{xy} \operatorname{Re} Z_{yx}} \quad (2.9)$$

$$\Phi_{yy} = \frac{\operatorname{Re} Z_{xx} \operatorname{Im} Z_{yy} - \operatorname{Re} Z_{yx} \operatorname{Im} Z_{xy}}{\operatorname{Re} Z_{xx} \operatorname{Re} Z_{yy} - \operatorname{Re} Z_{xy} \operatorname{Re} Z_{yx}} \quad (2.10)$$

Согласно [5, 6], фазовый тензор свободен от локальных приповерхностных искажений и зависит только от региональной структуры.

При повороте осей системы координат на угол α по часовой стрелке компоненты фазового тензора изменяются по законам (2.11)-(2.12):

$$\Phi_{xx}(\alpha) = \Phi_2 + \Phi_3 \sin 2\alpha + \Phi_4 \cos 2\alpha \quad (2.11)$$

$$\Phi_{xy}(\alpha) = \Phi_1 + \Phi_3 \cos 2\alpha - \Phi_4 \sin 2\alpha \quad (2.12)$$

где

$$\Phi_1 = \frac{\Phi_{xy} - \Phi_{yx}}{2}, \Phi_2 = \frac{\Phi_{xx} + \Phi_{yy}}{2}, \Phi_3 = \frac{\Phi_{xy} + \Phi_{yx}}{2}, \Phi_4 = \frac{\Phi_{xx} - \Phi_{yy}}{2}$$

Для построения полярных диаграмм фазового тензора, которые характеризуют размерность региональных структур, используются соотношения (2.13)-(2.14):

$$\varphi_{xx}(\alpha) = \left| \operatorname{arctg} \Phi_{xx}(\alpha) \right| = \left| \operatorname{arctg} (\Phi_2 + \Phi_3 \sin 2\alpha + \Phi_4 \cos 2\alpha) \right|, \quad (2.13)$$

$$\varphi_{xy}(\alpha) = \left| \operatorname{arctg} \Phi_{xy}(\alpha) \right| = \left| \operatorname{arctg} (\Phi_1 + \Phi_3 \cos 2\alpha - \Phi_4 \sin 2\alpha) \right|. \quad (2.14)$$

2.2 Руководство пользователя

Далее кратко опишем работу в программе EDI2XLSX.

Рабочее окно программы содержит три вкладки: «Исходные данные», «Таблицы», «Сводная таблица».

При запуске EDI2DAT.exe активируется **вкладка «Исходные данные»** (Рисунок 2.1). По щелчку на кнопку «Обзор» появляется диалоговое окно выбора директории (Рисунок 2.2). В программе не предусмотрена возможность выбора отдельных файлов, поэтому пользователю следует заранее подготовить папку, в которой будут храниться только конкретные edi-файлы, необходимые для дальнейшей работы. После того, как папка

выбрана, в прокручиваемой текстовой панели вкладки появится список с именами edi-файлов, которые содержатся в этой папке, а затем будут задействованы в расчетах (Рисунок 2.3). Ниже списка выбранных файлов приводится их количество (количество точек).

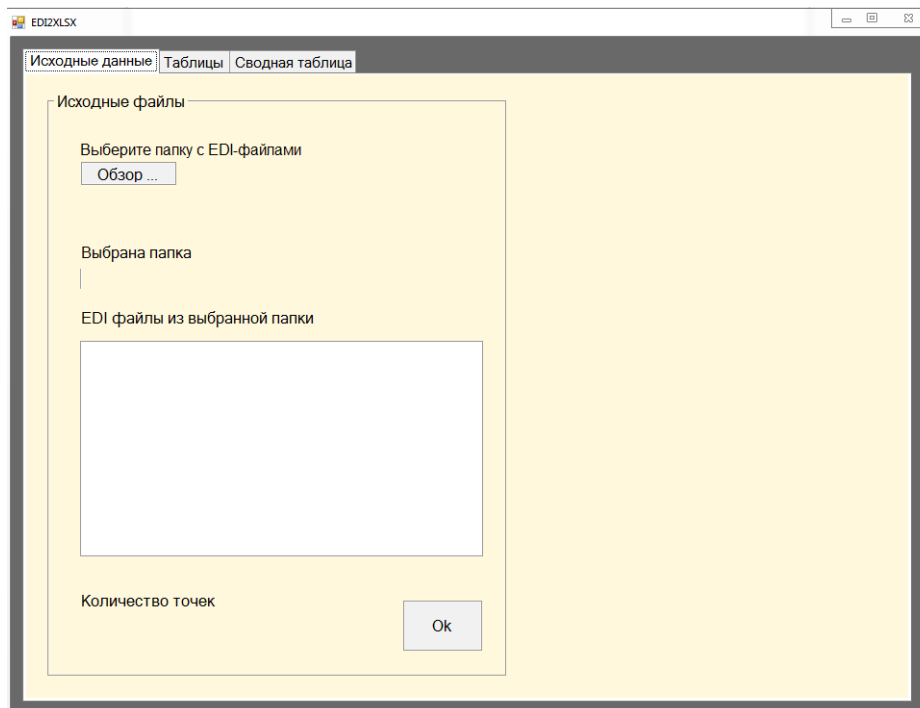


Рисунок 2.1 – Рабочее окно программы. Активная вкладка – «Исходные данные»

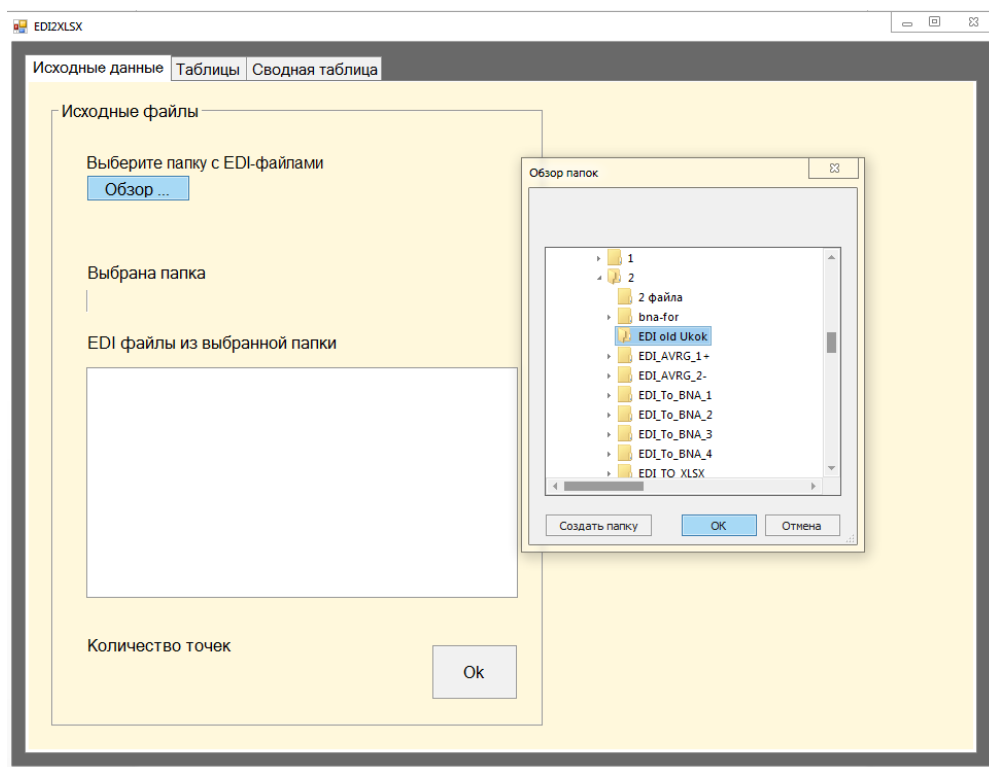


Рисунок 2.2 – Диалоговое окно для выбора папки с edi-файлами.

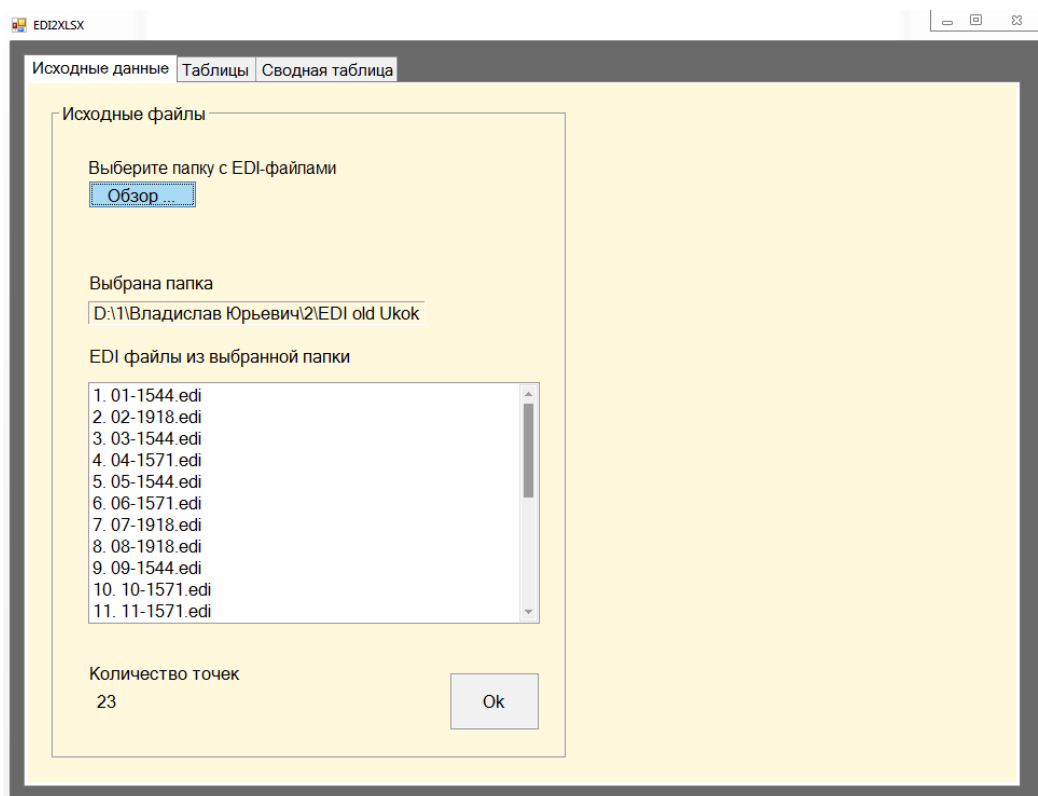


Рисунок 2.3 – Диалоговое окно для выбора папки с edi-файлами.

Следующим шагом необходимо щелкнуть кнопку «Ok», при этом на внутреннем уровне работы программы происходит считывание значений различных параметров из исходных edi-файлов (например, широта и долгота пункта, в котором проводилось МТЗ-наблюдение, все частоты, на которых измерялись составляющие магнитотеллурического поля, значения различных компонент тензора импеданса, вектора Визе-Паркинсона (типпера) и т.п.), после чего программа активирует вторую вкладку «Таблицы».

Рассмотрим более подробно функциональную структуру *вкладки «Таблицы»*.

В верхней части вкладки имеется выпадающий список (Рисунок 2.4), содержащий весь доступный для выбора пользователя набор частот, который раскрывается при щелчке мышью по нему (Рисунок 2.5).

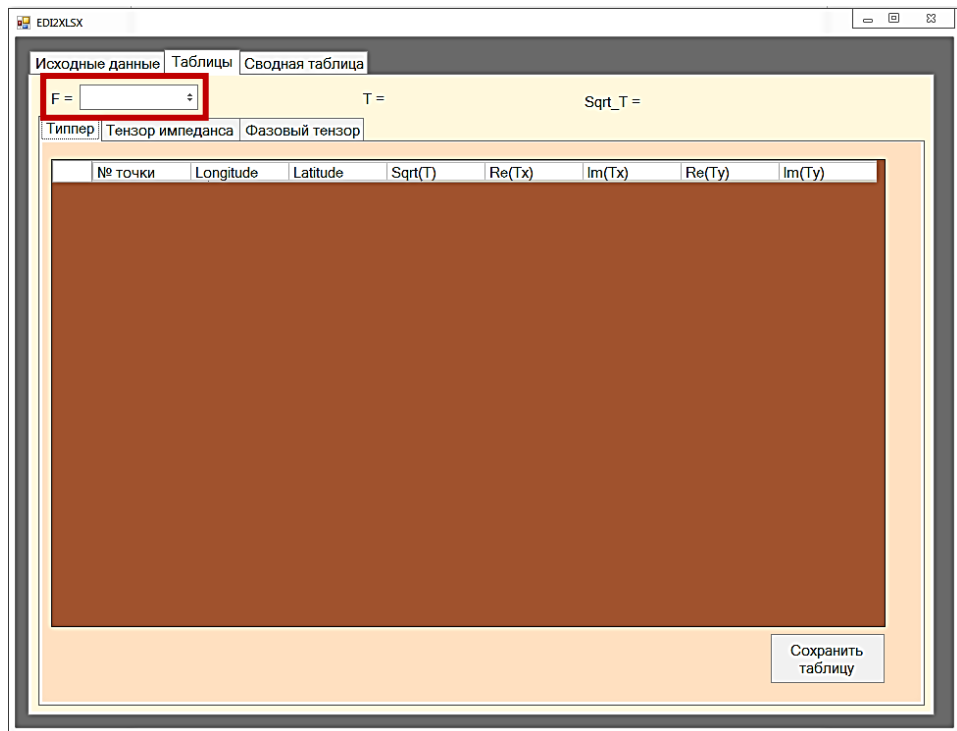


Рисунок 2.4 – Вид рабочего окна программы с активной вкладкой «Таблицы»

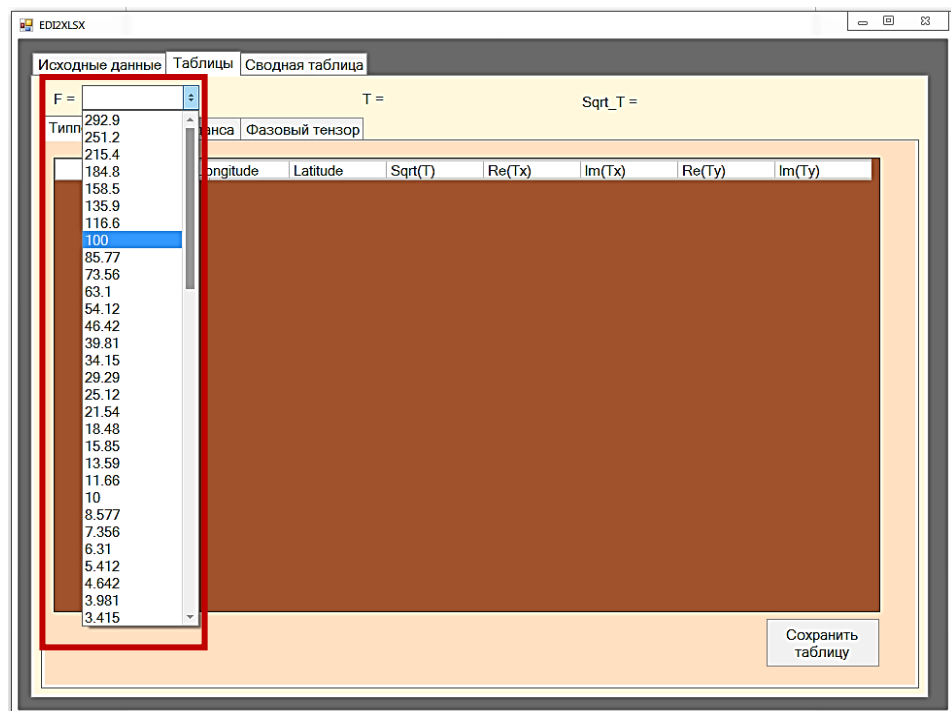


Рисунок 2.5 – Выбор частоты

После того, как программе задана конкретная частота F , для неё формируются разделы, содержащие таблицы значений одноименных магнитотеллурических функций:

1. «*Tunner*». Раздел содержит таблицу со следующими полями: номер пункта наблюдения, географические координаты пункта наблюдения (широта и долгота),

квадратный корень выбранного для анализа периода $T \left(T = \frac{1}{F} \right)$, действительная и мнимая части компоненты T_x , действительная и мнимая части компоненты T_y (Рисунок 2.6). Все значения функций считываются непосредственно из edf-файлов.

№ точки	Longitude	Latitude	Sqrt(T)	Re(Tx)	Im(Tx)	Re(Ty)	Im(Ty)
1	75.7608333...	42.1094444...	0.1	-0.08547	0.1152	0.151	-0.04203
2	75.7588888...	42.1111111...	0.1	-0.1471	0.08132	0.1998	-0.02959
3	75.7552777...	42.1141666...	0.1	-0.08067	0.04344	0.04906	-0.02207
4	75.7541666...	42.1163888...	0.1	-0.02112	0.02473	-0.1425	-0.09305
5	75.7527777...	42.1177777...	0.1	0.005894	0.01016	-0.1996	-0.07562
6	75.7513888...	42.1188888...	0.1	0.05346	0.01589	-0.2178	-0.06059
7	75.7494444...	42.12	0.1	0.02643	0.02552	-0.1253	0.007789
8	75.7488888...	42.1211111...	0.1	0.02601	-0.001506	-0.126	0.02302
9	75.7480555...	42.1219444...	0.1	0.04517	0.001509	-0.09254	0.0143
10	75.7466666...	42.1236111...	0.1	0.09359	0.02013	-0.109	-0.003237
11	75.7455555...	42.1247222...	0.1	0.1032	0.03092	-0.09423	-0.006017
12	75.7452777...	42.1263888...	0.1	0.1192	0.01749	-0.1237	-0.02173
13	75.745	42.1272222...	0.1	0.112	0.01643	-0.1227	-0.0265
14	75.745	42.1286111...	0.1	0.1681	0.02977	-0.1609	-0.02752
15	75.745	42.1302777...	0.1	0.2414	0.07786	-0.1622	-0.03394
16	75.7452777...	42.1316666...	0.1	0.2562	0.0873	-0.1603	-0.03528
17	75.7452777...	42.1333333...	0.1	0.2075	0.06716	-0.1322	-0.0321
18	75.7455555...	42.1352777...	0.1	0.1804	0.04682	-0.1187	-0.03136
19	75.7463888...	42.1372222...	0.1	0.1285	0.033	-0.09312	-0.02979
20	75.7463888...	42.1386111...	0.1	0.1306	0.03004	-0.09464	-0.02706

Рисунок 2.6 – Раздел «Типпер»

С помощью кнопки «Сохранить таблицу» программа открывает диалоговое окно сохранения файла и сохраняет соответствующую таблицу в excel-файл (Рисунок 2.7).

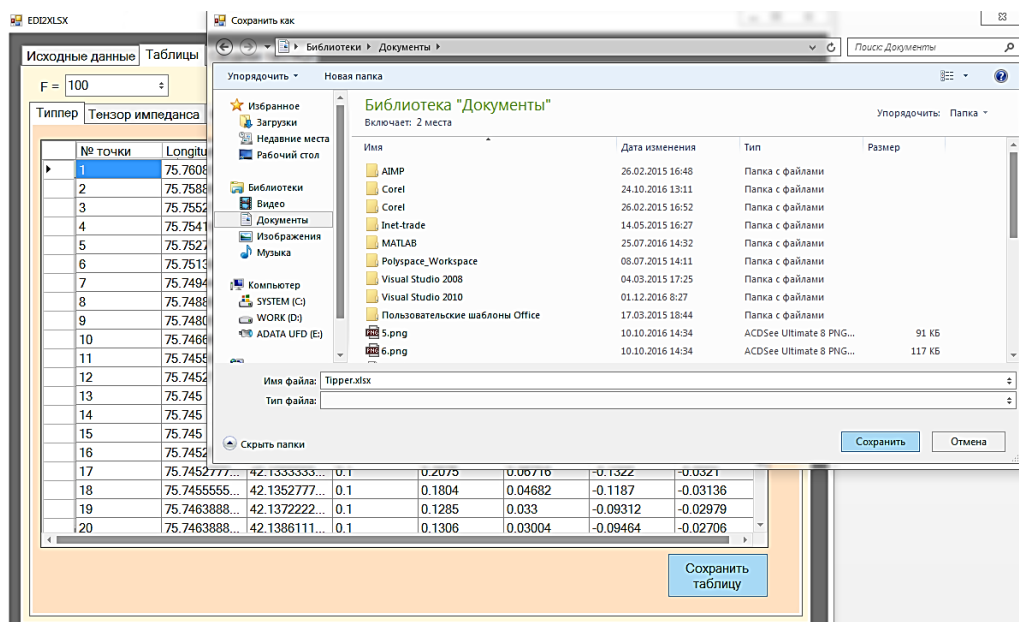


Рисунок 2.7 – Сохранение таблицы

2. «Тензор импеданса». В этом разделе формируются две таблицы:

- *Исходные значения.* Таблица содержит следующие поля: номер пункта наблюдения, географические координаты пункта наблюдения (широта и долгота), квадратный корень выбранного для анализа периода $T \left(T = \frac{1}{F} \right)$, действительная и мнимая части компоненты Z_{xx} , действительная и мнимая части компоненты Z_{xy} , действительная и мнимая части компоненты Z_{yx} , действительная и мнимая части компоненты Z_{yy} (Рисунок 2.8). Все значения функций считываются непосредственно из edi-файлов.

№ точки	Longitude	Latitude	Sqrt(T)	Re(Zxx)	Im(Zxx)	Re(Zxy)	Im(Zxy)
1	75.7608333...	42.1094444...	0.1	143.5	90.51	366.2	390.4
2	75.7588888...	42.1111111...	0.1	123.5	83.1	379.2	436.7
3	75.7552777...	42.1141666...	0.1	5.361	23.4	92.11	103.6
4	75.7541666...	42.1163888...	0.1	12.21	17.68	79.84	79.46
5	75.7527777...	42.1177777...	0.1	15.39	23.31	71.55	76.05
6	75.7513888...	42.1188888...	0.1	42.56	51.61	164.6	184.2
7	75.7494444...	42.12	0.1	-20.39	-27.73	163.6	204.1
8	75.7488888...	42.1211111...	0.1	10.73	4.285	177.1	201.9
9	75.7480555...	42.1219444...	0.1	-26.59	-17.03	168.8	170.9
10	75.7466666...	42.1236111...	0.1	-26	-10.73	155	157.6
11	75.7455555...	42.1247222...	0.1	-36.12	-17.55	169.9	190.8
12	75.7452777...	42.1263888...	0.1	0.09639	11.02	93.86	119.8
13	75.745	42.1272222...	0.1	-3.008	6.877	113	161.7
14	75.745	42.1286111...	0.1	37.62	43.51	59.41	102.4
15	75.745	42.1302777...	0.1	-4	4.641	90.03	151.1
16	75.7452777...	42.1316666...	0.1	28.95	56.59	160.6	281.4
17	75.7452777...	42.1333333...	0.1	-39.47	-56.28	194.5	339.7

Рисунок 2.8 – Таблица со значениями тензора импеданса

- *Вращение тензора импеданса.* Таблица содержит следующие поля: номер пункта наблюдения, географические координаты пункта наблюдения (широта и долгота), квадратный корень выбранного для анализа периода T , действительные и мнимые части азимутальных кривых Z_{xx} , Z_{xy} , Z_{yx} , Z_{yy} (Рисунок 2.9). Азимутальные значения различных компонент тензора импеданса вычисляются соответственно по формулам (2.1)-(2.4).

№ точки	Longitude	Latitude	Sqrt(T)	Zxx Re 0	Zxx Im 0	Zxy Re 0	Zxy Im 0
1	75.7608333...	42.1094444...	0.1	143.5	90.51	366.2	390.4
2	75.7588888...	42.1111111...	0.1	123.5	83.1	379.2	438.7
3	75.7552777...	42.1141666...	0.1	5.361	23.4	92.11	103.6
4	75.7541666...	42.1163888...	0.1	12.21	17.68	79.84	79.46
5	75.7527777...	42.1177777...	0.1	15.39	23.31	71.55	76.05
6	75.7513888...	42.1188888...	0.1	42.56	51.61	164.6	184.2
7	75.7494444...	42.12	0.1	-20.39	-27.73	163.6	204.1
8	75.7488888...	42.1211111...	0.1	10.73	4.285	177.1	201.9
9	75.7480555...	42.1219444...	0.1	-26.59	-17.03	168.8	170.9
10	75.7466666...	42.1236111...	0.1	-26	-10.73	155	157.6
11	75.7455555...	42.1247222...	0.1	-36.12	-17.55	169.9	190.8
12	75.7452777...	42.1263888...	0.1	0.09639	11.02	93.86	119.8
13	75.745	42.1272222...	0.1	-3.008	6.877	113	161.7
14	75.745	42.1286111...	0.1	37.62	43.51	59.41	102.4
15	75.745	42.1302777...	0.1	-4	4.841	90.03	151.1
16	75.7452777...	42.1316666...	0.1	28.95	56.59	160.6	281.4
17	75.7452777...	42.1333333...	0.1	-39.47	-56.28	194.5	339.7

Рисунок 2.9 – Таблица с азимутальными значениями тензора импеданса

3. «Фазовый тензор». В этом разделе формируются два подраздела:

- *Исходные значения.* Таблица содержит следующие поля: номер пункта наблюдения, географические координаты пункта наблюдения (широта и долгота), квадратный корень выбранного для анализа периода T, значения компонент фазового тензора, вычисляемые по формулам (2.7)-(2.10) (Рисунок 2.10) .

№ точки	Longitude	Latitude	Sqrt(T)	Phi_x	Phi_y	Phi_z	Phi_w
1	75.7608333...	42.1094444...	0.1	1.33450385...	-0.4495298...	-0.2757818...	1.24223794...
2	75.7588888...	42.1111111...	0.1	1.57028374...	-0.4653341...	-0.2922733...	1.30318767...
3	75.7552777...	42.1141666...	0.1	1.51093786	0.09549032	0.16610424	1.11918441
4	75.7541666...	42.1163888...	0.1	1.09360249	0.02852152	0.05419731	0.99087865
5	75.7527777...	42.1177777...	0.1	1.10396952	-0.0284836...	0.08832856	1.06901976
6	75.7513888...	42.1188888...	0.1	1.02542569	-0.0790221721519011	0.840754	1.13950901
7	75.7494444...	42.12	0.1	1.04972228	-0.0918118...	-0.0386684...	1.23611220...
8	75.7488888...	42.1211111...	0.1	1.01714557	-0.0864202...	-0.0374306...	1.14526984...
9	75.7480555...	42.1219444...	0.1	1.01387046	0.03445726	0.05881999	1.01786859
10	75.7466666...	42.1236111...	0.1	1.01928973	0.10848740	0.10175182	1.03497208
11	75.7455555...	42.1247222...	0.1	1.04753477	0.16658259	0.11940527	1.15842827...
12	75.7452777...	42.1263888...	0.1	1.08938063	0.21917397	0.11629016	1.27614397...
13	75.745	42.1272222...	0.1	1.08729614	0.17009089	0.08980165	1.43550118
14	75.745	42.1286111...	0.1	1.06662285	0.23262321	0.05895418	1.57631231...
15	75.745	42.1302777...	0.1	1.15233582	0.18849900	0.10274734	1.68670438
16	75.7452777...	42.1316666...	0.1	1.41200528	0.15231542	0.09783500	1.72472271
17	75.7452777...	42.1333333...	0.1	1.69466375	0.08330876	0.05454179	1.76343546
18	75.7455555...	42.1352777...	0.1	1.85408465	-0.0159717...	-0.0448329...	1.79296265...

Рисунок 2.10 – Таблица со значениями фазового тензора

- *Вращение фазового тензора.* В этом подразделе имеется две таблицы:

– *Вращение компонент фазового тензора.* Таблица содержит следующие поля: номер пункта наблюдения, географические координаты пункта наблюдения (широта и долгота), период, азимутальные значения компонент фазового тензора, вычисляемые по формулам (2.11)-(2.12) (Рисунок 2.11).

№ точки	Longitude	Latitude	Sqrt(T)	$\Phi_{xx}(\alpha)$	$\Phi_{xy}(\alpha)$	$\Phi_{yy}(\alpha)$
1	75.7608333...	42.1094444...	0.1	1.33450385...	0.4495298...	1.14669529...
2	75.7588888...	42.1111111...	0.1	1.57028374...	-0.4653341...	1.36288883...
3	75.7552777...	42.1141666...	0.1	1.51093786...	0.09549032...	1.55009399...
4	75.7541666...	42.1163888...	0.1	1.09360249...	0.02852152...	1.10740101...
5	75.7527777...	42.1177777...	0.1	1.10396952...	-0.0284836...	1.11658955...
6	75.7513888...	42.1188888...	0.1	1.02542569...	0.0790221...	1.02541417...
7	75.7494444...	42.12	0.1	1.04972228...	-0.0918118...	1.02958795...
8	75.7488888...	42.1211111...	0.1	1.01714557...	0.0884202...	0.99478555...
9	75.7480555...	42.1219444...	0.1	1.01387046...	0.03445726...	1.03745760...
10	75.7488888...	42.1236111...	0.1	1.01928973...	0.10848740...	1.07290006...
11	75.7455555...	42.1247222...	0.1	1.04753477...	0.16658259...	1.12646019...
12	75.7452777...	42.1263888...	0.1	1.08938063...	0.21917397...	1.18575744...
13	75.745	42.1272222...	0.1	1.08729614...	0.17009089...	1.17559459...
14	75.745	42.1286111...	0.1	1.06662285...	0.23262321...	1.17315992...
15	75.745	42.1302777...	0.1	1.15233582...	0.18849900...	1.26094332...

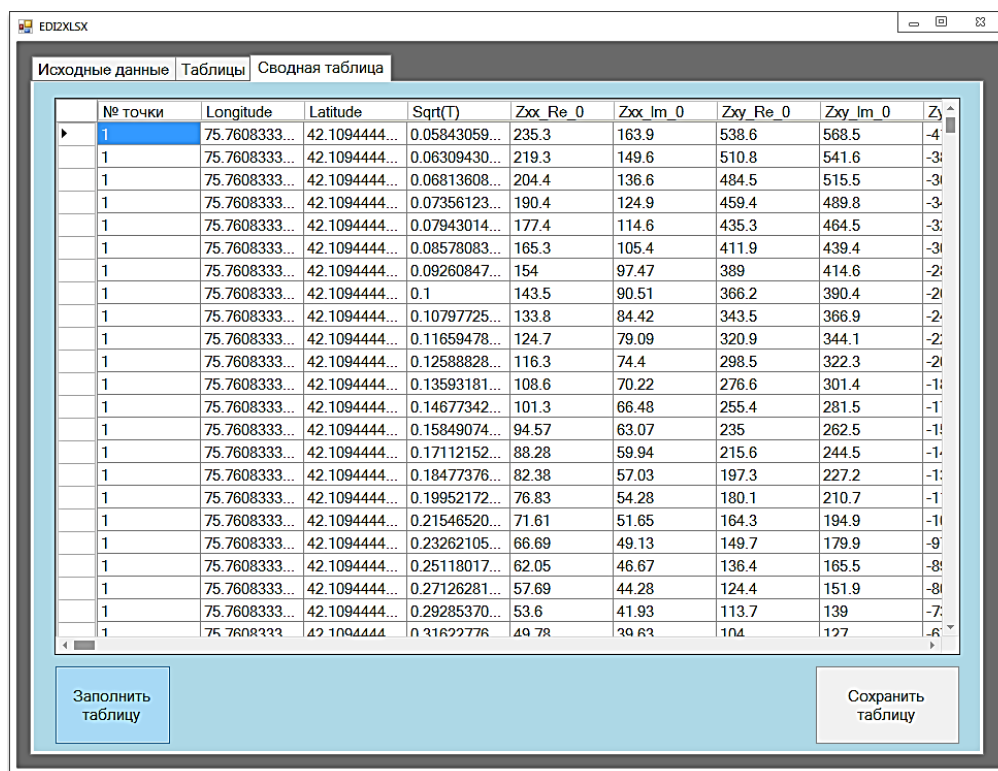
Рисунок 2.11 – Таблица с азимутальными значениями компонент фазового тензора

– *Значения для построения полярных диаграмм фазового тензора.* Таблица содержит следующие поля: номер пункта наблюдения, географические координаты пункта наблюдения (широта и долгота), период, значения функций для построения полярных диаграмм фазового тензора, вычисляемые по формулам (2.13)-(2.14) (Рисунок 2.12).

№ точки	Longitude	Latitude	Sqrt(T)	$\phi_{xx}(\alpha)$	$\phi_{xy}(\alpha)$	$\phi_{yy}(\alpha)$
1	75.7608333...	42.1094444...	0.1	0.92771637...	0.42246288...	0.85375707...
2	75.7588888...	42.1111111...	0.1	1.00373695...	0.43553237...	0.93782132...
3	75.7552777...	42.1141666...	0.1	0.98614230...	0.08520166...	0.99785780...
4	75.7541666...	42.1163888...	0.1	0.83007722...	0.02851379...	0.83631783...
5	75.7527777...	42.1177777...	0.1	0.83477388...	0.02847598...	0.84042623...
6	75.7513888...	42.1188888...	0.1	0.79795076...	0.07885830...	0.79794514...
7	75.7494444...	42.12	0.1	0.80965146...	0.09155518...	0.79997543...
8	75.7488888...	42.1211111...	0.1	0.79389787...	0.08620602...	0.78277407...
9	75.7480555...	42.1219444...	0.1	0.79228551...	0.03444363...	0.80378057...
10	75.7466666...	42.1236111...	0.1	0.79495060...	0.10806476...	0.82055182...
11	75.7455555...	42.1247222...	0.1	0.80860960...	0.16506687...	0.84479801...
12	75.7452777...	42.1263888...	0.1	0.82815062...	0.21576227...	0.87017983...
13	75.745	42.1272222...	0.1	0.82719639...	0.16847850...	0.88593486...
14	75.745	42.1286111...	0.1	0.81762455...	0.22855837...	0.88491133...
15	75.745	42.1302777...	0.1	0.85605731...	0.18631285...	0.90030324...

Рисунок 2.12 – Таблица для построения полярных диаграмм фазового тензора

Вкладка «Сводная таблица» рабочего окна программы EDI2XLSX предоставляет пользователю таблицу, содержащую как данные магнитотеллурических наблюдений, считанные из edi-файлов, так и различные расчетные значения соответствующих функций, определяемые по формулам (2.1)-(2.14) (Рисунок 2.13).



№ точки	Longitude	Latitude	Sqrt(T)	Zxx_Re_0	Zxx_Im_0	Zxy_Re_0	Zxy_Im_0	Zj
1	75.7608333...	42.1094444...	0.05843059...	235.3	163.9	538.6	568.5	-4
1	75.7608333...	42.1094444...	0.06309430...	219.3	149.6	510.8	541.6	-3
1	75.7608333...	42.1094444...	0.06813608...	204.4	136.6	484.5	515.5	-3
1	75.7608333...	42.1094444...	0.07356123...	190.4	124.9	459.4	489.8	-3
1	75.7608333...	42.1094444...	0.07943014...	177.4	114.6	435.3	464.5	-3
1	75.7608333...	42.1094444...	0.08578083...	165.3	105.4	411.9	439.4	-3
1	75.7608333...	42.1094444...	0.09260847...	154	97.47	389	414.6	-2
1	75.7608333...	42.1094444...	0.1	143.5	90.51	366.2	390.4	-2
1	75.7608333...	42.1094444...	0.10797725...	133.8	84.42	343.5	366.9	-2
1	75.7608333...	42.1094444...	0.11659478...	124.7	79.09	320.9	344.1	-2
1	75.7608333...	42.1094444...	0.12588828...	116.3	74.4	298.5	322.3	-2
1	75.7608333...	42.1094444...	0.13593181...	108.6	70.22	276.6	301.4	-1
1	75.7608333...	42.1094444...	0.14677342...	101.3	66.48	255.4	281.5	-1
1	75.7608333...	42.1094444...	0.15849074...	94.57	63.07	235	262.5	-1
1	75.7608333...	42.1094444...	0.17112152...	88.28	59.94	215.6	244.5	-1
1	75.7608333...	42.1094444...	0.18477376...	82.38	57.03	197.3	227.2	-1
1	75.7608333...	42.1094444...	0.19952172...	76.83	54.28	180.1	210.7	-1
1	75.7608333...	42.1094444...	0.21546520...	71.61	51.65	164.3	194.9	-1
1	75.7608333...	42.1094444...	0.23262105...	66.69	49.13	149.7	179.9	-9
1	75.7608333...	42.1094444...	0.25118017...	62.05	46.67	136.4	165.5	-8
1	75.7608333...	42.1094444...	0.27126281...	57.69	44.28	124.4	151.9	-8
1	75.7608333...	42.1094444...	0.29285370...	53.6	41.93	113.7	139	-7
1	75.7608333...	42.1094444...	0.31622776...	49.78	39.83	104	127	-6

Рисунок 2.13 – Вид вкладки «Сводная таблица»

На рисунке 2.14 представлена диаграмма действий пользователя при работе с программой EDI2XLSX.

Таким образом, разработан и создан конвертер EDI2XLSX, который работает в интерактивном режиме и позволяет пользователю из заданных наборов edi-файлов оперативно формировать, просматривать и сохранять excel-таблицы, содержащие значения различных геофизических функций (вектор Визе-Паркинсона, компоненты тензора импеданса, фазовый тензор и его составляющие), а затем анализировать зависимости этих функций от периодов наблюдений с помощью построения псевдоразрезов (Рисунок 2.15) и отображений индукционных стрелок (Рисунок 2.16), а также анализировать зависимости этих функций от азимутов вращения системы координат с помощью полярных диаграмм (Рисунок 2.17). Построение рисунков 2.15-2.17 осуществлялось с помощью программы Surfer.

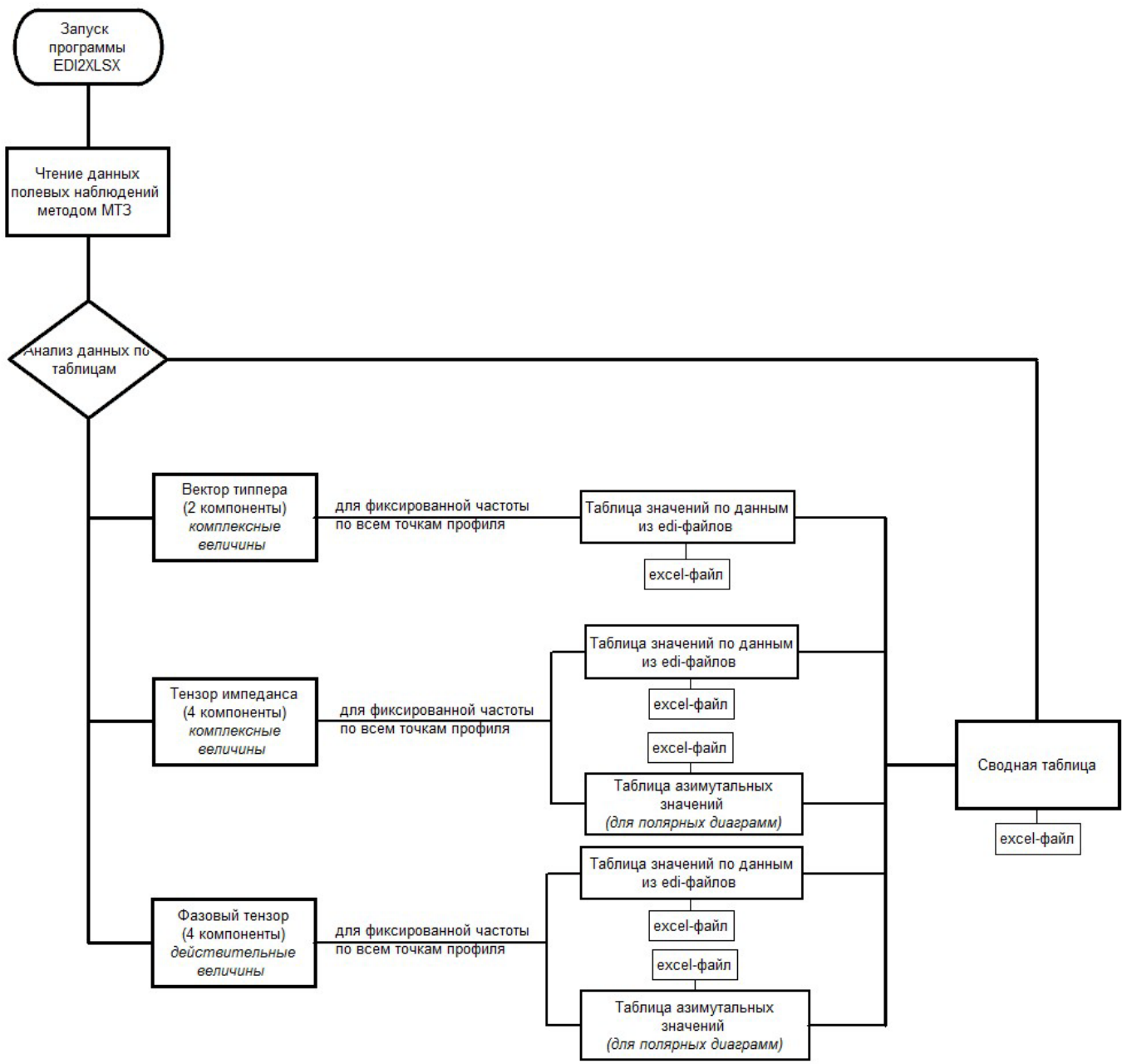


Рисунок 2.14 – Диаграмма действий пользователя

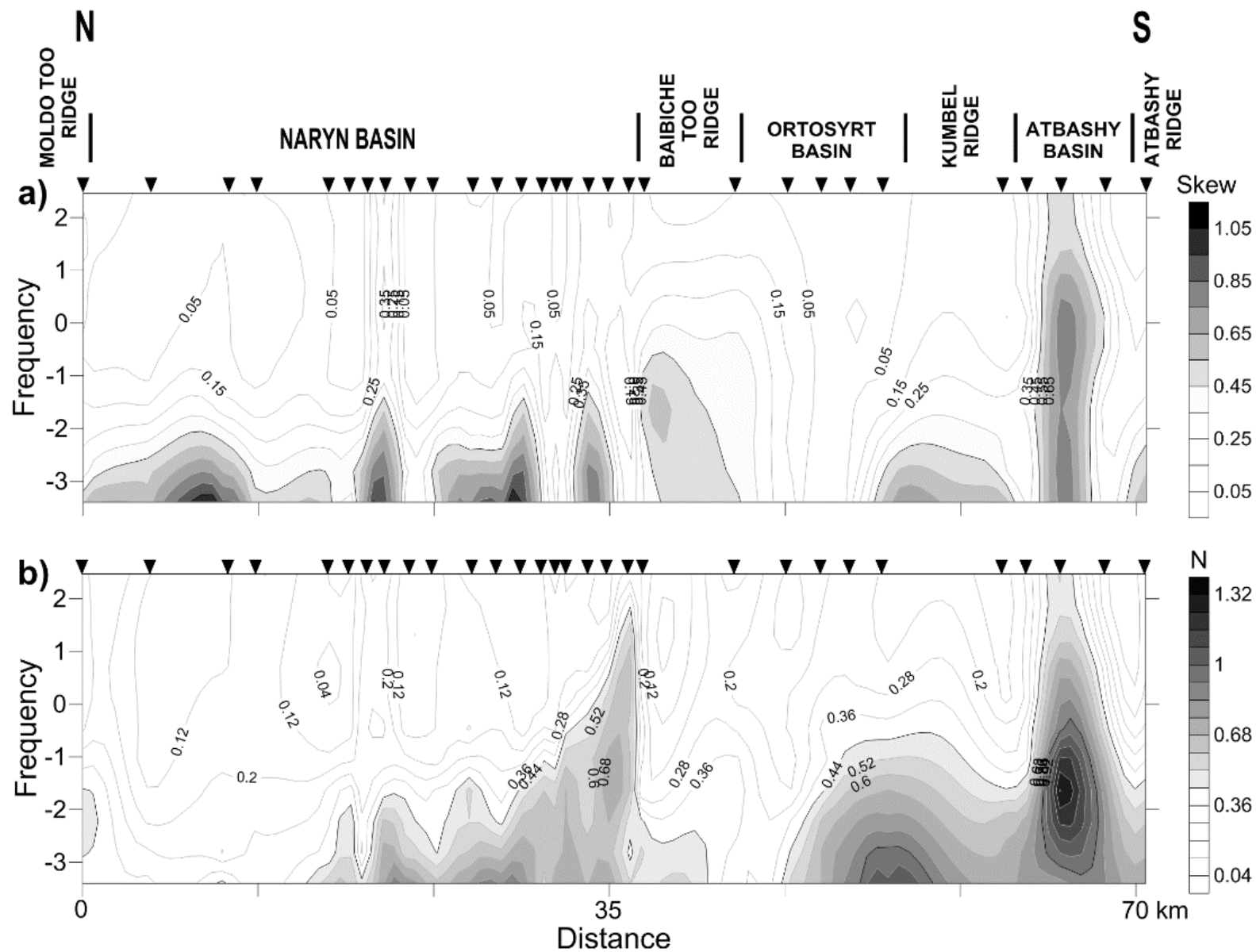


Рисунок 2.15 – Псевдоразрезы параметров неоднородности для МТ-профиля «Карабук»

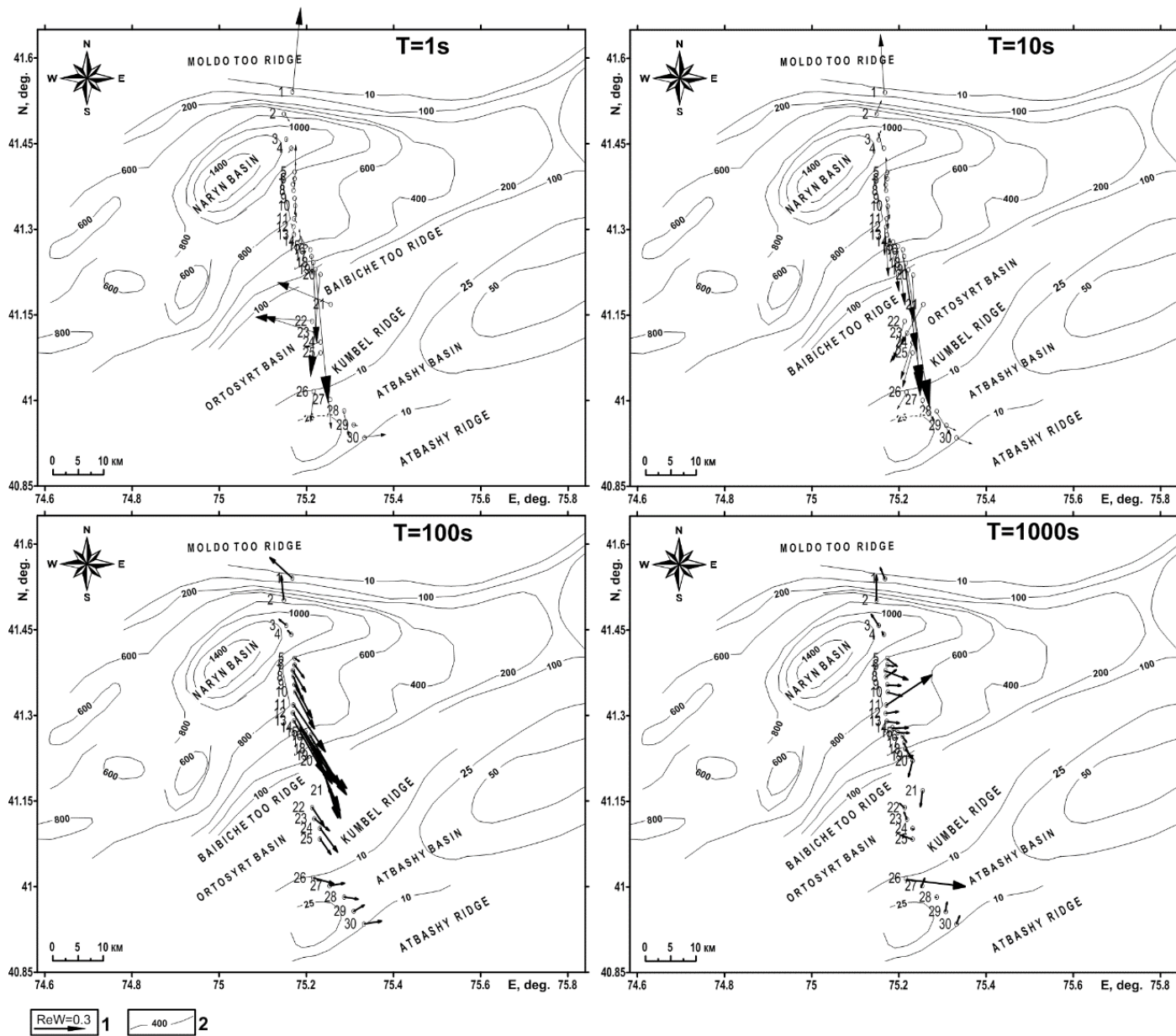


Рисунок 2.16 – Реальные вектора Визе для периодов 1, 10, 100, 1000 по МТ-профилю «Карабук»

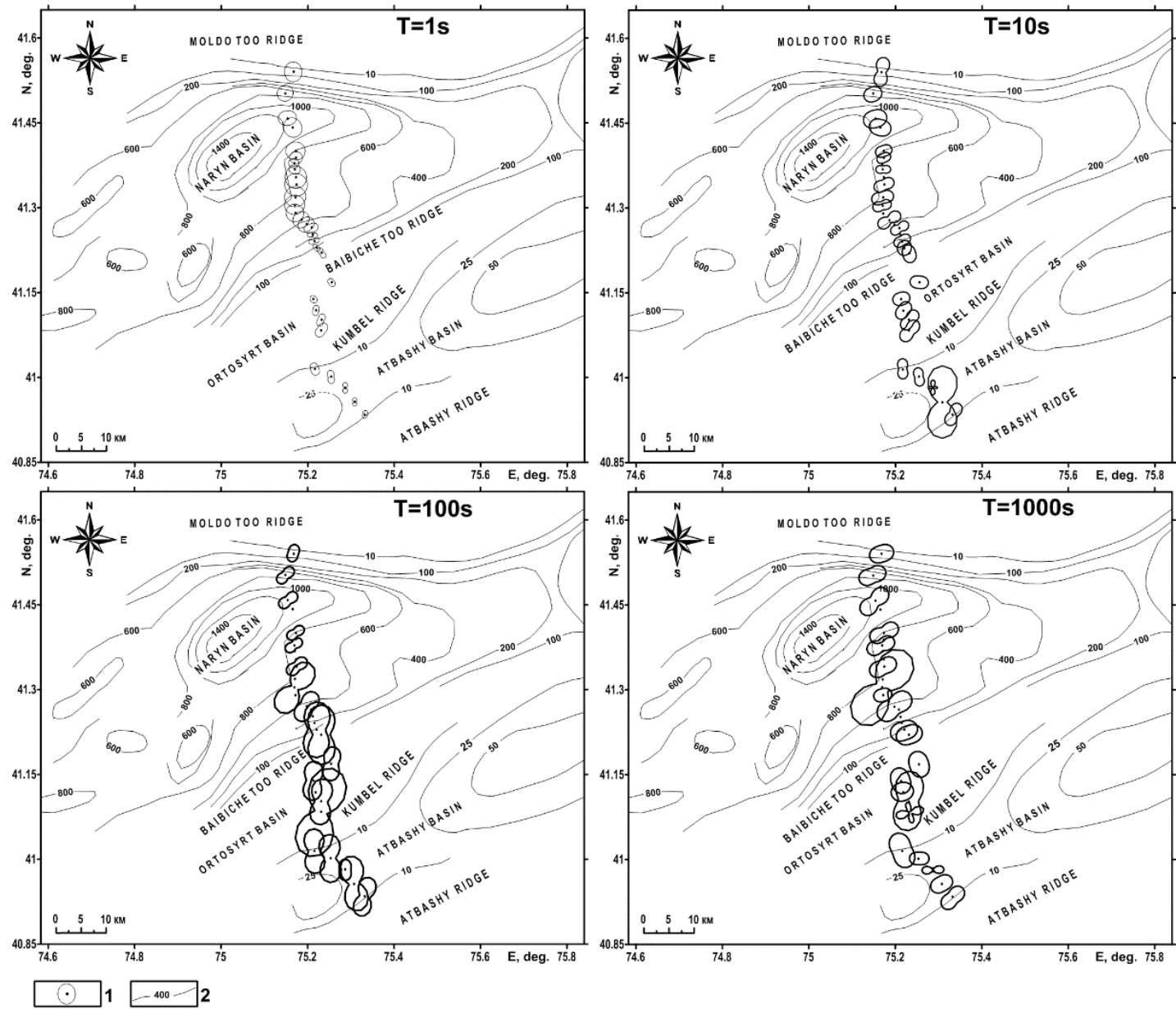


Рисунок 2.17 – Полярные диаграммы фазового тензора для периодов 1, 10, 100, 1000 с по профилю «Карабук»

3 ПРОГРАММЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ, К ПРОВЕДЕНИЮ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

В работе [7] была предложена обобщенная математическая основа для вычисления определителя матрицы Якоби, встречающейся при решении обратных задач, связанных с геофизическими исследованиями строения Земли электромагнитными методами. В предложенном подходе, основанном на дискретизации прямой задачи, вычисления разделяются на компоненты (функционалы данных, прямые и сопряженные вычислительные блоки, преобразователи модельных параметров) и выявляется их зависимость друг от друга в рамках численных экспериментов с реальными данными. Для конкретности авторы рассматривали двумерные (2D) и трехмерные (3D) обратные задачи магнитотеллурического зондирования (МТЗ), несмотря на то, что методика может быть использована также и для широкого круга других электромагнитных методов.

На основе разработанных алгоритмов было создано программное обеспечение ModEM (the Modular system for Electromagnetic inversion) [8]. Программа ModEM написана на языке программирования Fortran 95 и представляет собой гибкий инструмент, позволяющий моделировать электромагнитные явления, связанные с процессом магнитотеллурического зондирования. Программный продукт распространяется свободно при условии некоммерческого использования, помимо расчетного модуля включает в себя комплект соответствующей документации, примеры, иллюстрирующие работу предложенных алгоритмов, а также некоторые дополнительные скрипты Matlab, предназначенные для конвертации и обработки полученных данных.

Для анализа и интерпретации полевых данных, полученных методом магнитотеллурического зондирования Научной станции РАН в г. Бишкеке использовалась программа 2D инверсии Rodi-Mackie [9], наиболее известная и распространенная в настоящее время в мировом геофизическом сообществе. Поэтому применение альтернативного программного обеспечения ModEM, позволяющего решать как 2D, так и 3D обратные задачи МТЗ, представило особый интерес для НС РАН.

При освоении программного продукта ModEM возникла необходимость в создании интерактивного вспомогательного инструмента, который бы позволил из набора стандартных edf-файлов оперативно получать соответствующий требованиям программы dat-файл [10], содержащий все необходимые исходные данные.

3.1 Руководство программиста

Создание конвертера EDI2DAT осуществлялось в среде Microsoft Visual Studio 2010 – программной среде, которая позволяет разработчикам достаточно легко создавать приложения различной сложности для работы в операционной системе Windows. Код программы написан на объектно-ориентированном языке программирования C#. При проектировании интерфейса программы использовались стандартные элементы управления Microsoft Visual Studio 2010, которые позволили разработать интерактивный графический интерфейс

Программа использует следующие пространства имен: System, System.Collections.Generic, System.Drawing, System.Text, System.Windows.Forms, System.IO, ZedGraph.

Согласно [10], файл с входными данными для программы ModEM (dat-файл) может содержать один или несколько информационных блоков. Каждый из таких блоков соответствует одному типу данных и содержит восьмистрочный заголовок, за которым следует информация, необходимая для расчетов. Кратко опишем требования к формату представления данных в dat-файле, учтенные в EDI2DAT.

Заголовок блока состоит из восьми строк:

Первая строка – строка с комментарием описательного характера, она копируется программой ModEM и вставляется в файл с результатами. Максимальный размер строки – 100 символов. Например,

```
# Ukok profile_2016,april
```

Вторая строка – строка с комментарием, описывающая формат данных в файле, игнорируется кодом программы ModEM. Например,

```
# Period(s) Code GG_Lat GG_Lon X(m) Y(m) Z(m) Component Real Image Error
```

Третья строка – строка, содержащая ключевое слово по пределению типа данных, используемых для решения задач инверсии. Например,

```
> TE_Impedance
```

Четвертая строка – конкретизация знака: программа ModEM проверяет наличие минуса в строке – это необходимо для выбора того или иного режима работы алгоритма программы. Например,

```
> exp(+iwt) или #exp(-iwt)
```

Пятая строка – единица измерения соответствующего магнитотеллурического параметра (импеданса). Например,

```
> [mV/km]/[nT]
```

Шестая строка – географическая ориентация (угол поворота) всех используемых компонент относительно географического севера. Эта информация не используется кодом программы ModEM и включена в заголовок файла лишь для удобства пользователя. Например,
> 0.00

Седьмая строка - географические координаты точки, соответствующей точке (0, 0, 0) в файле. Не используется кодом программы ModEM, но удобно при визуализации результатов. Если значение неизвестно, можно заменить его нулевым значением. Например,
> 45.276 -119.634

Восьмая строка – максимальное количество периодов и точек (пунктов наблюдений) для всего блока данных. Например,
> 10 109

Далее за заголовком следуют непосредственно числовые данные в порядке, соответствующем второй строке заголовка. Внешний вид содержимого dat-файла приведен на рисунке 3.1.

```
# Model for 2D inverse
# Period(s) Code GG_Lat GG_Lon X(m) Y(m) Z(m) Component Real Imag Error
> TE_Impedance
> exp(+i*pi*t)
> [V/m]/[T]
> 0.000
> 0 0
> 21 22
1.000000E-02 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 4.161000E+05 4.316000E+05 5.995146E+04
1.584786E-02 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 3.304000E+05 3.477000E+05 4.796451E+04
2.511932E-02 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 2.559000E+05 2.816000E+05 3.805041E+04
3.980892E-02 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 1.923000E+05 2.248000E+05 2.958282E+04
6.309148E-02 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 1.426000E+05 1.745000E+05 2.253553E+04
1.000000E-01 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 1.072000E+05 1.319000E+05 1.699690E+04
1.584786E-01 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 8.332000E+04 9.866000E+04 1.291357E+04
2.511932E-01 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 6.678000E+04 7.447000E+04 1.000267E+04
3.980892E-01 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 5.434000E+04 5.759000E+04 7.917982E+03
6.309148E-01 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 4.405000E+04 4.561000E+04 6.340879E+03
1.000000E+00 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 3.528000E+04 3.675000E+04 5.094351E+03
1.584786E+00 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 2.779000E+04 3.005000E+04 4.093027E+03
2.511932E+00 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 2.124000E+04 2.482000E+04 3.266757E+03
3.980892E+00 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 1.539000E+04 2.049000E+04 2.562601E+03
6.309148E+00 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 1.043000E+04 1.655000E+04 1.956240E+03
1.000000E+01 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 6.637000E+03 1.270000E+04 1.432968E+03
1.584786E+01 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 4.105000E+03 9.225000E+03 1.009711E+03
2.511932E+01 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 2.582000E+03 6.537000E+03 7.028449E+02
3.980892E+01 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 1.688000E+03 4.554000E+03 4.856775E+02
6.309148E+01 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 1.146000E+03 3.127000E+03 3.330382E+02
1.000000E+02 01 0.0000 0.0000 0.000 213600.000 0.000 TE 8.122000E+02 2.138000E+03 2.287075E+02
1.000000E-02 02 0.0000 0.0000 0.000 213819.000 0.000 TE 3.957000E+05 4.466000E+05 5.966825E+04
1.584786E-02 02 0.0000 0.0000 0.000 213819.000 0.000 TE 3.237000E+05 3.640000E+05 4.871116E+04
2.511932E-02 02 0.0000 0.0000 0.000 213819.000 0.000 TE 2.538000E+05 2.924000E+05 3.871850E+04
3.980892E-02 02 0.0000 0.0000 0.000 213819.000 0.000 TE 1.912000E+05 2.297000E+05 2.988637E+04
6.309148E-02 02 0.0000 0.0000 0.000 213819.000 0.000 TE 1.416000E+05 1.761000E+05 2.259685E+04
1.000000E-01 02 0.0000 0.0000 0.000 213819.000 0.000 TE 1.070000E+05 1.324000E+05 1.702315E+04
1.584786E-01 02 0.0000 0.0000 0.000 213819.000 0.000 TE 8.365000E+04 9.838000E+04 1.291354E+04
2.511932E-01 02 0.0000 0.0000 0.000 213819.000 0.000 TE 6.717000E+04 7.395000E+04 9.990201E+03
3.980892E-01 02 0.0000 0.0000 0.000 213819.000 0.000 TE 5.459000E+04 5.731000E+04 7.914862E+03
6.309148E-01 02 0.0000 0.0000 0.000 213819.000 0.000 TE 4.415000E+04 4.558000E+04 6.345675E+03
1.000000E+00 02 0.0000 0.0000 0.000 213819.000 0.000 TE 3.517000E+04 3.681000E+04 5.091076E+03
1.584786E+00 02 0.0000 0.0000 0.000 213819.000 0.000 TE 2.746000E+04 2.997000E+04 4.064791E+03
2.511932E+00 02 0.0000 0.0000 0.000 213819.000 0.000 TE 2.092000E+04 2.455000E+04 3.225444E+03
3.980892E+00 02 0.0000 0.0000 0.000 213819.000 0.000 TE 1.538000E+04 2.002000E+04 2.524569E+03
6.309148E+00 02 0.0000 0.0000 0.000 213819.000 0.000 TE 1.083000E+04 1.597000E+04 1.929585E+03
1.000000E+01 02 0.0000 0.0000 0.000 213819.000 0.000 TE 7.233000E+03 1.237000E+04 1.432945E+03
1.584786E+01 02 0.0000 0.0000 0.000 213819.000 0.000 TE 4.637000E+03 9.274000E+03 1.036865E+03
2.511932E+01 02 0.0000 0.0000 0.000 213819.000 0.000 TE 2.885000E+03 6.734000E+03 7.325980E+02
3.980892E+01 02 0.0000 0.0000 0.000 213819.000 0.000 TE 1.797000E+03 4.739000E+03 5.068267E+02
6.309148E+01 02 0.0000 0.0000 0.000 213819.000 0.000 TE 1.186000E+03 3.256000E+03 3.465275E+02
1.000000E+02 02 0.0000 0.0000 0.000 213819.000 0.000 TE 8.316000E+02 2.221000E+03 2.371582E+02
```

Рисунок 3.1 – Пример dat-файла

3.2 Руководство пользователя

Далее кратко опишем возможности программы EDI2DAT.exe.

Рабочее окно программы содержит четыре вкладки: «Исходные данные», «Профиль», «Формирование dat-файла», «Числовые данные».

При запуске EDI2DAT.exe активируется вкладка «Исходные данные» (Рисунок 3.2).

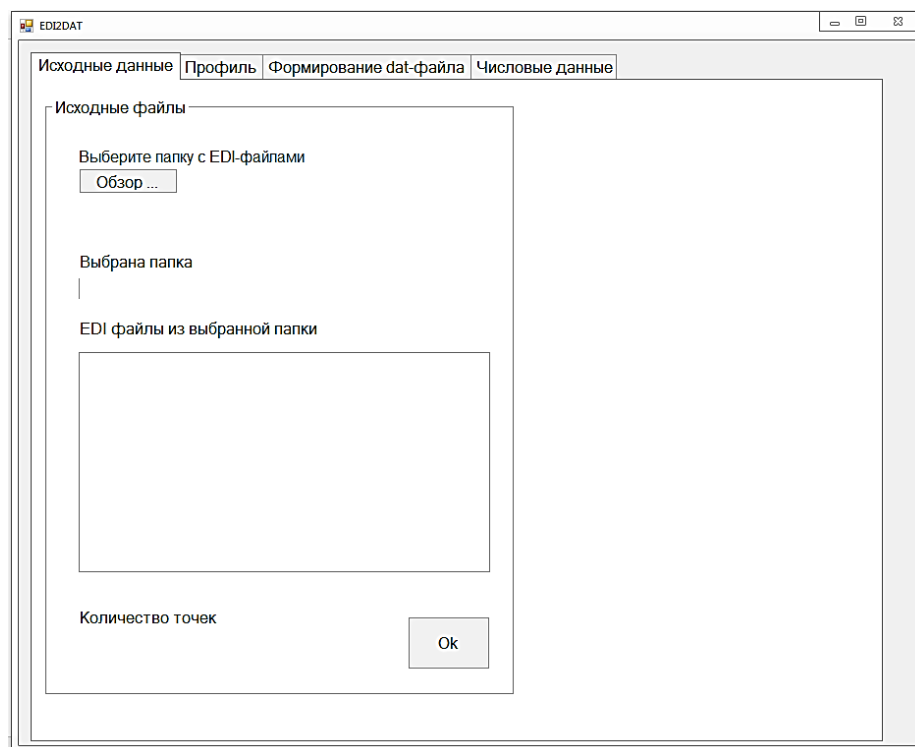


Рисунок 3.2 – Рабочее окно программы с активной вкладкой «Исходные данные»

По щелчку на кнопку «Обзор» открывается диалоговое окно, с помощью которого пользователь может выбрать нужную папку, содержащую исходные edi-файлы (Рисунок 3.3). При этом считается, что папка с edi-файлами соответствует профильному зондированию, то есть каждый файл с данными из этой папки соответствует одному из пунктов наблюдения вдоль выбранного профиля.

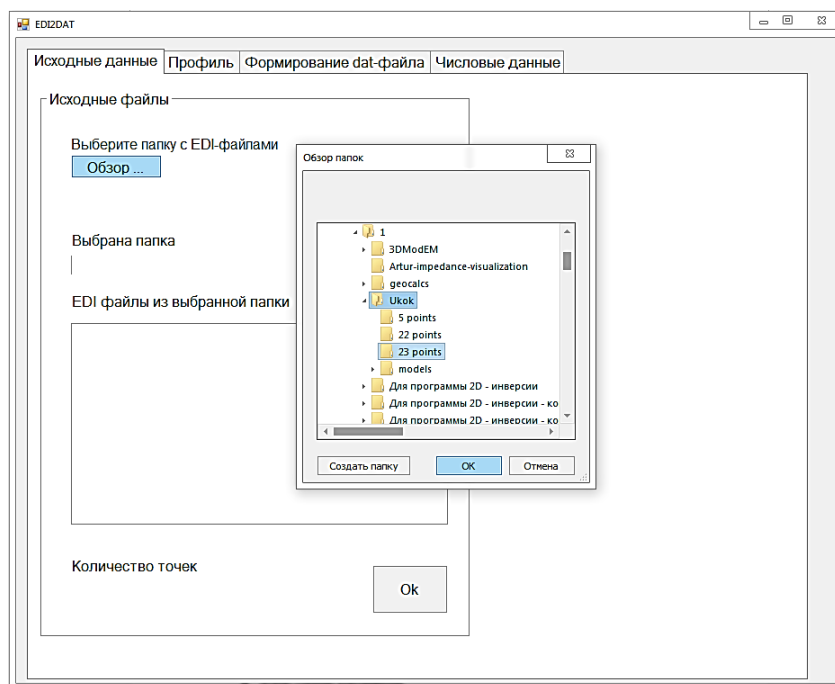


Рисунок 3.3 – Выбор папки с исходными edi-файлами

После нажатия на кнопку «ОК» диалогового окна во вкладке «Исходные данные» отображается адрес папки, из которой выбирались edi-файлы, список самих файлов, выбранных для работы, и их количество (Рисунок 3.4). В том случае, если пользователем для работы была выбрана папка, не содержащая edi-файлов, появляется соответствующее уведомление о необходимости изменить выбор (Рисунок 3.5).

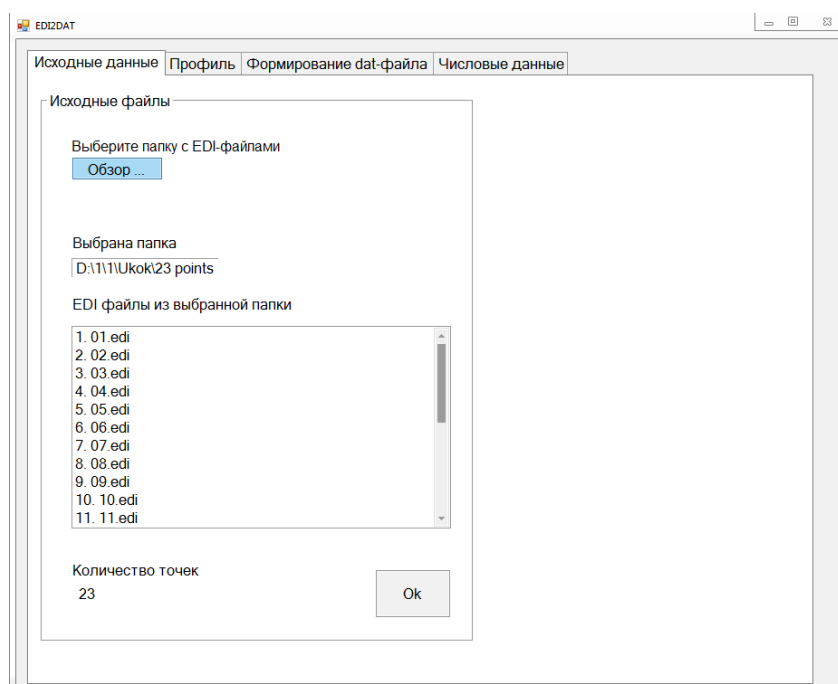


Рисунок 3.4 – Список выбранных edi-файлов

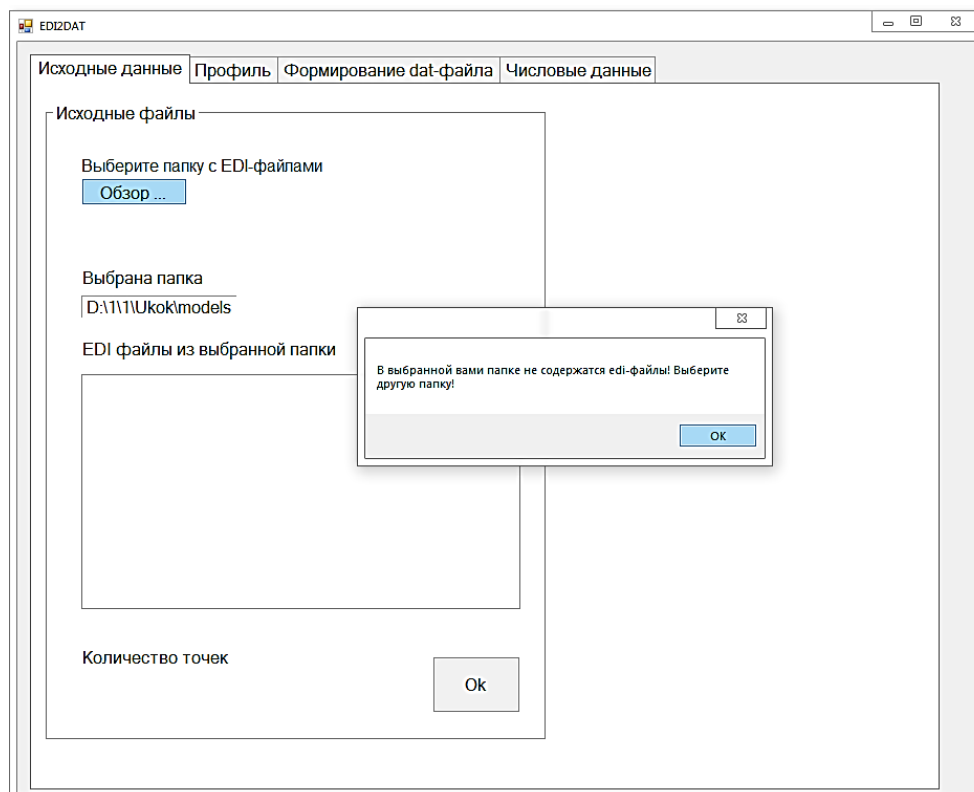


Рисунок 3.5 – Уведомление о необходимости выбрать другую папку с исходными файлами

После того, как набор edi-файлов сформирован, необходимо нажать кнопку «Ok», при этом программа перейдет к работе во второй вкладке «Профиль».

Вкладка «Профиль» рабочего окна содержит три рабочих раздела: «Профиль», «Схема профиля», «Частотный диапазон». В разделе «Профиль» имеется таблица, с помощью которой пользователь может ознакомиться со следующей информацией о пунктах МТЗ-наблюдений: географические координаты точки (широта и долгота – в градусах), высота над уровнем моря (в метрах), а также число периодов (частот), на которых были произведены измерения (Рисунок 3.6).

EDIZDAT

Исходные данные | Профиль | Формирование dat-файла | Числовые данные

Профиль | Схема профиля | Частотный диапазон

Точка	Широта (LAT)	Долгота (LONG)	Высота (H)	Число периодов
1	42.10944444...	75.76083333...	2681	85
2	42.11111111...	75.75888888...	2644	84
3	42.11416666...	75.75527777...	2581	89
4	42.11638888...	75.75416666...	2550	89
5	42.11777777...	75.75277777...	2507	85
6	42.11888888...	75.75138888...	2479	89
7	42.12	75.74944444...	2450	89
8	42.12111111...	75.74888888...	2437	86
9	42.12194444...	75.74805555...	2421	89
10	42.12361111...	75.74666666...	2388	89
11	42.12472222...	75.74555555...	2373	86
12	42.12638888...	75.74527777...	2354	86
13	42.12722222...	75.745	2335	87
14	42.12861111...	75.745	2317	86
15	42.13027777...	75.745	2296	86
16	42.13166666...	75.74527777...	2281	89
17	42.13333333...	75.74527777...	2258	85
18	42.13527777...	75.74555555...	2231	89
19	42.13722222...	75.74638888...	2206	85
20	42.13861111...	75.74638888...	2197	89
21	42.14027777...	75.74666666...	2176	80

Наибольшее число периодов: 89
 Наименьшее число периодов: 84

Рисунок 3.6 – Просмотр базовой информации о пунктах, в которых проводились МТЗ-наблюдения.

Раздел «Схема профиля» содержит схематичное отображение выбранных точек профиля в географической системе координат (Рисунок 3.7).

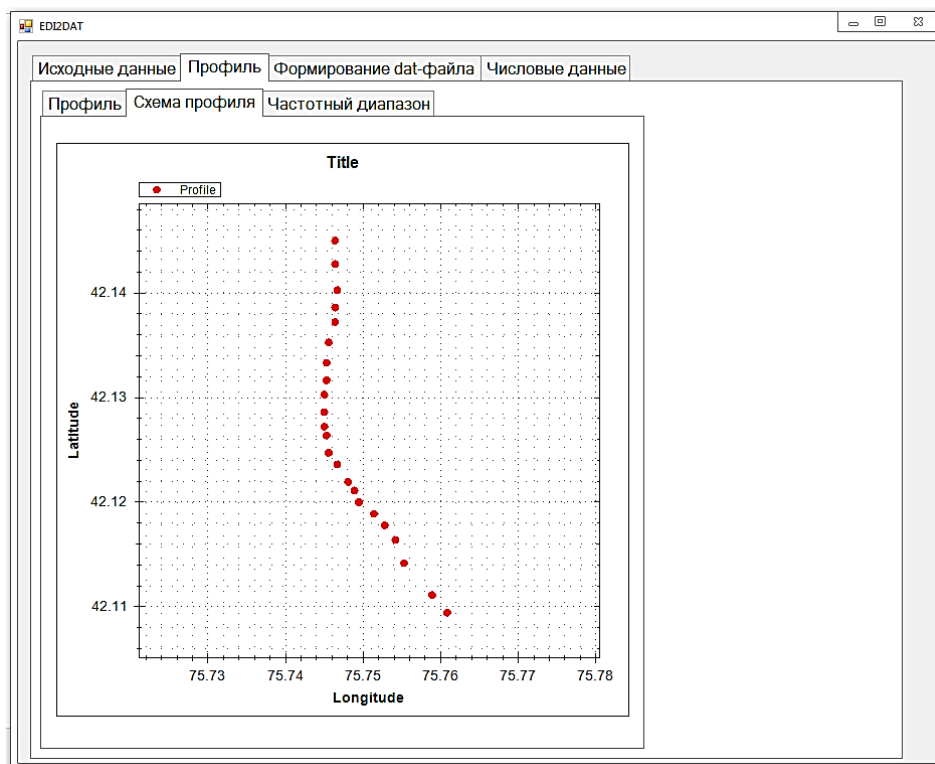


Рисунок 3.7 – Схема профиля

В разделе «Частотный диапазон» пользователь должен выбрать наибольшую (F_{max}) и наименьшую (F_{min}) частоты (периоды), которые будут задействованы при формировании dat-файла. При этом осуществляется возможность выбора режима задания частотного диапазона:

- *выбрать все частоты из указанного диапазона*

В этом случае набор выбранных частот представляет собой часть исходного набора частот – пользователь может варьировать значения верхней и нижней границ диапазона (Рисунок 3.8).

- *выбрать частоты из диапазона через N*

В этом случае набор выбранных частот формируется из исходного набора, но пользователь может варьировать значение шага N . Выборка производится по индексам частот в общем списке. Например, если $N=3$, то будут выбраны частоты из всего диапазона через 3: 1, 5, 9, 13 и т.д. (Рисунки 3.9.а, 3.9.б).

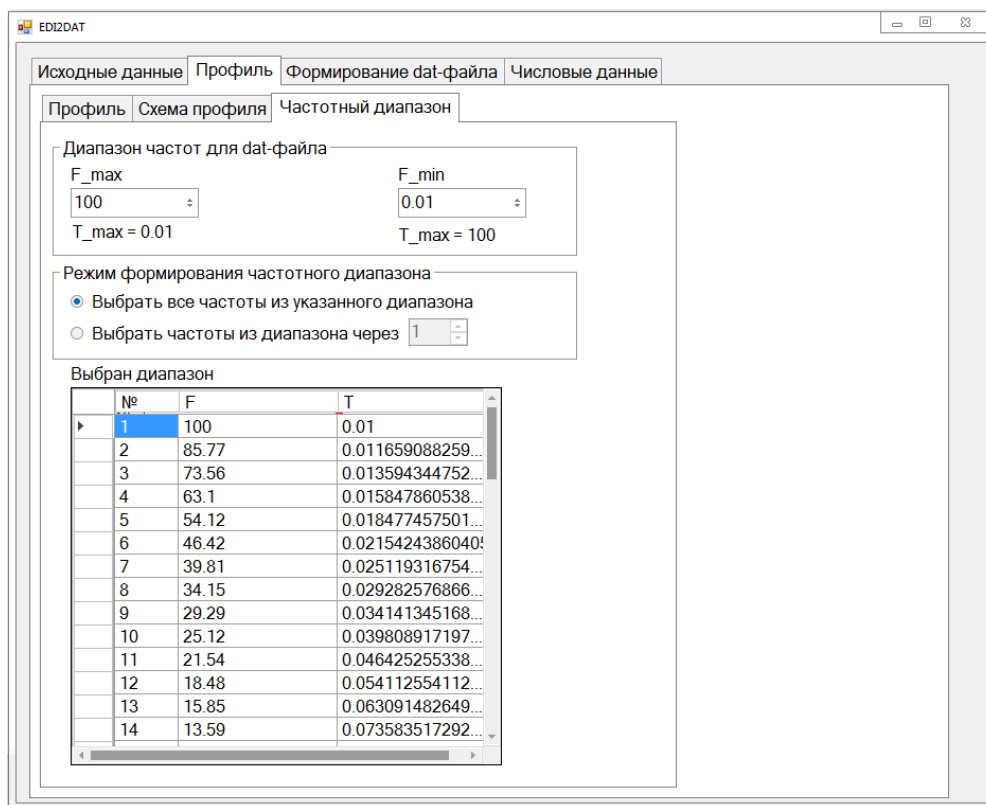


Рисунок 3.8 – Формирование набора частот: выбираются все частоты из выбранного пользователем диапазона

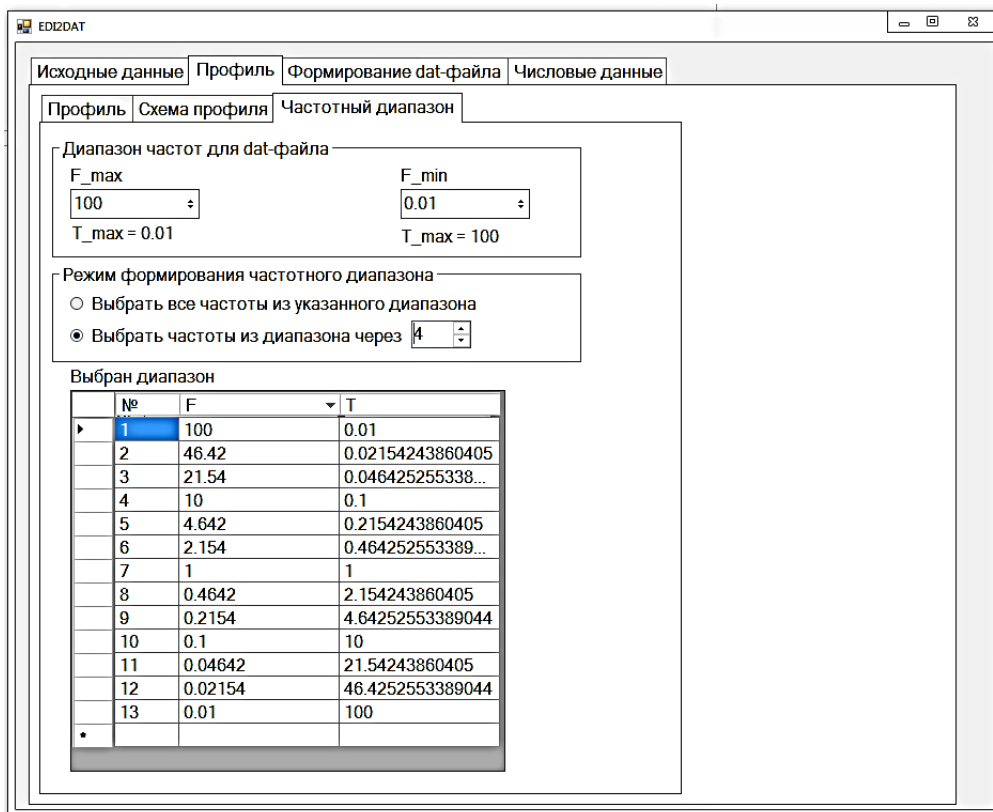


Рисунок 3.9.а – Формирование набора частот: из выбранного пользователем диапазона частоты выбираются с шагом N=4

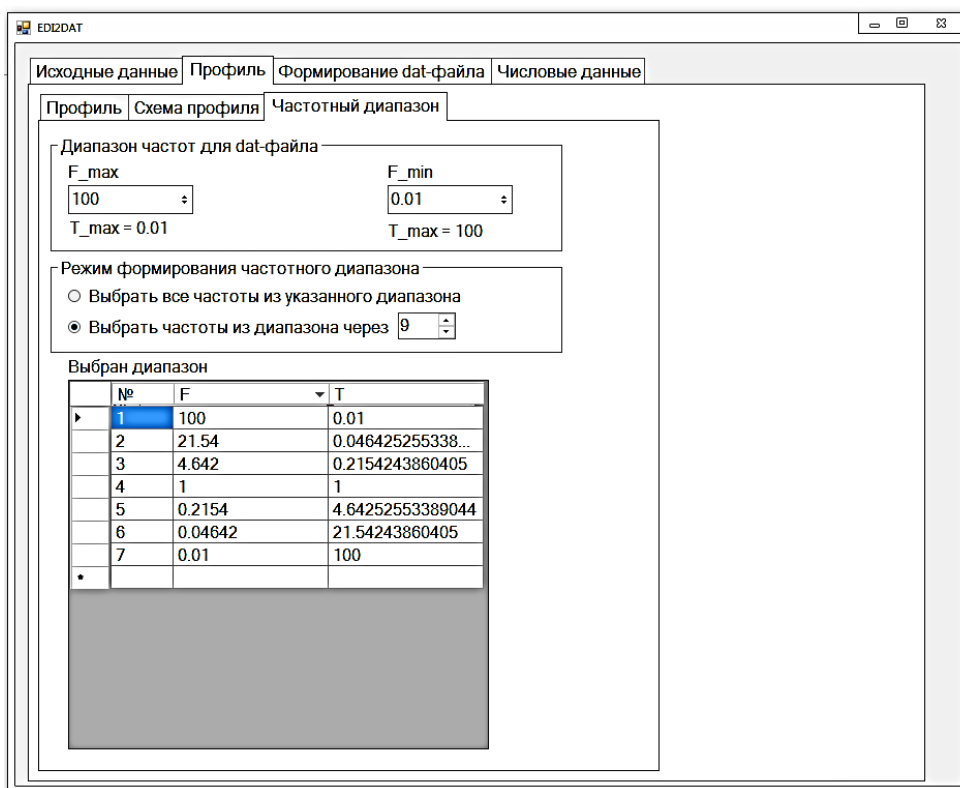


Рисунок 3.9.б – Формирование набора частот: из выбранного пользователем диапазона частоты выбираются с шагом N=9

Следующим шагом необходимо перейти во вкладку «Формирование dat-файла», где заполняются все информационные поля (строки заголовка) и после щелчка левой кнопкой мыши на соответствующую кнопку генерируются файлы с входными данными для программы ModEM (Рисунок 3.10).

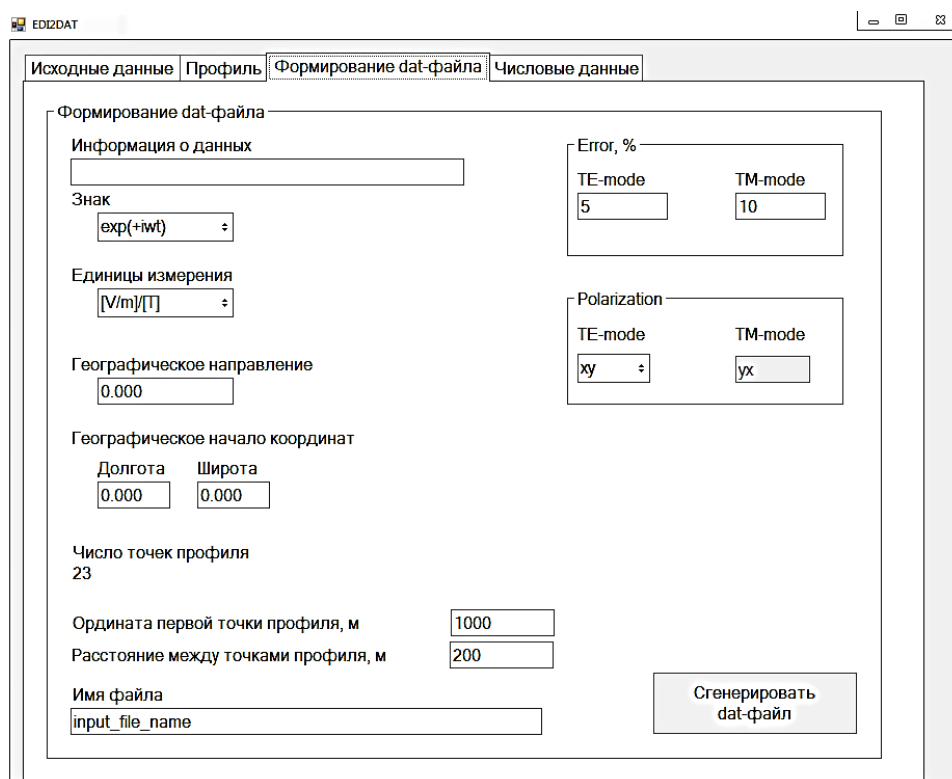


Рисунок 3.10 – Вид вкладки «Формирование dat-файла»

Во вкладке «Числовые данные» у пользователя есть возможность просмотра всех значений магнитотеллурических функций, которые были считаны из edi-файлов. Также пользователь при желании может задать угол относительно географического севера, на который была повернута измерительная установка (Рисунок 3.11), и по формулам (3.1)-(3.4) рассчитать соответствующие азимутальные значения тензора импеданса [5]:

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

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

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

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

После этого можно сгенерировать dat-файл с полученными значениями (Рисунок 3.12).

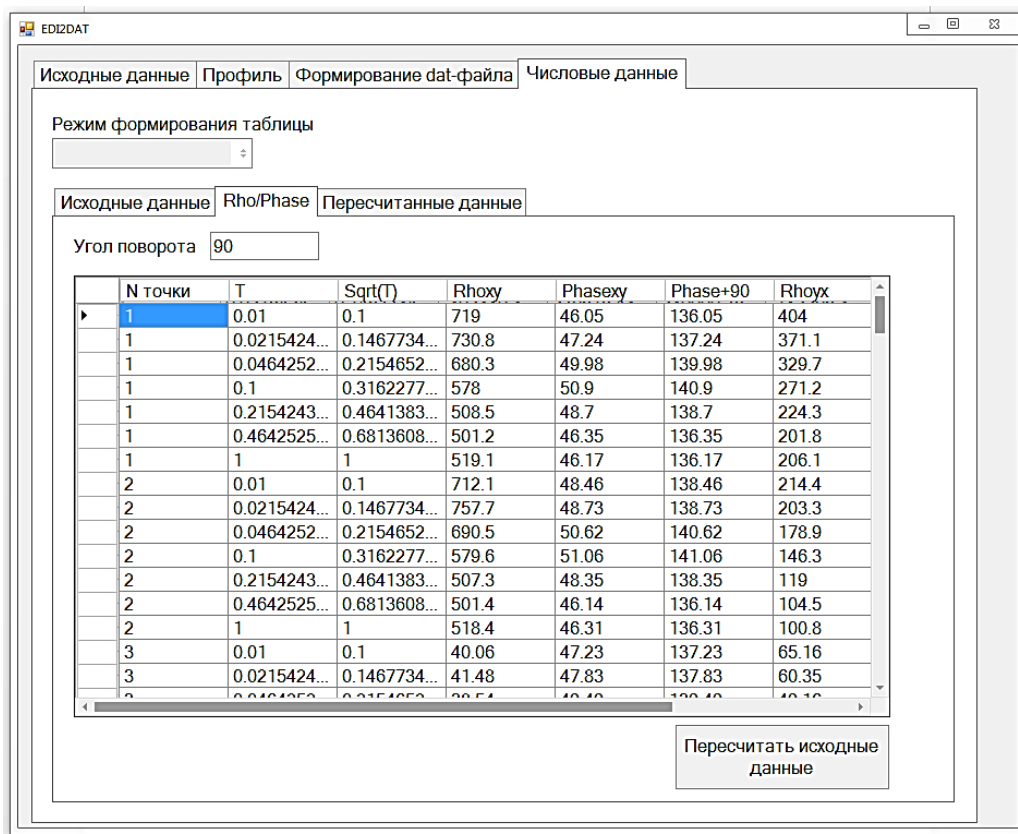


Рисунок 3.11 – Вид вкладки «Числовые данные»

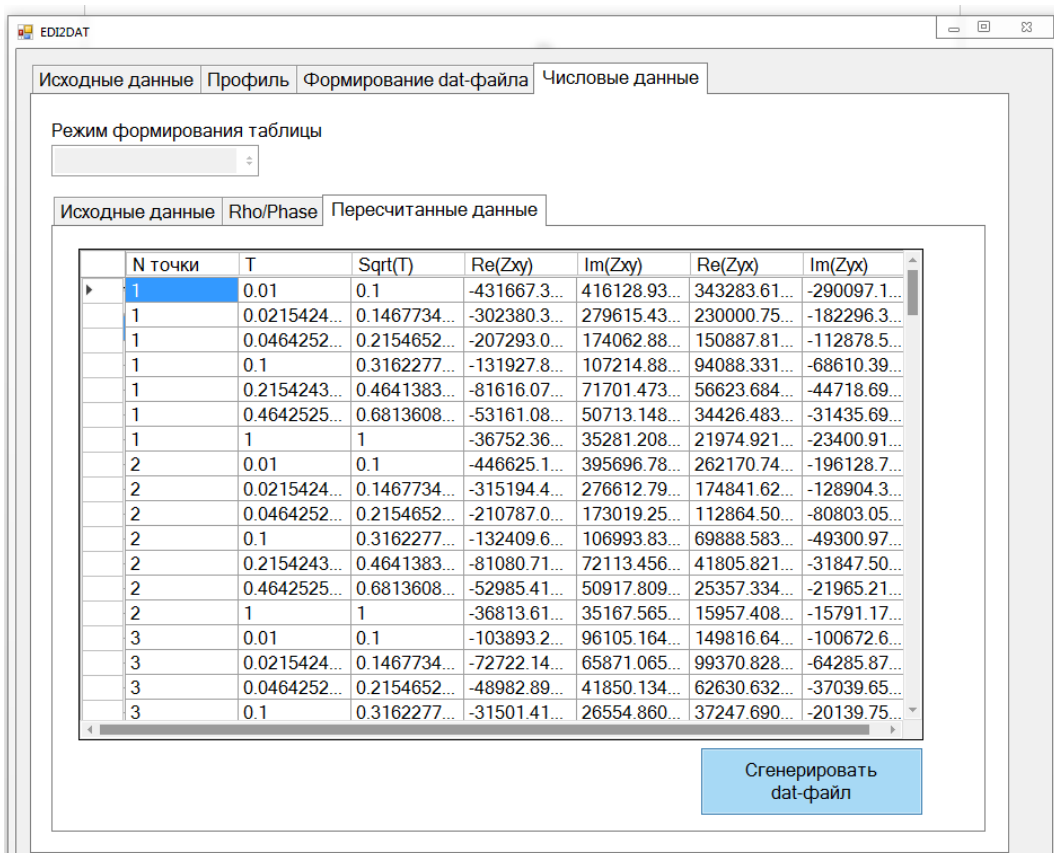


Рисунок 3.12 – Генерация нового dat-файла

3.3 Визуализация

Для наглядного представления результатов работы программы ModEM необходимо осуществить визуализацию ее входных и выходных данных.

В случае, когда программа работает в режиме 2D-инверсии данных МТ-измерений профиля, входными данными являются:

- априорная ячеистая модель распределения сопротивлений;
- значения импеданса по модам ТЕ и ТМ для определенного набора периодов электромагнитных волн в каждой измеренной точке профиля.

Выходными данными является:

- итоговая ячеистая модель распределения сопротивлений.

Визуализация мод импеданса. При визуализации данных мод импеданса нужно создавать отдельные графические построения для моды ТЕ и для моды ТМ. Каждое из таких построений, в свою очередь, состоит из двух традиционно располагаемых друг над другом частей – карт распределения амплитуды и фазы моды импеданса в зависимости от периода и от положения соответствующей точки на профиле. По горизонтальной оси откладывается расстояние вдоль профиля, по вертикальной – период в логарифмическом масштабе. Значения амплитуды (в логарифмическом масштабе) и фазы моды импеданса показываются цветом заливки.

Подлежащие визуализации данные импеданса хранятся в одном файле, разбитом на две секции одинакового формата, хранящие значения импеданса по модам ТЕ и ТМ соответственно. Каждая секция состоит из двух строк комментария, шести строк заголовка и определяемого заголовком количества строк данных. Строки заголовка включают:

- тип данных;
- соглашение о знаке;
- единицы измерения;
- ориентация системы отсчета тензора импеданса;
- географические координаты точки отсчета профиля;
- количество периодов (*nper*) и точек измерений (*nsit*).

Затем следуют непосредственно строки данных, каждая из которых состоит из следующих полей:

- значение периода;
- название точки измерений;
- 2 поля – географические координаты точки;

- 3 поля – декартовы координаты точки относительно начала профиля (ось Y направлена вдоль профиля, ось Z направлена вниз, начало координат соответствует положению начального угла начальной ячейки модели сопротивлений);
- название компоненты данных (в данных моды TE есть только компонента « TE », в данных моды TM есть только компонента « TM »);
- 2 поля – значение действительной и мнимой части компоненты;
- оцененная ошибка значений компоненты.

В нормальных случаях для всех точек измерений наборы периодов совпадают, что позволяет сохранять значения моды импеданса в двумерном массиве, одна из размерностей которого соответствует порядковому номеру станции, а другая – порядковому номеру периода.

Для визуализации мод импеданса, хранящихся в файлах такого формата, были написаны matlab-функции *load_imped_resp* и *plot_imped_resp*. Функция *load_imped_resp* принимает один аргумент – имя файла и возвращает структуру *RESP*, содержащую поля *TE* и *TM*, каждое из которых в свою очередь является структурой, содержащей следующие поля:

- *APPRES2D* – вышеописанный двумерный массив комплексных значений моды;
- *Y2D* – одномерный массив Y -координат точек измерений;
- *Z2D* – одномерный массив Z -координат точек измерений;
- *NAMES* – одномерный cell-массив названий точек измерений;
- *P2D* – одномерный массив значений периодов.

Затем структура *RESP* передается в функцию *plot_imped_resp*, которая создает 2 объекта *figure*, содержащие вышеописанные графические построения мод *TE* и *TM*. Соответствие цвета заливки значениям десятичного логарифма амплитуды относительно пределов $[0; 3.5]$ и фазы относительно пределов $[0; 90]$ задается массивом цветов, возвращаемым разработанной matlab-функцией *colmap_sur*.

Визуализация ячеистой модели сопротивлений. Для визуализации ячеистой модели сопротивлений обычно используется одно графическое построение – карта значений сопротивления в ячейках разреза, построенного вдоль профиля. По горизонтальной оси откладывается расстояние вдоль профиля, по вертикальной оси – глубина. Область построения разбивается на ячейки в соответствии с ячейками модели и цветом заливки каждой ячейки показывается логарифм значения сопротивления в ней.

Подлежащая визуализации модель хранится в файле следующего формата:

- строка, содержащая количество ячеек вдоль профиля (ny), количество ячеек в глубину (nz) и формат представления значений сопротивления (само значение (по умолчанию) или его натуральный логарифм (строка «LOGE»));
- расположенные на нескольких строках ny значений, показывающие размеры ячеек по оси Y;
- расположенные на нескольких строках nz значений, показывающие размеры ячеек по оси Z;
- строка, содержащая значение 0;
- nz групп строк, каждая группа описывает один горизонтальный ряд ячеек, ряды приведены в порядке от меньших значений координаты Z к большим, каждый ряд содержит ny значений, показывающих сопротивления ячеек этого ряда, ячейки в ряду следуют в порядке от меньших значений координаты Y к большим.

Для чтения файла такого формата использовалась поставляемая с программным комплексом 3DmodEM matlab-функция `read_mackie2d_model`, принимающая имя файла, содержащего модель, и возвращающая набор значений:

- y – одномерный массив размеров ячеек по оси Y;
- z – одномерный массив размеров ячеек по оси Z;
- ρ – двумерный массив значений сопротивлений ячеек;
- $type$ – строка, показывающая находятся ли в массиве ρ сами значения сопротивлений ('LINEAR') или натуральные логарифмы их значений ('LOGE').

Для визуализации модели на основе этих данных была написана matlab-функция `plot_rho_model`, принимающая помимо упакованных в структуру MODEL значений, возвращаемые функцией `read_mackie2d_model`, также и описанную выше структуру RESP для отображения положения точек наблюдений относительно модели, и структуру OPTIONS, поля которой содержат настройки визуализации:

- y_{lim} – массив из двух значений – границы отображаемой части модели по координате Y;
- z_{lim} – массив из двух значений – границы отображаемой части модели по координате Z;
- $grid$ – цвет линий сетки, разделяющих ячейки модели на графическом построении;
- eq_axis – флаг эквивалентности масштаба по осям Y и Z.

В итоге скрипт создает объект `figure`, содержащие вышеописанное графическое построение модели сопротивлений. Соответствие цвета заливки значениям десятичного логарифма сопротивления относительно пределов [0; 3.5] задается массивом цветов, возвращаемым разработанной matlab-функцией `colmap_sur`.

Таким образом, процесс работы вышеупомянутых matlab-функций можно описать в виде диаграммы потоков данных (DFD), представленной на рисунке 3.13.

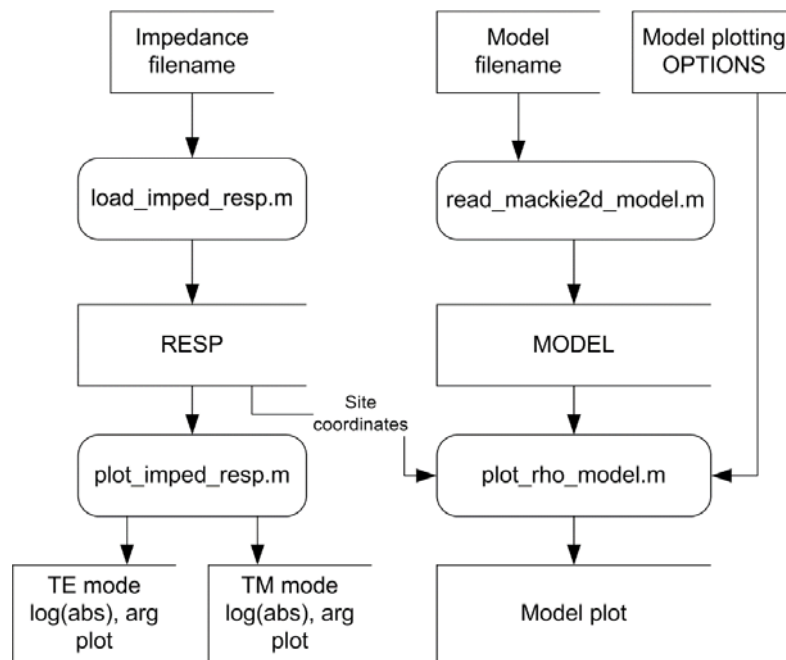


Рисунок 3.13 – Диаграмма потоков данных, описывающих процесс работы matlab-функций

На рисунке 3.14 представлен пример визуализации решения обратной двумерной задачи магнитотеллурического зондирования, полученного с помощью программы ModEM.

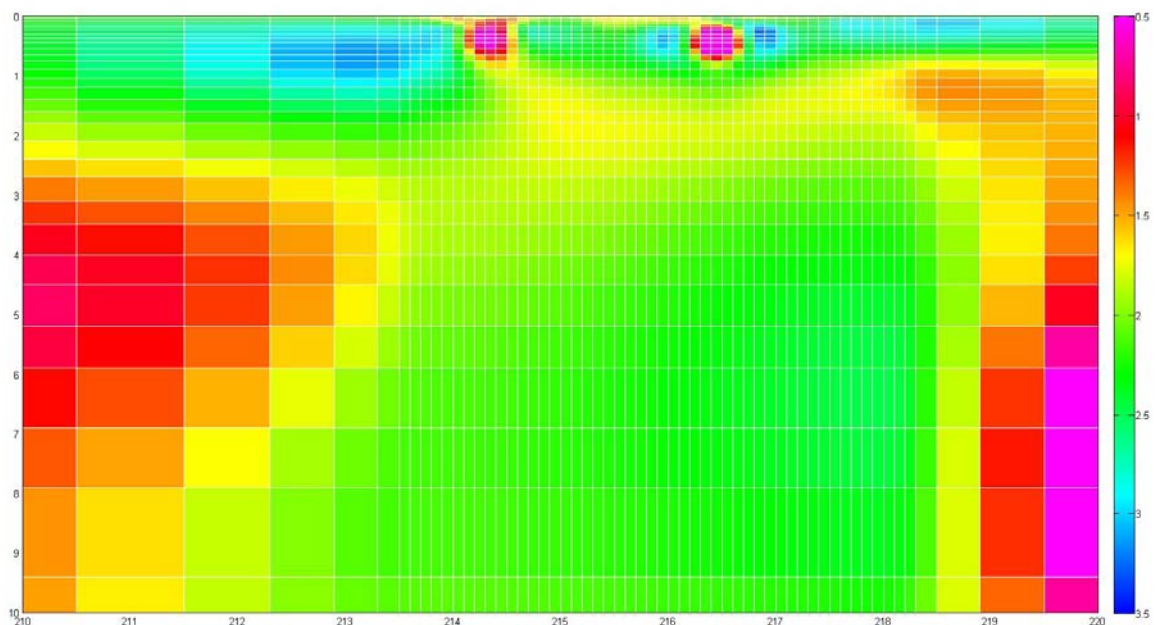


Рисунок 3.14 – Пример визуализации решения обратной двумерной задачи магнитотеллурического зондирования в среде MatLab

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в рамках выполнения научно-исследовательских работ по данному проекту достигнуты следующие результаты:

Создан интерактивный программный инструмент, обеспечивающий эффективное хранение и углубленную обработку материалов полевых электромагнитных наблюдений методом магнитотеллурического зондирования, представленных в международном формате-EDI. В рамках углубленного анализа электромагнитных данных реализованы процедуры расчета компонент тензора импеданса и фазового тензора в зависимости от угла поворота системы координат относительно исходной ориентации компонент электромагнитного поля на разных периодах и построения полярных диаграмм тензора импеданса и фазового тензора.

Создан интерактивный программный инструмент, обеспечивающий эффективную подготовку полевых магнитотеллурических данных к их количественной интерпретации, а также разработаны средства визуализации данных полевых наблюдений и результатов решения обратных задач магнитотеллурического зондирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Ватсон К., Беллиназо М., Корне О., Эспиноза Д., Гринфосс З., Нейджел К., Педерсен Д.Х., Рейд Д., Рейнольде М., Скиннер М., Уайт Э. – Издательство С# "Лори", 2005. – 878 с.
- 2 Фролов А.В., Фролов Г.В. Язык С#. Самоучитель. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 560с.
- 3 Электронная библиотека Microsoft Developer Network (MSDN)
- 4 Шилдт Г. С#: учебный курс. – СПб.: Питер; К.: Издательская группа ВHV, 2003 – 512с.: ил.
- 5 Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. – М.: Научный мир, 2009. – 680с.: ил.
- 6 Бердичевский М.Н., Логунович Р.Ф. Магнитотеллурические полярные диаграммы // Физика Земли, 2005, №10, с.66-78
- 7 Egbert, G.D., Kelbert, A., 2012. Computational recipes for electromagnetic inverse problems. *Geophys. J. Int.* 189, 167–251
- 8 Kelbert A., Meqbel N., Egbert G.D., Tandon K. ModEM: a modular system for inversion of electromagnetic geophysical data // *Computers & Geosciences* Том 66, p.40-53 – 2014.
- 9 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.
- 10 Kelbert A. ModEM: User's Guide (COAS/OSU), 10 p. – 2011.