

Современный комплекс оборудования и программного обеспечения для проведения работ методом магнитотеллурического зондирования

■ Богомолов Н.Ю.^{1,2}, Скрыбин А.С.^{1,2}, Самсонов М.Б.¹

¹ – ООО «Вега», г. Санкт-Петербург.

² – СПбФ «ИЗМИРАН», г. Санкт-Петербург.

Аннотация. В данной статье рассматривается современный комплекс аппаратуры и программного обеспечения для проведения работ методами магнитотеллурического и аудиоманнитотеллурического зондирования при поиске различных полезных ископаемых. Обсуждаются требования к аппаратной части комплекса при проведении работ, а также особенности эксплуатации измерительной части оборудования.

Введение

Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) – метод электроразведки, имеющий ряд преимуществ перед другими электроразведочными методами, и эффективно применяющийся в комплексе с сейсмическими и несейсмическими геофизическими методами. Различные вариации методики МТЗ позволяют решать задачи по поиску как твёрдых полезных ископаемых, так и углеводородов. При поиске углеводородов МТЗ эффективно уточняет сейсмическую скоростную модель при решении структурных задач.

Компания ВЕГА уже более двух десятилетий занимается производством и эксплуатацией аппаратуры для проведения работ методом МТЗ. Владение технологией производства и обслуживания геофизической аппаратуры является серьезным преимуществом в эффективности выполнения геофизических работ: имеется возможность проводить ремонт и техобслуживание аппаратуры без посредников; прямой контакт разработчиков аппаратуры с полевыми сотрудниками и обработчиками позволяет своевременно и оперативно вносить усовершенствования в аппаратуру. На данный момент, компания имеет большой парк

аппаратуры, в том числе собственного производства, для решения широкого спектра задач всеми несейсмическими методами исследования Земной коры.

Особенности метода МТЗ

Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) – это разновидность индукционного частотного электрического зондирования, где в качестве источника сигнала используются естественные вариации магнитного поля Земли [4]. В этом магнитном поле содержатся колебания различной частоты, по закону электромагнитной индукции создающие вихревые электрические поля, в свою очередь порождающие в проводящей толще электрический ток, имеющий своё магнитное поле. За счёт явления скин-эффекта высокочастотные вариации поля Земли затухают на меньшей глубине, чем низкочастотные вариации, имеющие большую глубину распространения. Таким образом с понижением частоты повышается вклад более глубоких частей разреза.

Главное преимущество МТЗ – использование в качестве зондирующего агента естественного высокоинтенсивного поля, обеспечивающего высокую глубину исследования без необходимости

применять высокомо мощные генераторные установки.

При проведении МТЗ производится запись двух горизонтальных ортогональных компонент электрического поля – E_x и E_y , и двух горизонтальных ортогональных компонент магнитного поля – H_x и H_y , также опционально в методику включается измерение вертикальной магнитной компоненты H_z .

Численность одного отряда при выполнении работ методом МТЗ составляет 2-3 человека.

Спецификой обработки данных, полученных при МТЗ, является вычисление передаточных функций – величин, получаемых из отношения разных измеренных компонент электрического и магнитного поля в точке измерения.

Метод МТЗ подразделяется на подвиды по частотному диапазону и глубине зондирования:

- Аудиомагнитотеллурическое зондирование (АМТЗ): высокочастотный вариант выполнения методики (частотный диапазон от 1 Гц до нескольких десятков кГц). Применим в задачах с целевыми глубинами исследования от первых десятков метров до 1 км. Время измерения одной физической точки составляет 20-40 минут. Типовая производительность одного отряда данным методом – 15 физических точек в сутки при шаге по профилю 100 метров.

- Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ): охватывает диапазон частот от 0.001 Гц до нескольких тысяч Гц. Применим для решения широкого спектра задач, охватывает глубины первых километров до нескольких десятков километров. Время измерения одной физической точки составляет 14-20 часов. Типовая производительность одного отряда данным методом зависит от количества станций на один отряд, и составляет в

среднем 5 физических точек в сутки при шаге по профилю 1 км при наличии в отряде пяти комплектов аппаратуры.

- Глубинное магнитотеллурическое зондирование (ГМТЗ) – применим для изучения нижних слоев коры и верхней мантии. Частотный диапазон зондирования от 0.0002 Гц до нескольких десятков Гц. Глубинность исчисляется десятками километров. Время измерения одной физической точки составляет минимум 36 часов. Шаг по профилю данным методом, как правило, составляет 5 км.

Метод АМТЗ подразумевает малую глубинность исследования и большую разрешающую способность. Компактность и малый вес аппаратуры и высокая ежедневная производительность делают метод оптимальным для решения задач по поиску твердых полезных ископаемых. Метод эффективно комбинируется с другими малоглубинными геофизическими методами - электроразведкой методом ВЭЗ и ВП, магнитометрией и гравиметрией [2].

МТЗ и ГМТЗ - глубинные методы, используемые для изучения строения земной коры и верхней мантии, региональных литологических и тектонических особенностей, а также для решения задач по поиску и картированию залежей углеводородов.

При решении задач по поиску углеводородов МТЗ часто применяется в комплексе с сейсморазведкой. По результатам работ методом МТЗ создаются карты зон, перспективных на наличие коллекторов и флюидоупоров согласно полученным данным об электрических свойствах среды. Используя эти карты, можно выделить зоны для постановки более детальных работ и охарактеризовать по степени перспективности все выявленные сейсморазведочные объекты [6].

Измерительная аппаратура МТЗ

Для выполнения работ методом МТЗ применяется магнитотеллурическая (МТ) станция. В её состав входят:

- о Блок сбора данных (логгер) – центральный элемент станции. В состав логгера входят:

- 5-канальный АЦП для оцифровки сигналов компонент электрического и магнитного полей E_x , E_y , H_x , H_y и H_z ;
- Встроенная память - твердотельный или флеш-накопитель для записи оцифрованных сигналов;
- GNSS-система для синхронизации со спутником абсолютных времени, даты и местоположения станции в точке записи;
- Интерфейс для связи с внешними устройствами – Ethernet или Wi-Fi. Может отсутствовать при наличии съемного флеш-накопителя в качестве встроенной памяти;

- о Магнитные датчики, 2-3 шт. (в зависимости от необходимости измерения H_z компоненты) – прецизионные индукционные измерители вариаций магнитного поля;

- о Элемент питания – аккумулятор подходящей емкости для конкретного метода съемки;

- о Неполяризующиеся электроды, 5 шт. – заземляемые в грунт электроды на концах MN-линии, измеряющей компоненту электрического поля, ещё один электрод – для центрального заземления;

- о Соединительные провода и кабели – медные провода 4 шт. длиной от 25 м (в зависимости от методики проведения работ) для электрических линий; специальные кабели 2-3 шт. для соединения магнитных датчиков с логгером;

- о Кабель питания станции.

Из особенностей методики МТЗ

напрямую следуют особые требования к МТ-аппаратуре.

- Высокая чувствительность измерительных датчиков. Метод МТЗ предполагает измерение вариаций магнитного поля величины менее единиц нТл, сигнал такой величин должен быть чётко зафиксирован.

- Низкий уровень собственных шумов. Требование вытекает из малых величин измеряемых вариаций естественного поля. Уровень собственных шумов входных каналов определяется минимальным уровнем, который возможно зарегистрировать аппаратурой.

- Высокая энергоэффективность. При работах методом МТЗ или ГМТЗ аппаратура должна функционировать бесперебойно на протяжении более 12 часов. Уровень потребления электроэнергии должен обеспечивать возможность работы аппаратуры без использования специализированных дорогостоящих энергонакопителей.

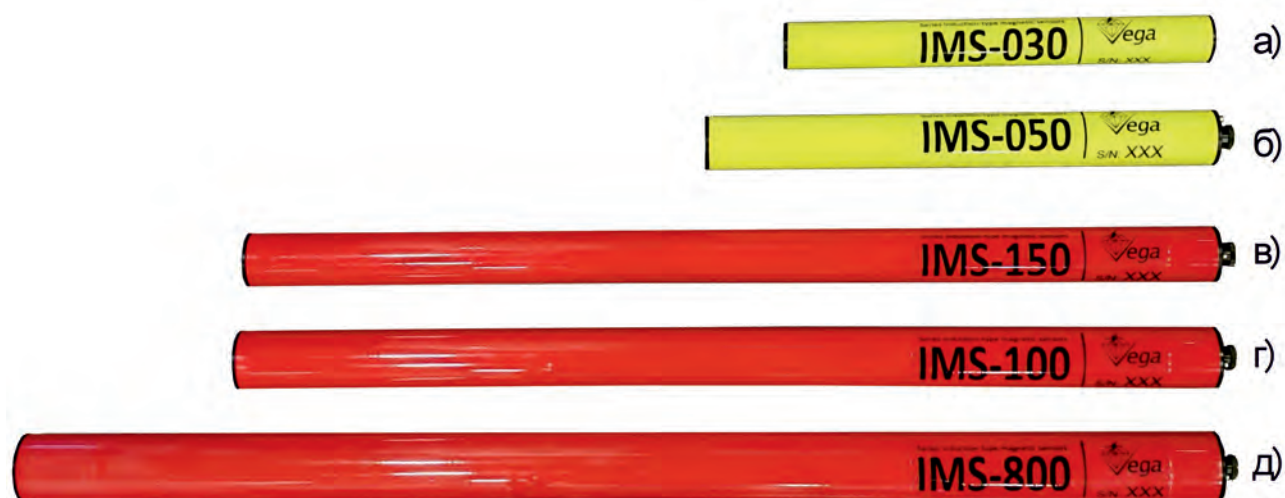
- Достаточная ёмкость внутреннего накопителя памяти.

- При работах методом МТЗ или ГМТЗ характеристики аппаратуры не должны подвергаться искажению под действием суточного изменения погодных условий.

- Стойкость к сложным природным условиям и надежность аппаратуры. Работы методами МТЗ предполагают эксплуатацию аппаратуры в экстремальных природных условиях в течение долгого периода времени. Требуется минимизация необходимого техобслуживания на протяжении полевых работ.

Магнитотеллурическая станция компании ВЕГА

Компания «ВЕГА» обладает собственным парком необходимой аппаратуры для проведения геофизических работ методом МТЗ.



▲ Рис. 1. Линейка датчиков VEGA IMS: а) VEGA IMS-030, б) VEGA IMS-050, в) VEGA IMS-150, г) VEGA IMS-100, д) VEGA IMS-800.

Прецизионные индукционные магнитные датчики являются одним из самых сложных технологических элементов магнитотеллурической станции. Разработкой собственной линейки датчиков серии “IMS” специалисты компании занимаются в течение последних двадцати лет. Была проведена работа по минимизации тепловых шумов и шумов микросхем, технологические усовершенствования в конструкции датчиков позволили расширить диапазон измеряемых частот [3]. В данный момент в линейке датчиков IMS представлены несколько моделей, предназначенных для выполнения различных геофизических задач (Рис. 1).

- IMS-030 - сверхкомпактный и легкий датчик для высокопроизводительных работ методом АМТЗ. Частотный диапазон 1-50000 Гц.

- IMS-050 – компактный высокочастотный датчик с частотным диапазоном 0,1-20000 Гц и собственными среднеквадратичными шумами 10^{-6} нТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ на 1000 Гц. Предназначен для работ методом АМТЗ.

- IMS-100 – низкочастотный датчик с частотным диапазоном 0,0001-6000 Гц и собственными среднеквадратичными шумами 10^{-4} нТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ на 1 Гц. Предназначен для работ методами МТЗ и ГМТЗ.

- IMS-150 – широкополосный датчик с частотным диапазоном 0,0001-10000 Гц и собственными среднеквадратичными шумами 10^{-4} нТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ на 1 Гц. Предназначен для работ методами АМТЗ, МТЗ и ГМТЗ.

- IMS-800 – низкочастотный датчик с частотным диапазоном 0,00002-5000 Гц и собственными среднеквадратичными шумами 10^{-4} нТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ на 1 Гц. Предназначен для работ методами МТЗ и ГМТЗ.

Датчиками серии IMS работают геофизические компании в России и за рубежом, в таких компаниях как «Сигма-Гео», «Северо-Запад», ИРНТУ, РНГ, Sichuan Tuochuang Detection technology CO. и др. Эти датчики совместимы с магнитотеллурической аппаратурой других производителей. Также низкочастотные модели датчиков применяются не только в магнитотеллурике, но и при мониторинге электромагнитного поля.

Последней версией логгера собственного производства, входящего в парк компании ВЕГА, является логгер VMT (Рис. 2).

Логгер станции построен на основе оцифровочного устройства EDR-209, производства английской компании EarthData. Логгер обладает 5 входными



▲ Рис. 2. Внешний вид Блока Сбора Данных VMT.

каналами записи: 3 канала для магнитных датчиков, 2 канала для регистрации электрического сигнала (MN-линии). АЦП логгера обладает максимальной частотой дискретизацией 3000 Гц. Управление логгером осуществляется через web-интерфейс, подключение осуществляется по сети Wi-Fi через ПК или смартфон. Станция обладает отсоединяемой GNSS-антенной для синхронизации времени и местоположения по спутникам GPS, ГЛОНАСС и др. Логгер предназначен для проведения измерений методами МТЗ и ГМТЗ.

VMT является модификацией предыдущей разработки компании - станции VMTU-10 [5]. Была проделана большая работа по уменьшению собственных шумов входных каскадов станции, изменен форм-фактор корпуса логгера с целью улучшения эргономики и удобства пользования, уменьшены вес и размеры корпуса, а также улучшена надежность внутренней сборки и компоновки элементов системы; добавлен встроенный Wi-Fi модуль.

Ещё одним элементом, необходимым для проведения работ методом МТЗ, являются неполяризуемые электроды (Рис. 3). Компанией «ВЕГА» разработаны,

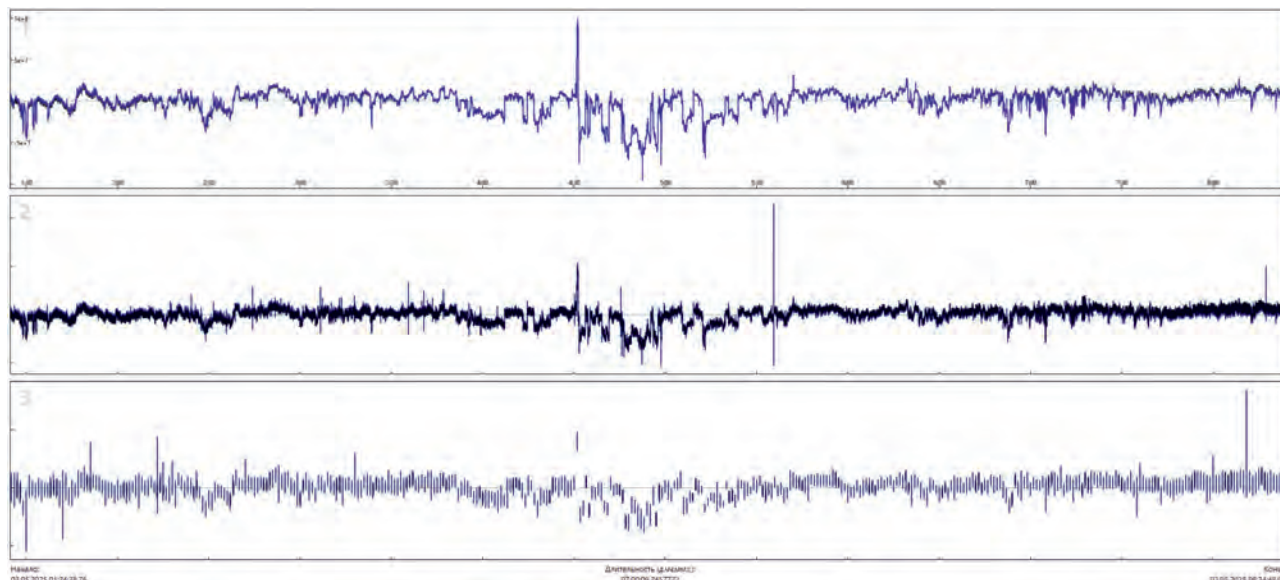
испытаны и введены в серийное производство и эксплуатацию неполяризуемые хлор-свинцовые электроды VNP, состоящие из свинцовой пластины, зацементированного хлор-свинцового наполнителя и высокопрочного корпуса. Эти электроды обладают близким к нулю суточным дрейфом и минимальным собственным шумом. Длительная запись разности потенциалов на заземленной электродами VNP приемной линии выходит чистой и неискаженной. Результаты опытно-методических работ показали, что качество зарегистрированного сигнала электродов VNP эквивалентно наиболее распространенным сегодня в МТЗ графитовым одноразовым электродам (Рис. 4).

Программное обеспечение компании ВЕГА

В качестве ПО для контроля качества, полевой и камеральной обработки данных МТЗ в компании был разработан комплекс специализированного про-



▲ Рис. 3. Внешний вид неполяризующегося электрода VNP.



▲ Рис. 4. Сопоставление временных рядов электрического сигнала на 7-часовом участке на частотах дискретизации регистратора: 15 Гц (сверху), 150 Гц (посередине) и 2400 Гц (снизу) (синий – электрод VNP, чёрный – графитовый электрод).

граммного обеспечения (ПО), который входит в состав магнитотеллурического комплекса.

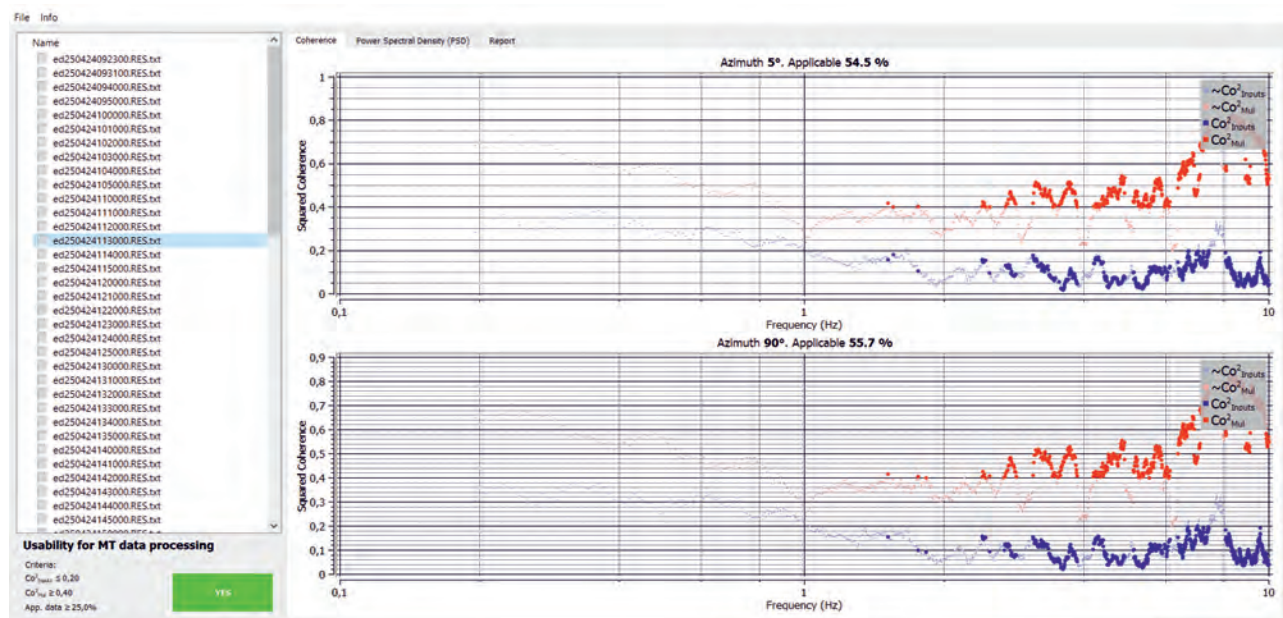
ПО комплекса состоит из пакета программ:

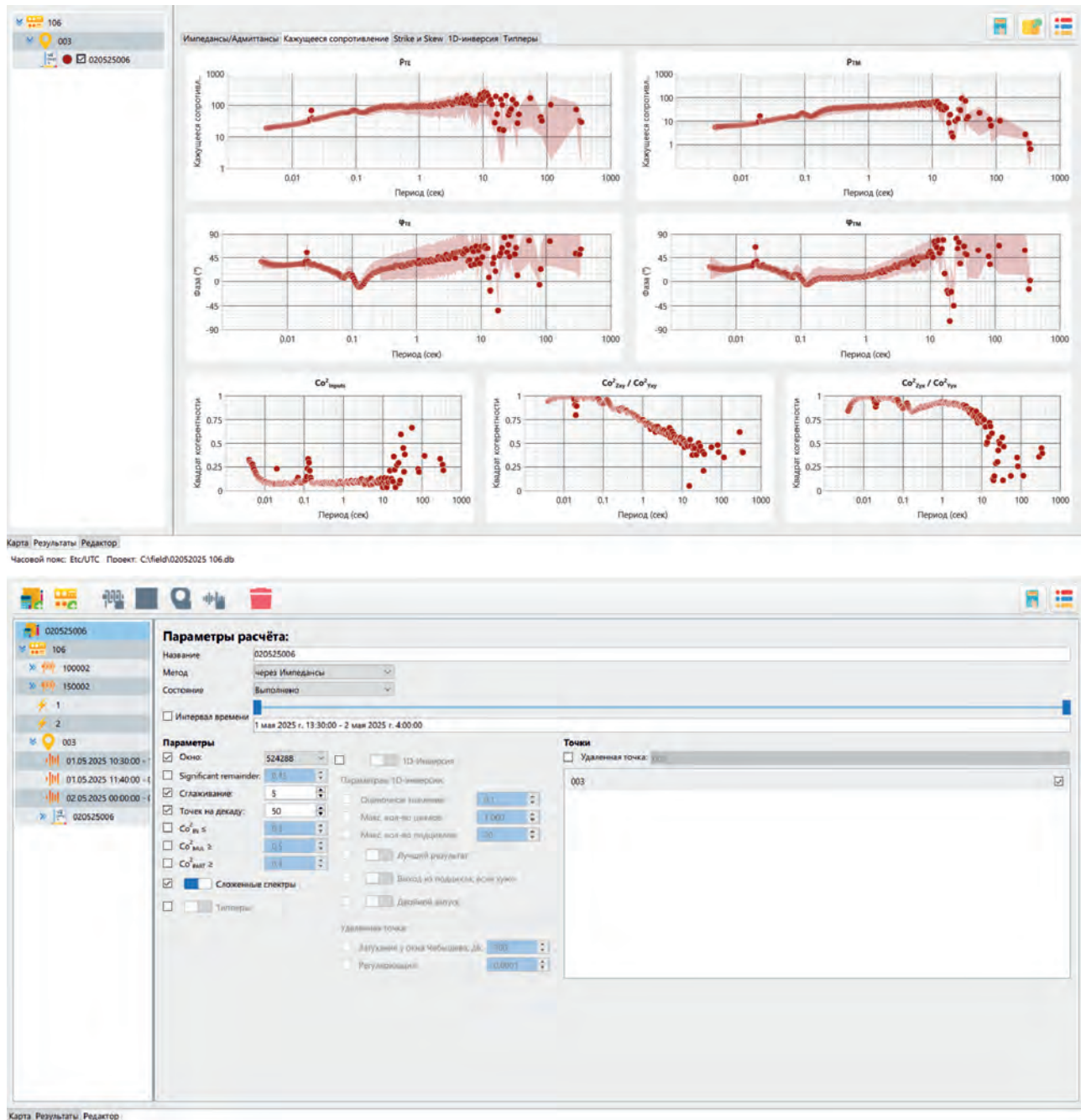
- QMT. Предназначена для оперативной оценки качества (достаточности для последующей камеральной обработки) цифровых данных в полевых условиях, полученных с помощью MT-AMT станции VMT. Итогом работы является заключение (да/нет), которое носит рекоменда-

тельный характер для оператора. Для формирования заключения используются критерии когерентности для анализа связей между компонентами электромагнитного поля для метода магнитотеллурического зондирования.

- QMTview. Предназначена для визуального контроля результатов оценки качества полевого материала. Позволяет визуально оценить временные ряды, амплитуду спектральных составляющих сигналов и распределение коэффициен-

▼ Рис. 5. Окно программы QMTView.





▲ Рис. 6. Окно программы MTPro.

тов когерентностей по их спектру (Рис. 5).

- MTPro. Программа предназначена для повышения производительности труда при проведении полевых электроразведочных работ методами МТЗ и магнитовариационного профилирования (далее – МВП) путем оперативной обработки полевого материала, полученного МТ-АМТ станциями VMTU-10 и VMT (ООО «Вега», г. Санкт-Петербург), непосредственно на месте проведения измерений и получения кривых МТЗ и МВП, а также

экспресс оценки одномерной модели геоэлектрического разреза сразу после окончания работ. Программа MTPro позволяет визуально оценить временные ряды, амплитуду спектральных составляющих сигналов и распределение коэффициентов когерентностей по их спектру. Итогом работы программы является определение передаточных функций (импедансов и адмиттансов), параметра асимметрии Свифта Skew и направления Strike, индукционных векторов C_u и C_v , а

также одномерных моделей в направлении падения и простирания структуры (Рис. 6).

Контроль характеристик магнитных индукционных датчиков

Гарантией получения достоверных данных при проведении работ методом МТЗ является своевременная актуализация характеристик магнитных индукционных датчиков [1]. Данная актуализация сводится к так называемым калибровкам – снятию амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик датчика (АЧХ и ФЧХ) во всём рабочем диапазоне частот конкретной модели.

Согласно общепринятой методике, калибровка датчиков должна проводиться до начала и после окончания полевого сезона, и с определенной установленной производителем и техническим заданием периодичностью в течение сезона, в случае его длительной продолжительности.

Общепринятой методикой калибровки датчиков в данный момент является применение внутренней системы калибровочных обмоток датчика. Суть данной методики калибровки – подача сигнала на специальные калибровочные обмотки типа «соленоид», входящие в конструкцию всех современных МТЗ-датчиков, на всем диапазоне чувствительности датчика. Сигнал подаётся с внешнего генератора, встроенного в логгер МТ-станции (или другого устройства). Построение АЧХ и ФЧХ осуществляется путем соотнесения

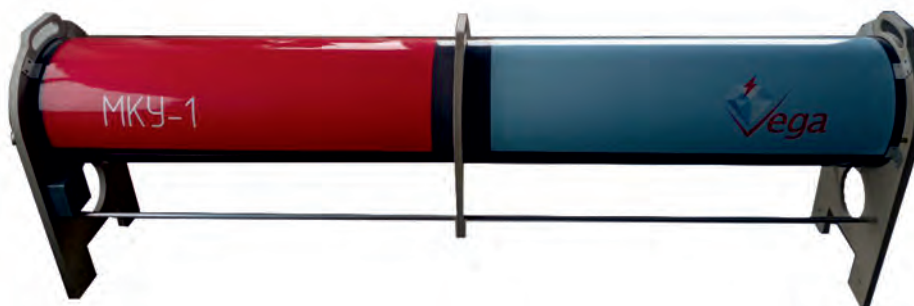
входного сигнала – сигнала с генератора на различных частотах, с выходным сигналом – сигналом с датчика. Соотнесение уровня сигнала генератора с уровнем сигнала датчика является АЧХ, разность фаз сигналов с генератора и датчика – ФЧХ.

В компании «ВЕГА» скептически относятся к данному методу калибровки магнитных датчиков. Полевые эксперименты показали определенное расхождение АЧХ и ФЧХ одного и того же датчика при калибровке внутренними обмотками и калибровке более традиционным методом – в кольцах Гельмгольца или в соленоидах, рассчитанных таким образом, чтобы исследуемый датчик полностью находился в однородном магнитном поле. Расхождения могут быть следствием того, что внутренние обмотки представляют из себя соленоид, по радиусу и длине слишком близкий к размерам самого датчика, что приводит к искажению значений измеряемого поля на некоторых частотах.

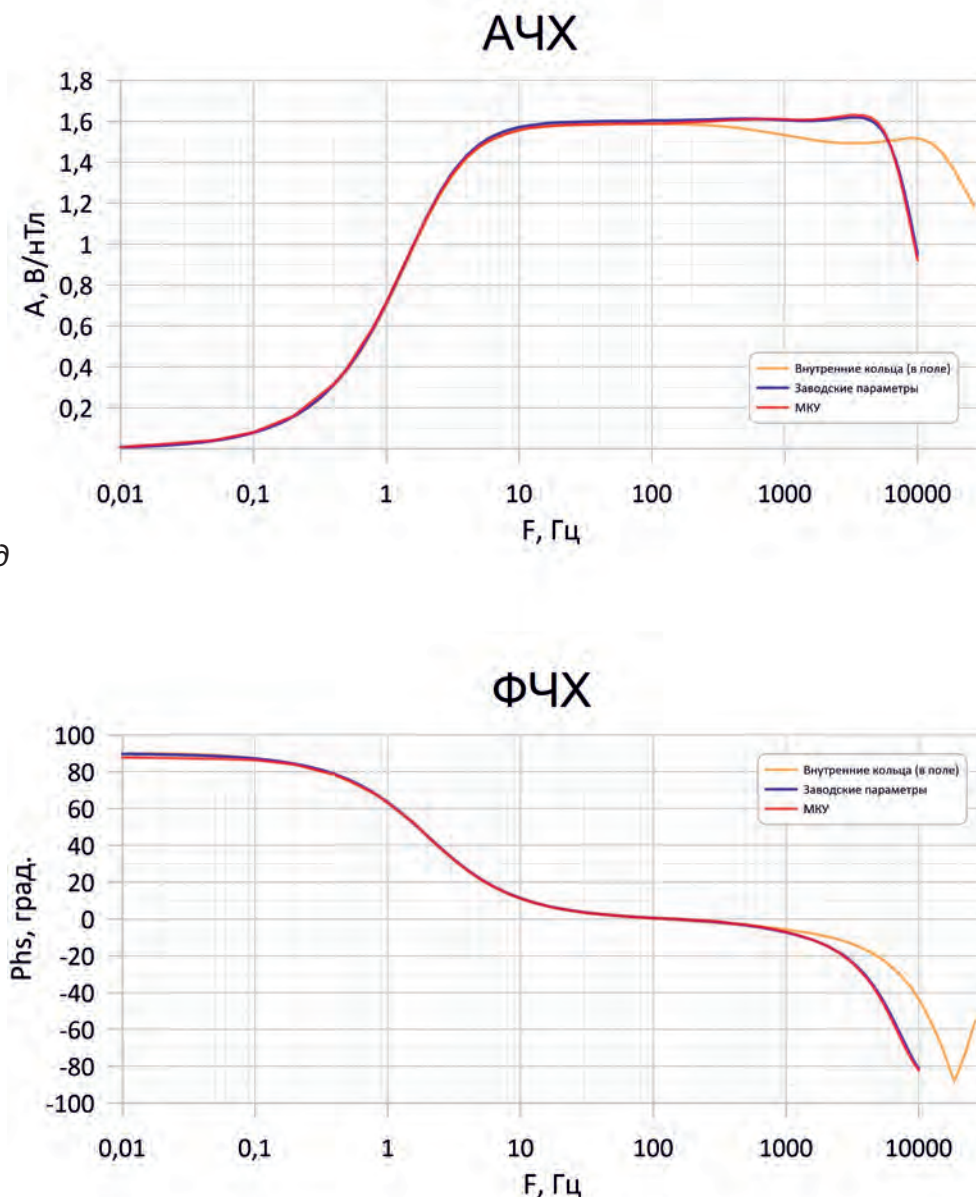
Расхождения между действительными и вычисленными АЧХ и ФЧХ датчиков приводят к последующим ошибкам при обработке полевого материала, что в свою очередь приводит к искажениям в интерпретации материала [1]. Такие ошибки недопустимы при проведении геологоразведочных работ.

С целью борьбы за качество и корректность получаемого материала компания «ВЕГА» разработала полевую мобильную калибровочную установку МКУ (Рис. 7).

▼ Рис. 7. Внешний вид калибровочной системы МКУ.



► Рис. 8.
Графики сравнения
АЧХ (сверху) и ФЧХ
(снизу) датчика
IMS-100 сделанные
разными
калибровочными
системами:
Синий – заводская
лабораторная
система колец
Гельмгольца,
Красный – соленоид
МКУ, Оранжевый –
внутренние
калибровочные
обмотки датчика.



Установка представляет из себя переносной соленоид, длина которого более чем в 2 раза превосходит длину самого длинного датчика серии IMS, и радиус которого также в разы превосходит радиус датчиков. Датчик устанавливается внутрь соленоида на специальный ложемент. К датчику подключается АЦП, к соленоиду подключается генератор. АЦП и генератор сведены в единую систему – анализатор спектра A19-U2 производства компании ZETLab. К анализатору спектра подключается ПК, и осуществляется управление процессом калибровки датчика – подача сигналов разной частоты на генератор, запись

сигнала с датчика, соотнесение входного и выходного сигналов. Полевые эксперименты показали, что АЧХ и ФЧХ, полученные при помощи МКУ, сходятся с достаточной точностью с заводскими АЧХ и ФЧХ датчика (Рис. 8).

Заключение

Метод МТЗ является недорогим и надёжным помощником при решении нефте- и газопоисковых задач, так как является самым глубинным методом электроразведки, даёт геологам полезную информацию о параметре удельного электрического сопротивления горных пород и помогает уточнить волновую

картину в общем и скоростную модель глубинного строения исследуемого участка.

Компания «ВЕГА» обладает огромным опытом в применении и исследования метода электроразведки МТЗ. За более чем 20 летнюю историю компания принесла в этот метод много инноваций, как в технологическом, так и методологическом плане. Глубокое понимание физических основ метода позволяет разрабатывать и применять максимально эффективные технологии измерений и обработки данных.

Литература

1) Возможности использования различных магнитных экранов для поверки и калибровки индукционных магнитных датчиков. Е.А. Копытенко, С.В. Поляков, Н.Ю. Богомолов, А.С. Скрябин, А.В. Щенников, М.Б. Самсонов, Б.В. Самсонов. Всероссийский семинар по ЭМ зондированиям Земли, посвящённый 100-летию профессора М.Н. Бердичевского. 2023.

2) Комплексная интерпретация и совместная инверсия данных электроразведки и гравимагниторазведки для повышения геологической достоверности модели среды. М.С. Петрищев* (1,2), М.Б. Самсонов (2), В.Л. Лухманов (3), А.С. Скрябин (2), А.А. Шлыков (4,5), А.И. Артюгин (3), Н.Ю. Богомолов (2) (1 - СПбФ ИЗМИРАН, 2 - ООО «Вега», 3 - ООО «Астрагео», 4 - СПбГУ, 5 - ООО «Тензор-М»)

3) Линейка индукционных датчиков магнитного поля для геофизических исследований. Поляков С.В., Резников Б.И., Щенников А.В., Копытенко Е.А., Самсонов Б.В. Сейсмические приборы. Т. 52, № 1, с.5-27. 2016.

4) Магнитотеллурический метод и научная школа геофизиков МГУ.

Дмитриев В.И., Яковлев А.Г., Голубцова Н.С., Пушкарев П.Ю., Куликов В.А., Хмелевской В.К., Шустов Н.Л. Геофизика в МГУ. Вчера. Сегодня. Завтра. 1944 - 2014. Сборник трудов Научной конференции, посвящённой 70-летию кафедры геофизики в Московском университете. 2014.

5) Многофункциональные широкополосные магнитотеллурические станции VMTU. Копытенко Е.А., Пальшин Н.А., Поляков С.В., Щенников А. В., Резников Б.И., Самсонов Б.В. Всероссийская школа-семинар ЭМЗ-2011, 16-21 мая 2011г. Петродворец.

6) Применение электроразведки при изучении нефтегазоносности северного обрамления Сибирской платформы. А.П. Афанасенков, Д.В. Яковлев. Геология и геофизика, 2018, т.59, №7, с. 1032-1052.

Подробнее об авторах



Богомолов
Николай Юрьевич

Старший геофизик
ООО «Вега»,
г. Санкт-Петербург.



Скрябин
Артём Сергеевич

Старший геофизик
ООО «Вега»,
г. Санкт-Петербург.



Самсонов
Михаил Борисович

Генеральный директор
группы компаний Vega,
г. Санкт-Петербург.