

**КОРРЕКТИРОВКА ТЕОРИИ МЕТОДА АМТЗ С УЧЕТОМ ДИСПЕРСИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ПРОНИЦАЕМОСТИ.
КРИТИКА СУЩЕСТВУЮЩИХ АППАРАТУРНЫХ РЕШЕНИЙ**

*Илюхин Владимир Сергеевич
Лисицкая Юлия Александровна
ООО «Эко-Экспресс-Сервис»,
г. Санкт-Петербург*

**ADJUSTMENT OF THE THEORY OF AMT METHOD TAKING INTO ACCOUNT
THE DISPERSION OF THE DIELECTRIC CONSTANT.
CRITICISM OF EXISTING HARDWARE SOLUTIONS**

*Ilyukhin Vladimir
Lisitskaya Julia
ООО «Eco-Ekspress-Service», St. Petersburg*

Аннотация. Метод АМТЗ был вброшен в производство «сырым» с точки зрения научного и методического обеспечения. В свое время государство отказалось финансировать новые разработки и направления по всем методам электроразведки, кроме метода АМТЗ, после чего и начался бум по его внедрению. Разумеется, каких-нибудь серьезных поисковых геологических задач этот метод не решит, но – что есть.

Физика фундаментальна, и с этой точки зрения, автор, улыбаясь, слушал доклад молодой американской девушки на одном из международных геофизических конгрессов, которая неуверенно докладывала, что они пытаются учесть эффект ВП в результатах работ методом аудио магнитотеллурических зондирований (АМТЗ). Аналогичные, но уже уверенные утверждения содержатся в работе [1]. Одно название статьи чего стоит: «Магнитотеллурический метод вызванной поляризации». С таким же утверждением можно написать, фразу вроде: «сейсмопрофилирование методом АМТЗ». Авторы представления не имеют что такое метод вызванной поляризации, пишут что-то о параметре поляризуемости, но эффект ВП проявляется только при возбуждении среды мощными импульсами тока. Параметра поляризуемости, как физического свойства среды не существует, в противном случае необходимо корректировать уравнения электродинамики, и подавать на Нобелевскую. Сейчас, когда все измеряют полную переходную характеристику ВП, параметр кажущейся поляризуемости вообще исчез.

Все эти недоразумения опять-таки связаны с отрицанием не только высоких значений параметра диэлектрической проницаемости, но и ее частотной дисперсии. Устранению этого противоречия и посвящена данная статья.

Abstract. Method AMTZ was thrown into the production of "raw" in terms of scientific and methodological support. At a previous time, the state refused to finance new developments and directions for all methods of electrical exploration, except for the AMT method, after which the boom began to be introduced. Of course, this method will not solve any serious geological problems, but that is.

Physics is fundamental, and from this point of view, the author, smiling, listened to the report of a young American girl at an international geophysical congressed, which is uncertainly reported that they were trying to take into account the effect of IP in the results of audio magnetotellurics soundings. Similar but already confident statements are contained in [1]. One title of the article is worth it: "Magnetotelluric method of induced polarization". With the same statement, you can write a phrase like: "AMT seismic recording". The authors have no idea what the method of induced polarization is, they write something about the polarizability parameter, but the effect of IP appears only when the medium is excited by powerful current pulses. The polarizability parameter, as a physical property of the medium does not exist, otherwise it is necessary to correct the equations of electrodynamics, and to give a Nobel one. Now, when everyone is measuring the full transient response, the apparent polarizability parameter has disappeared altogether.

All these misunderstandings are again connected with the denial of not only the high values of the dielectric constant parameter, but also its frequency dispersion. This article is devoted to the elimination of this contradiction.

Ключевые слова. Геология, геофизика, электроразведка, дисперсия диэлектрической проницаемости, аудио магнитотеллурические зондирования, АМТЗ, уравнения электродинамики.

Keywords. Geology, geophysics, electrical exploration, dispersion of dielectric permeability, audio magnetotellurics soundings, AMT, electrodynamic equations.

Введение. Метод АМТЗ недоработан в научном и методическом плане, более того, существующие аппаратные решения просто приводят к браку результатов полевых наблюдений. В связи с этим, здесь необходимо последовательно решить следующие задачи: скорректировать теорию в рамках модели плоской волны, падающей на горизонтальную границу раздела; проанализировать принципиальные ошибки

существующих аппаратных разработок и предложить пути их устранения на современном уровне; проанализировать особенности метода, на которые не обращают внимания, но которые потенциально могут открыть новые возможности; в завершение авторы поделятся отработанным алгоритмом выделения плоской волны в реальном времени.

Теоретические обобщения. В работе [2] показана и обоснована фундаментальная роль частотной дисперсии параметра диэлектрической проницаемости в геологических средах.

Перепишем первое уравнение электродинамики, с учетом сказанного.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{E}[\gamma + 2\pi f \varepsilon_i(f)] + i2\pi f \varepsilon_r(f) \mathbf{E}.$$

Где:

\mathbf{E}, \mathbf{H} – векторы электрического и магнитного полей;

γ – удельная проводимость;

f – циклическая частота.

Здесь диэлектрическая проницаемость является комплексной величиной, зависящей от частоты:

$$\varepsilon(f) = \varepsilon_r(f) - i\varepsilon_i(f).$$

Индексы r, i соответствуют реальной и мнимой частям.

Множитель в квадратных скобках в уравнении отвечает за поглощение. Мнимая часть диэлектрической проницаемости фундаментально может быть только положительной величиной [4]. Реальная часть диэлектрической проницаемости определяет ёмкостные реактивные свойства среды, знак ее может быть любым, но она должна быть связана с мнимой составляющей соотношениями Крамерса – Кронига [4].

$$\varepsilon_r(f_0) - 1 = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\varepsilon_i(f)}{f - f_0} df$$

$$\varepsilon_i(f_0) = - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\varepsilon_r(f) - 1}{f - f_0} df$$

В работе [2] использовалось преобразование Фурье вместо подстановки мнимых экспонент с тем или иным знаком, что однозначно определяет знак мнимой части как положительный. В этой связи, квадрат волнового числа запишется в следующем виде:

$$k^2 = -(2\pi f)^2 \varepsilon(f) \mu + i2\pi f \gamma \mu. \quad (1)$$

На магнитную проницаемость (μ) горных пород влияет магнитная восприимчивость, которая в максимальном случае имеет второй порядок со знаком минус, чем можно пренебречь по сравнению с единицей, т.е. можно использовать значение магнитной постоянной μ_0 .

Далее, и это принципиально, мы не имеем права пренебрегать параметром диэлектрической проницаемости, как это делалось ранее. В этой связи, по результатам измерений компонент плоской волны, удобнее рассчитывать адмиттанс (Y) вместо импеданса (на примере одной компоненты):

$$Y^2(f) = \left(\frac{H_y}{E_x} \right)^2 = \frac{k^2}{(2\pi f \mu)^2}.$$

Из этого соотношения, с учетом (1) следует выражение для обработки результатов полевых наблюдений:

$$\Theta'(f) = \mu_0 Y^2(f) = -\varepsilon_r(f) + i \left(\frac{1}{2\pi f \rho} + \varepsilon_i(f) \right). \quad (2)$$

В результате измерений мы получаем некоторую действительную функцию зависимости от частоты $\theta(f)$. Дальнейший алгоритм обработки достаточно прост. Выполняется преобразование Гильберта, в результате чего, действительная функция $\theta(f)$ однозначно раскладывается на реальную и мнимую части. Реальная часть этого преобразования, согласно (2), соответствует частотной дисперсии реальной части диэлектрической проницаемости. Через соотношения Крамерса – Кронига рассчитывается частотная зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости. И, наконец, рассчитывается зависимость эффективного удельного сопротивления от частоты.

Итогом этих расчетов будут три различных кривых зависимости от частоты. Разумеется, все эти кривые следует понимать в эффективном смысле, и качество последующей интерпретации значительно повышается.

Немного о физике. Если мнимая часть диэлектрической проницаемости отвечает за тепловые потери, то реальная часть соответствует емкости (Ф/м), т.е. отвечает за способность системы накапливать и отдавать заряды. Это грубо, и не совсем строго, но, в первом приближении, можно так интерпретировать. Более точно – эта часть отвечает за реактивные свойства двойных электрических слоев геологической среды, т.е., в традиционном

представлении (исключительно отдавая дань историческим традициям) соответствует эффектам ВП: больше реальная часть диэлектрической проницаемости – больше эффект ВП, и – наоборот. Но интерпретировать это компоненту необходимо совместно с кривой мнимой части эффективной диэлектрической проницаемости.

Для расчета теоретических кривых в модели горизонтально-слоистой среды, удобнее всего воспользоваться методикой, изложенной в [5]. В этом учебнике методика изложена в простом и законченном виде, но все необходимо переработать.

1. В параметрах слоев, вместо удельного сопротивления необходимо задавать волновые числа с учетом частотной дисперсии диэлектрической проницаемости.

2. В дальнейших выкладках, вместо импедансов использовать адмиттансы.

3. В конечном итоге, все привести к квадратам адмиттансов.

Возникает вопрос – где взять частотные зависимости параметра диэлектрической проницаемости? Пока таковые отсутствуют, работа пионерская. На первом этапе можно найти семейство доверено измеренных переходных характеристик ВП, продифференцировать их по времени (получим импульсные характеристики), выполнить преобразование Фурье – это и будут частотные зависимости реальной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости; при этом, необходимо разобраться с размерностями. Но необходимо помнить, что измерение во временной области на образцах, это только оценка, использовать такие результаты для практических полевых работ невозможно, нет способа обобщения. Есть измерения и частотных характеристик образцов, но в реальных средах необходимо учитывать и пространственную дисперсию диэлектрической проницаемости геологической среды [3].

Аппаратурный брак. Метод АМТЗ отличается от метода МТЗ только тем, что вместо непосредственного измерения магнитного поля, измеряется его производная по времени, следовательно – все методические указания для метода МТЗ должны выполняться и в реализации АМТЗ.

Старики знали физику, и знали, что такое линейная независимость векторов. В аппаратурной реализации МТЗ все четыре канала гальванически развязаны, т.е. каждый из них имеет свое собственное питание, и нигде не образуются общие точки соединений, что иллюстрируются левой частью рисунка 1.

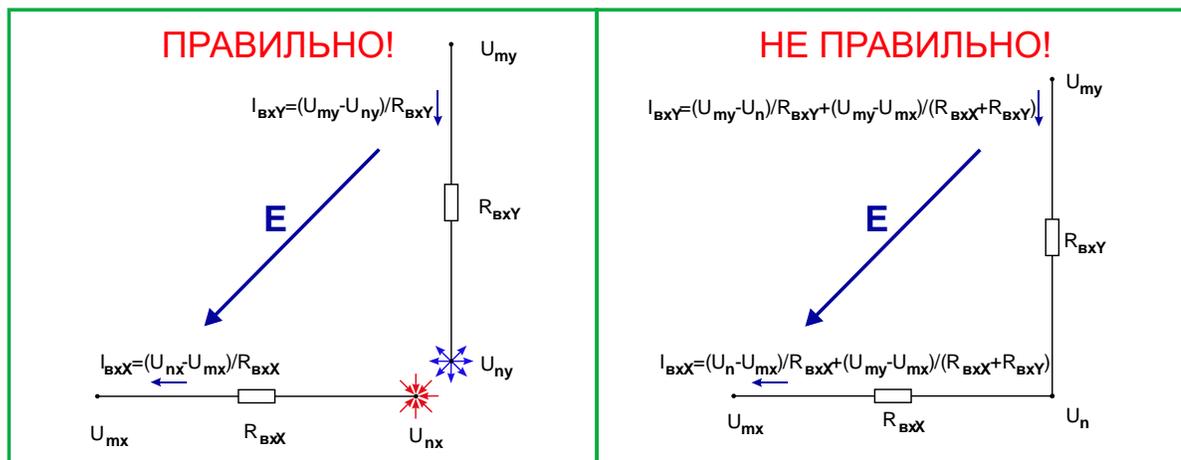


Рис.1. Эквивалентные схемы измерений электрического поля

Любой усилитель (повторитель) характеризуется входным сопротивлением, через которое идут входные токи. С точки зрения поля, приемные электроды являются источниками, которые в той или иной степени искажают исходное поле (почему и необходимы высокие значения входных сопротивлений). При близком расположении ближайших электродов, их поля будут влиять друг на друга, что нарушает принцип независимости.

Разработчиков технологии АМТЗ эти вопросы не волновали, на все четыре канала одно питание. В правой части рисунка 1 показан результат всего этого. Появляется общая компонента в обоих каналах, и это идеальный случай. Ни о какой независимости компонент говорить нельзя. Более того на этой же общей точке «сидят» усилители датчиков магнитного поля, возникают непредсказуемые взаимные наводки между каналами и, собственно, прибором. Что в этом варианте измеряется авторы не знают.

Из любых данных, с использованием того или иного алгоритма, всегда можно «вытащить» гладкую кривую, насколько эта кривая соответствует реальному разрезу известно только разработчикам подобных технологий и аппаратуры.

Еще в 2002 году, группой из трёх человек, включая автора, был разработан комплект аппаратуры АМТЗ. Обработка велась в реальном времени, производственные наблюдения выполняли школьники старших классов.

В аппаратуре были реализованы четыре независимых канала: каждый со своим питанием, АЦП, DSP-процессором, и опторазвязкой по «цифре». Общее питание было предусмотрено с обратной стороны оптронов, и все цифровые потоки в реальном времени поступали на ноутбук на обработку. Этим самым обеспечивалась независимость каналов, и устранялось их взаимное влияние друг на друга. В магнитных каналах были предусмотрены интеграторы, чтобы от производных по времени перейти непосредственно к компонентам магнитного поля. На рисунке 2 показаны скриншоты экранов в процессе измерений.

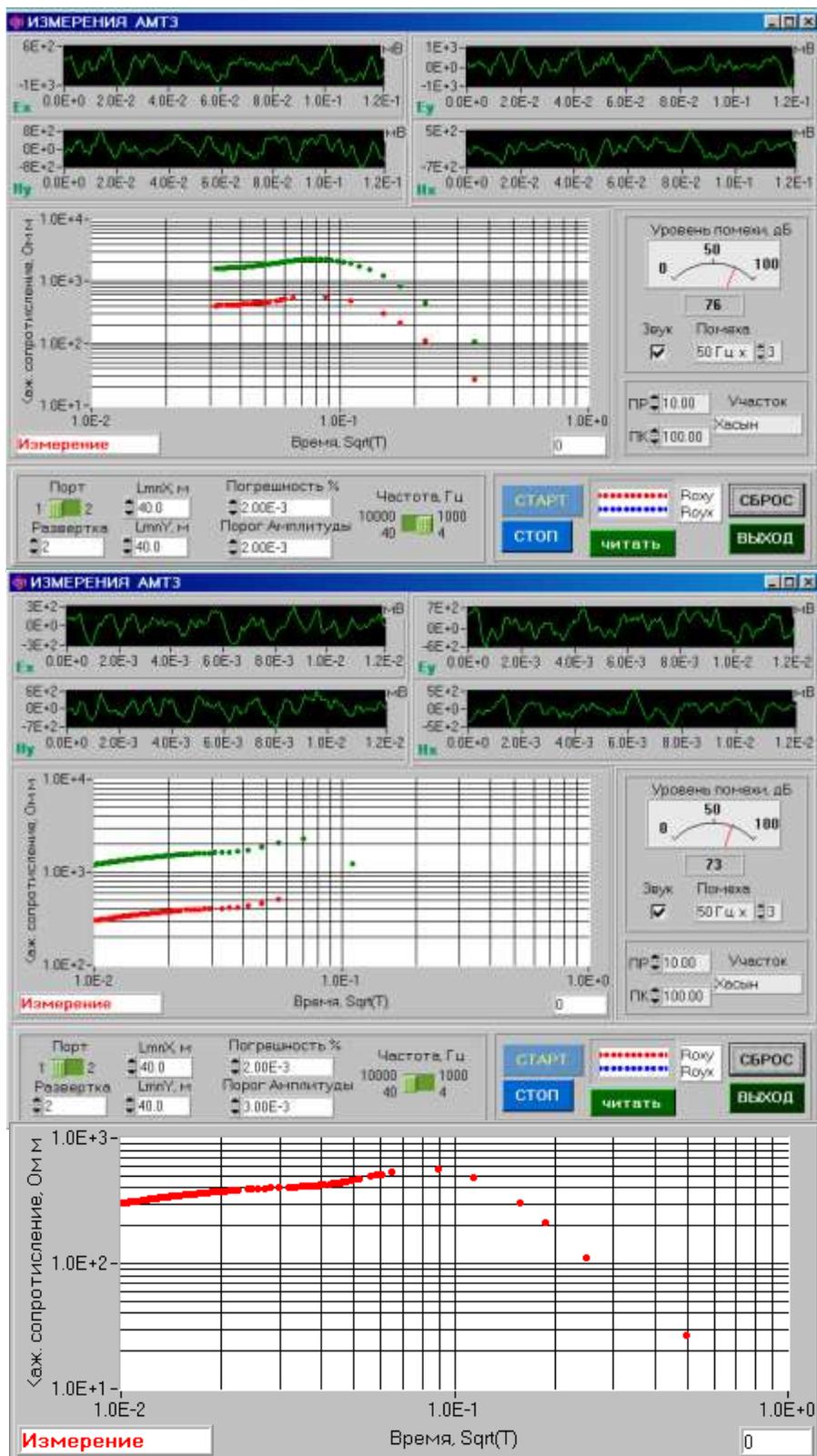


Рис.2 Скриншоты экранов в процессе измерений. Два верхних экрана – измерения в разных диапазонах частот; нижний – сводная кривая.

Зеленая – теоретическая модельная кривая (для наглядности смещена);
Красная (синяя) – измеренные кривые.

После всех необходимых подключений, с компьютера давался старт процессу измерений, после чего включалось питание каждого канала. Синхронизация осуществлялась следующим образом. После включения питания, каждый DSP-процессор в течение минуты генерировал сигналы Баркера с паузой между ними, за это время необходимо было последовательно включить все четыре канала. Компьютер автоматически отслеживал последовательность включения каждого канала, после регистрации последнего сигнала Баркера от последнего включенного канала, рассчитывались времена задержек между каналами, которые и учитывались в дальнейшей обработке.

Параметры плоской волны выделялись адаптивным фильтром в реальном времени и отображались в виде двух точек различного цвета на диаграмме.

Измерения производились в двух различных частотных диапазонах (связано с алгоритмом обработки), как только кривая приобретала законченный вид, измерения прекращались. Интерпретировать кривую можно было непосредственно на точке наблюдений, но в этом не было смысла, кривые интерпретировались в полевом лагере, по окончании рабочего дня.

Метод АМТЗ самый простой метод электроразведки по технологии постановки работ, обработке и интерпретации результатов наблюдений. Поэтому авторам непонятно, когда результаты наблюдений пересылаются куда-то в офис, где обрабатываются и интерпретируются. Такая постановка работ никуда не годится, все результаты, вплоть до построения разрезов и карт, должны быть получены непосредственно в поле, что всегда было твёрдым законом ведения полевых электроразведочных работ.

Если бы сейчас авторам предложили разработать комплект аппаратуры АМТЗ, то сохранилось бы всё, кроме одного – вместо оптронов лучше поставить контролеры блютуз. Даже если это немного удорожит аппаратный комплекс, то многократно окупится в процессе ведения полевых работ – нет дополнительных проводов и дополнительного источника питания.

Глубинность метода АМТЗ. Общеизвестно, что глубинность данного метода определяется самой низкой частотой, что верно. Но никто не обращает внимания на тот факт, что сигналы регистрируются в волновой, дальней области, а не в ближней зоне источника, что многое меняет. В частности, глубинность будет зависеть от динамического диапазона аппаратуры и измеряемых сигналов.

Оценим длины волн (λ) в диапазоне частот 4 – 10000 Гц. Положим: $\rho = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_0 \cdot 1000 \text{ Ф/м}$. Тогда для соответствующих частот, длины волн составят 5626 – 88 м. Допустим, что геологическая задача заключается в исследовании разреза до глубин 300 м. Тогда для низких частот это глубина составит 0.05 долей длины волны, а для высоких – в этой области разреза уже будет размещаться 3.4 пространственных периодов волн. И если в первом случае, в силу поглощения, слабых сигналов и малого динамического диапазона аппаратуры мы не регистрируем эффектов дифракции, отражения, рефракции и т.п., то на высоких частотах, такие эффекты могут регистрироваться. Разумеется, если строго решить задачу для горизонтально-слоистых сред, все эти эффекты будут учитываться автоматически, но в реальных геологических разрезах, учесть все невозможно.

Обычно, за эффективную глубину проникновения волны, принимают величину, при которой произведение модуля волнового числа на расстояние равно единице, т.е. на такой глубине поле уменьшится в e раз, что соответствует длине волны при заданных частоте и параметрах среды. Несложно получить выражение для расчета эффективной глубины поглощения при уменьшении поля в m раз.

Если динамический диапазон аппаратуры равен M дБ, то $m = 10^{(M/20)}$, и глубина проникновения волны при заданном коэффициенте поглощения составит величину: $h = m\lambda$, м. Это означает, что если на такой глубине h поместить источник, который генерирует плоскую волну на заданной частоте и с максимальной амплитудой, которую может зарегистрировать конкретная аппаратура, то такие сигналы могут быть измерены на поверхности, что и определяет зависимость глубины исследований от аппаратуры и уровня измеряемых сигналов.

Из этих рассуждений следует дополнительная возможность изучения геологических разрезов. Авторы таких исследований не проводили, но, принципиально, это несложно выполнить. Необходимо набирать статистику сигналов волн не только по частоте, но и на каждой частоте набирать статистику по уровням сигналов, и строить соответствующие зависимости от них. Теоретически, такая зависимость должна существовать, особенно в диапазоне высоких и средних частот, но все необходимо экспериментально проверять. Здесь содержится важный момент и для разработчиков аппаратуры. Необходимо согласовать динамические диапазоны магнитных и электрических каналов, что было серьезным вопросом для нас при конструировании датчиков магнитного поля.

И еще одно важное замечание: если исследователи ориентированы на изучение эффективных параметров диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления, то уже нельзя пользоваться металлическими приемными электродами, необходимо использовать неполяризующиеся электроды. В производственных работах по контракту использовались геологические мешочки с раствором медного купороса и медными электродами внутри, при перебазировании установки, эти мешочки просто помещались в полиэтиленовые пакеты. В настоящее время несложно подобрать другие удобные мягкие пористые материалы вместо обычных фарфоровых неполяризующихся электродов.

Для будущего. У кого есть желание и возможность, можно добавить пятый, гальванически развязанный канал измерения магнитного поля. Необходимо так же выводить его результаты наблюдений на экран, но измерять мощность этого сигнала и выбрать некоторое время цифрового интегрирования такое, чтобы изменение положения датчика магнитного поля, относительно, быстро отражалось на экране. Далее необходимо установить такое положение датчика в пространстве, при котором измеряемые сигналы, в среднем, будут максимальны, и если ось этого датчика будет совпадать с направлением вектора магнитного поля Земли в этой точке, то природа электромагнитных полей АМТЗ прояснится существенным образом. Далее необходимо изучить корреляцию этих сигналов, с сигналами, соответствующими условию прохождения плоской волны.

Если у кого есть желание реализовать измерения по всем шести компонентам электромагнитного поля, то обращайтесь на электронную почту, измерение вертикальной компоненты электрического поля, может быть реализовано на уровне патента, что важно для предпрятий, не для авторов.

Алгоритм выделения плоской волны в реальном времени измерений. В основу выделения плоской волны из всех сигналов, непрерывно регистрируемых установкой, положен простой принцип – скалярное произведение взаимно ортогональных векторов должно быть равно нулю:

$$E_x(f)H_x(f) + E_y(f)H_y(f) = 0.$$

Во временной области этим условием нельзя пользоваться, так как на электрическую компоненту в данный момент времени, а, следовательно, и на скалярное произведение, действуют значения в предыдущие моменты времени (интеграл свертки), тогда как в частотной области, параметры сигналов на различных частотах полностью независимы друг от друга.

Алгоритм обработки был следующим.

1. Четыре буфера по 16384 значений для каждого канала, заполнялись текущими результатами измерений.
2. По каждому буферу выполнялись процедуры быстрого преобразования Фурье (БПФ).
3. Реализовывался анализ сигналов по частоте. Для электрической и магнитной компонент на заданной частоте вычислялись модули комплексных векторов, и, если, хотя бы одно из этих значений было меньше заданного минимального порога уровня сигнала, эти результаты отбрасывались, и не участвовали в дальнейших процедурах.
4. Для профилированных по порогу сигналов проверялось условие ортогональности комплексных векторов электрического и магнитного поля. Если скалярное произведение этих векторов на данной частоте равнялось нулю, то эти результаты сохранялись, вычислялось кажущееся сопротивление, и результат отображался точками на диаграмме того или иного цвета, в зависимости от компоненты импеданса.
5. Если точки различных цветов перекрывались, то это указывало на круговую поляризацию волны.
6. По окончании проверки ортогональности векторов на всех частотах, все буферы очищались, и проводился новый цикл обработки над новыми данными.
7. Процедура измерений заканчивалась, когда на экране отображались статистически представительные кривые во всем диапазоне частот.

Заключение. Чтобы расширить возможности и достоверность результатов метода АМТЗ необходимо, в первую очередь, переработать всю существующую аппаратуру, которая заведомо регистрирует брак. Все результаты интерпретации кривых, измеренных с такой аппаратурой, представляют собой некие мифические разрезы, не отражающие реалий действительных геологических разрезов.

Обработку и интерпретацию результатов полевых наблюдений необходимо производить непосредственно в поле, с предварительным построением геофизических разрезов и карт.

С целью повышения геологической эффективности метода АМТЗ, следует производить обработку результатов полевых наблюдений с учетом частотной дисперсии диэлектрической проницаемости. Её же необходимо учитывать при расчетах теоретических кривых для горизонтально-слоистых сред. Немного переработать теорию и написать программу для расчета теоретических кривых с учетом дисперсии диэлектрической проницаемости не представляет никакого труда.

Электронная почта: vil_geo@mail.ru

Список литературы:

1. Зорин Н.И., Епишкин Д.В., Яковлев А.Г. Магнитотеллурический метод вызванной поляризации. Геофизика., №2 2006.
2. Илюхин В.С., Лисицкая Ю.А. Связь параметра диэлектрической проницаемости геологической среды с явлением вызванной поляризации. XXVIII Международная научно-практическая конференция «Достижения и проблемы современной науки». С.-Пб.: Научный журнал "Globus". [Выпуск 2\(27\) от 03.02.2018.](http://globus-science.ru/Archive/new/Globus_Multi_February_2018.pdf)
http://globus-science.ru/Archive/new/Globus_Multi_February_2018.pdf
3. Илюхин В.С., Лисицкая Ю.А. Теоретические основы моделирования проводимости горных пород. XXXII Международная научно-практическая конференция «Достижения и проблемы современной науки». С.-Пб.: Научный журнал "Globus". [Выпуск 4\(29\) от 08.07.2018.](#)

http://globus-science.ru/Archive/new/Globus_Multi_June_2018.pdf

4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. Теоретическая физика т. VIII, 2-е изд. перераб. и доп. М.: Наука., 1982.

5. Матвеев Б.К. Электроразведка при поисках месторождений полезных ископаемых. М.: Недра., 1982.

References:

1. Zorin N.I., Epishkin D.V., Yakovlev A.G. Magnetotelluric method of induced polarization. Geophysics., №2 2006 (In Russian).

2. Пыухин В.С., Лиситская Ю.А. Connection of the dielectric constant parameter of the geological environment with the phenomenon of induced polarization. XXVIII International Scientific and Practical Conference "Achievements and Problems of Modern Science". S.-PB.: Scientific journal "Globus". Issue 2 (27) dated 03.02.2018 (In Russian).

http://globus-science.ru/Archive/new/Globus_Multi_February_2018.pdf

3. Пыухин В.С., Лиситская Ю.А. Theoretical bases of modeling the conduction of rocks. XXXII International Scientific and Practical Conference "Achievements and Problems of Modern Science". S.-PB.: Scientific journal "Globus". Issue 4 (29) of 07/08/2018 (In Russian).

http://globus-science.ru/Archive/new/Globus_Multi_June_2018.pdf

4. Landau L.D., Lifshitz E.M. Electrodynamics of continuous media. Theoretical physics vol. VIII, 2-nd ed., corrected and additional. Moscow. Nauka., 1982 (In Russian).

5. Matveev B.K. Electrical exploration when searching for mineral deposits. M.: Nedra., 1982 (In Russian).