

УДК 550.837

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНДУКЦИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ТРАДИЦИОННЫХ МЕТОДАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

© 2015 г. Ю.А. Давыденко<sup>1,2</sup>, П.А. Попков<sup>3</sup>, А.В. Новопашина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский Иркутский государственный технический университет,  
г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>3</sup> ОАО “Алмазы Анабара”, г. Якутск, Россия

Рассматривается технология электромагнитного зондирования и вызванной поляризации (ЭМЗ-ВП), разрабатываемая для решения широкого круга задач малоглубинной, рудной и нефтяной геофизики. Идея технологии была сформулирована в ходе переинтерпретации данных, полученных методом срединного градиента (ИНФАЗ-ВП) при проведении съемки для обнаружения трубок взрыва на Анабарском щите. Использование программных модулей аппаратно-программного электроразведочного комплекса “Марс” позволило рассчитать переходные процессы становления при включении токового импульса, что существенно повысило информативность полевых материалов. В результате, рядом с эталонным объектом была оконтурена трубка взрыва, не выделяемая на карте кажущегося удельного сопротивления. По данным бурения, выделенная трубка перекрыта высокоомными многолетнемерзлыми терригенными озерными отложениями, препятствующими проникновению постоянного тока. Использование одномерной инверсии площадных данных повысило глубинность исследований до 1200 м.

Суть рассматриваемой технологии ЭМЗ-ВП заключается в максимально полном использовании информации переходных процессов, регистрируемых приемными электродами при пропускании импульсов тока через заземленный электрический диполь. Высокоомные экраны прозрачны для индукционных токов, возникающих при выключении токового импульса. Кроме того, при пропускании тока среда поляризуется, а при его выключении возникают эффекты вызванной поляризации, связанные с химическим составом и физическими характеристиками горных пород. Совместное использование информации об индукционной составляющей и процессах вызванной поляризации позволяет выделять поляризующиеся объекты, находящиеся в высокоомных породах, например, породы с вкрапленной сульфидной минерализацией в гранитах, базальтах и т.п.

**Ключевые слова:** робастный регрессионный анализ, вызванная поляризация, электромагнитное зондирование, срединный градиент, переходные процессы, частотная дисперсия электропроводности, робастность.

### Введение

В современных системах регистрации, применяемых в методах постоянного тока (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП, ДЭП, электротомография и др.), для литолого-стратиграфической и тектоно-структурной реконструкции геологического разреза в геоэлектрических полях используется последовательность разнополярных импульсов. Как правило, для измерения вызванной поляризации применяется последовательность с токовой паузой, а для измерения кажущегося удельного электрического сопротивления  $\rho_k$  – режим без паузы. На приемных электродах регистрируется вся последовательность импульсов, однако в дальнейшем анализируется ограниченное количество информации, соответствующей

стационарному приближению. Перед выключением токового импульса амплитуда усредняется, и через несколько десятков или сотен миллисекунд берется несколько отсчетов во временных окнах для вычисления кажущейся поляризуемости  $\eta_k$ . Высокочастотная составляющая сигнала, возникающая сразу после выключения (или включения) тока, вырезается из данных, поскольку в ней преобладают индукционные процессы, которые не подлежат интерпретации в классической методике. Однако именно эти первые миллисекунды становления поля содержат ценнейшую информацию о геоэлектрическом разрезе – о распределении в нем удельного электрического сопротивления  $\rho$  и поляризационных параметров.

Регистрация полной формы переходного процесса позволяет перейти от использования кажущихся параметры  $\rho_k$  и  $\eta_k$  к решению обратных задач для одномерных или трехмерных сред с учетом частотной дисперсии электропроводности для становления поля горизонтального электрического диполя. Такой подход существенно повышает информативность, что дает возможность строить геоэлектрические разрезы и трехмерные модели среды, в которых, помимо удельного электрического сопротивления  $\rho$ , присутствует информация о распределении с глубиной поляризационных характеристиках. Поскольку высокоомные экраны прозрачны для индукционных токов, то их учет позволяет решать геологические задачи в зонах развития многолетней мерзлоты, на территориях, перекрытых породами трапповой формации, в горнорудных районах и ряде других, где применение методов постоянного тока ограничено. Все это делает актуальными разработку и внедрение новой технологии ЭМЗ-ВП для решения широкого круга задач инженерной, рудной, нефтяной геофизики, а также для поиска кимберлитовых тел и конвергентных им образований, перекрытых терригенно-трапповой толщей.

В технологии ЭМЗ-ВП учтен опыт разработки и внедрения дифференциально-нормированного метода электроразведки, который реализован в наземной и морской модификациях и с успехом применяется для поисков месторождений углеводородов. В течение последних 15 лет в самых разных геологических условиях этим методом отработано несколько десятков тысяч километров профилей, на которых пробурено более 150 глубоких скважин [Грайвер и др., 2010; Veeken et al., 2009]. Поисковым признаком служат аномалии вызванной поляризации в районе верхнего регионального водоупора, связанные с эпигенетическими изменениями над залежами углеводородов. При условии комплексного подхода к анализу данных дифференциально-нормированного метода электроразведки, каротажа и сейсморазведки вероятность удачного прогноза превышает 85 % на суше и 90 % на море. Опыт, накопленный при использовании метода импульсной электроразведки для решения задач поиска углеводородов, был перенесен на решение задач рудной геофизики.

Основная идея технологии ЭМЗ-ВП заключается в максимально полном использовании информации о переходных процессах, возбуждаемых прямоугольными разнополярными импульсами, используемыми в традиционных методах постоянного тока. Апробирован новый способ измерения и обработки данных переходных процессов, полученных от заземленного источника тока многоэлектродной заземленной приемной линией с целью одновременного определения кажущегося удельного сопротивления среды, индукционной составляющей и эффектов вызванной поляризации геоэлектрического разреза. Для обработки данных применяются современные методы многомерного статистического анализа в сочетании с инверсией, выполняемой в рамках поляризующейся модели. Современные измерительные системы позволяют с минимальными искажениями осуществлять регистрацию индукционного эффекта, который в традиционных методах ВП считается помехой. Благодаря этому при наличии в разрезе контрастных по проводимости объектов в результаты интерпретации не вносятся ошибки,

поскольку вариации проводимости не будут ошибочно приниматься за изменения поляризационных свойств объектов поиска.

Необходимость регистрации индукционной составляющей переходных процессов накладывает новые условия на систему сбора данных – для корректной записи необходимо применение аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с высокой частотой дискретизации и выполнение первичной обработки значительных объемов информации.

В приемных модулях аппаратно-программного электроразведочного комплекса “Марс”, разрабатываемого для реализации технологии ЭМЗ-ВП, используются АЦП, сочетающие высокую частоту дискретизации (не менее 100 кГц) с достаточно высокой (не менее 18 бит) разрядностью. Благодаря этому при GPS-синхронизации с источником тока возможно выполнение корректной записи фронта токового импульса, и в результате регистрируемое количество информации оказывается достаточным для решения обратной задачи импульсной электроразведки.

При проведении полевых работ технология ЭМЗ-ВП отличается высокой гибкостью, ей присуща простота и надежность, характерная для методов постоянного тока. Вся аппаратура может транспортироваться вручную; масса наиболее тяжелой силовой аппаратуры – модифицированного генератора ВП-1000м (ООО НПК “Элгео”, г. Санкт-Петербург) – составляет 12 кг; переносной генератор ЭРГ-120 вместе с аккумулятором весит 6–7 кг. Многоканальные приемные модули изготавливает компания НПК “Сибгеосистемы” (г. Новосибирск), разработки которой в области импульсной электроразведки более 15 лет успешно используются ведущими электроразведочными предприятиями России.

Помехозащищенность на этапе обработки полевого материала обеспечивается применением ряда оригинальных робастных алгоритмов: подавление тренда в исходных данных, возникающего под влиянием теллурических токов и поляризации электродов; точечное удаление “атмосфериков” (выбросов в записи, возникших под влиянием грозовой активности); низкочастотная робастная фильтрация в двумерном скользящем окне и др.

В настоящее время для съемки по технологии ЭМЗ-ВП опробована методика срединного градиента, позволяющая в течение недели выполнить площадную съемку участка размером  $\sim 2 \times 2$  км по сетке  $50 \times 50$  м. Регистрация переходных процессов может выполняться одновременно несколькими приемными модулями от одной заземленной линии АВ длиной около 3 км; при этом выполняется запись около 1000 точек зондирования. На каждой точке помимо традиционного кажущегося удельного сопротивления рассчитываются переходные процессы на 128 временных задержках, что позволяет с высокой точностью определить строение участка работ на глубину до двух километров. По результатам первого этапа съемки на исследуемой площади выделяются перспективные участки. На втором этапе с использованием той же аппаратуры могут быть проведены более детальные наблюдения различными модификациями дипольного профилирования и зондирования для уточнения геоэлектрических характеристик прослеженных объектов.

Концепция технологии ЭМЗ-ВП была сформулирована при переинтерпретации данных съемки, выполненной для поиска объектов коренного и россыпного генезиса на алмазы на эталонном участке “Марс” одного из кимберлитовых полей Куонапской группы в пределах восточного фланга Анабарского свода. Эти работы выполнены силами ОАО “Алмазы Анабара” с применением метода срединного градиента по технологии ИНФАЗ-ВП с использованием аппаратуры ИМВП-8 производства ООО “Северо-Запад”. Электроразведочные работы проводились в комплексе с магниторазведочными [Давыденко и др., 2013]. При обработке магниторазведочных данных применялись

методы многомерного робастного регрессионного анализа, адаптивной фильтрации и другие алгоритмы, реализованные в программном комплексе GelioSMI [Грайвер и др., 2013; Davydenko, Grayver, 2014], что позволило выделить контуры новых кимберлит-пикрит-карбонатит-лампрофировых тел. Для выявления внутренней структуры рудного поля использовались низкоамплитудные магнитные аномалии. По результатам наблюдений методом ИНФАЗ-ВП был выявлен низкоомный объект – одна из диатрем, совпадающая с контуром магнитной аномалии трубчатого типа. При заверке выявленных низкоомных объектов бурением были установлены обширные области развития флюидизатных брекчий (флюидолитов), которые в магнитном поле прослеживаются с трудом.

В рамках геологоразведочных работ, проводимых на участке “Марс”, решались задачи заверки и уточнения положения основного подводящего канала, определения геометрии “кратерной” части (район раструба) и пространственного положения диатремы в разрезе. Комплекс задач такого рода должен решаться именно в трёхмерном приближении, поскольку при заверке бурением на разных горизонтах в флюидизатных брекчиях установлено наличие ксенолитов и ксеноблоков кимберлитов при отсутствии последних в приповерхностных условиях.

Всё сказанное может служить обоснованием применения технологии обработки и интерпретации данных ЭМЗ-ВП для решения задачи поиска низкоомных объектов, перспективных на наличие алмазов, которые перекрыты высокоомными многолетнемерзлыми породами, путем построения трехмерных геоэлектрических моделей.

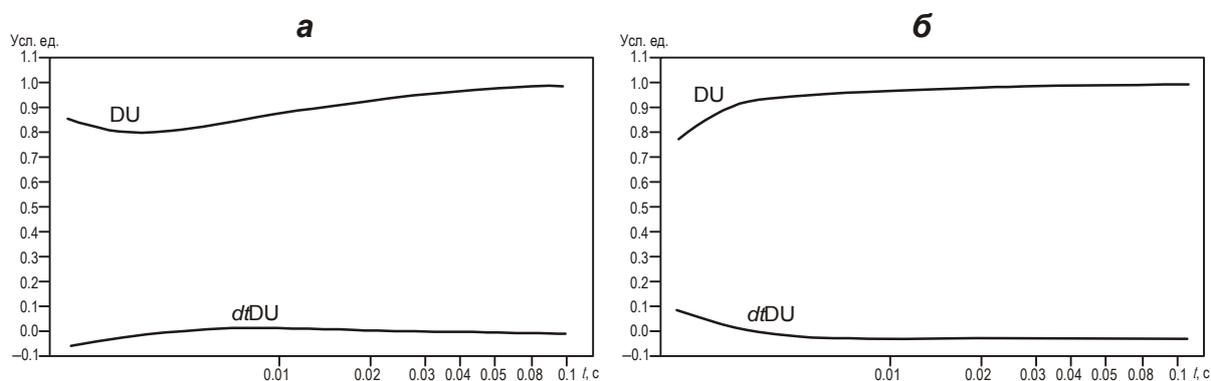
Проведение инверсии данных электромагнитных зондирований могло позволить перейти от кажущихся характеристик к построению геоэлектрических разрезов, однако для устойчивого решения обратной задачи имевшихся входных данных было недостаточно. В связи с этим было решено провести переобработку полевого материала – первичных данных с измерителей ИМВП-8, сохраненных в *wav*-формате – с помощью программных модулей аппаратно-программного комплекса “Марс”.

Переобрабатываемые данные были получены при измерениях установкой среднего градиента – четырьмя каналами одновременно регистрировались временные ряды разностей потенциалов приемных электродов  $MN$  в пределах генераторного диполя  $AB$ . Сила тока составляла 0.5 А, частота источника – 4.88 Гц, что при шаге дискретизации измерительного модуля 0.4 мс во время прямоугольного импульса длительностью 0.1024 с позволяет записывать с помощью АЦП кривую становления в 256 отчетов. Шаг по профилю составлял 40 м и соответствовал длине приемной линии  $MN$ ; расстояние между профилями – 50 м. Всего на исследованном участке было записано около тысячи точек наблюдения. В результате, для каждой приемной линии  $MN$  в штатно поставляемой программе OstorusPro были рассчитаны кажущиеся удельные сопротивления  $\rho_k$  и фазовый параметр  $\Delta\varphi_k^0$  или кажущаяся поляризуемость  $\eta_k$  (%) по приближенной формуле  $\eta_k = -2.5 \times \Delta\varphi_k^0$ . Эти параметры (в особенности  $\eta_k$ ) сохраняют зависимость от расстояния “источник–приемник”, поскольку коэффициент установки, рассчитанный для однородного полупространства, полностью эту зависимость не компенсирует, а при расчете  $\eta_k$  этот коэффициент и не используется.

Для каждого положения приемной линии  $MN$  из соответствующей непрерывной записи последовательности разнополярных импульсов рассчитывались усредненные переходные процессы и их временные производные на 16 временных задержках с логарифмическим шагом по времени. Значения переходных процессов на этих задержках нормировались на установившееся значение  $DU_0$ , полученное при усреднении 1/8 интервала токового импульса, взятого перед его выключением. При обработке использовался оригинальный алгоритм подавления тренда, позволяющий с высокой стабильностью получать отсчеты на временных задержках в условиях высокой теллурической

активности и дрейфа нуля на приемных электродах при наличии выбросов и сбоев. Такой подход в сочетании с применением методов робастной статистики позволяет существенно повысить стабильность результатов обработки [Давыденко и др., 2013]. Невязка уточненных значений  $DU_0$  со значениями, полученными по программе Ocorpus Pro, достигает 1.5%, что объясняется более корректным подавлением тренда.

Нормированные переходные процессы обозначим  $DU$ , а их временные производные –  $dtDU$ ; в фоновой области и над трубкой взрыва кривые  $DU$  и  $dtDU$  заметно различаются (рис. 1). Точность расчетов достаточно высока, коэффициент вариации и отношение стандартного отклонения к амплитуде сигнала практически для всего временного интервала редко превышает 0.1 %. Существенное различие кривых вызвано, прежде всего, изменением проводимости, что привело к росту индукционной составляющей, имеющей обратный знак с эффектом вызванной поляризации.



**Рис. 1.** Нормированные переходные процессы  $DU$  и их временные производные  $dtDU$  в фоновой области (а) и над трубкой взрыва (б). На горизонтальных осях  $t, c$  – временные задержки в логарифмическом масштабе времени

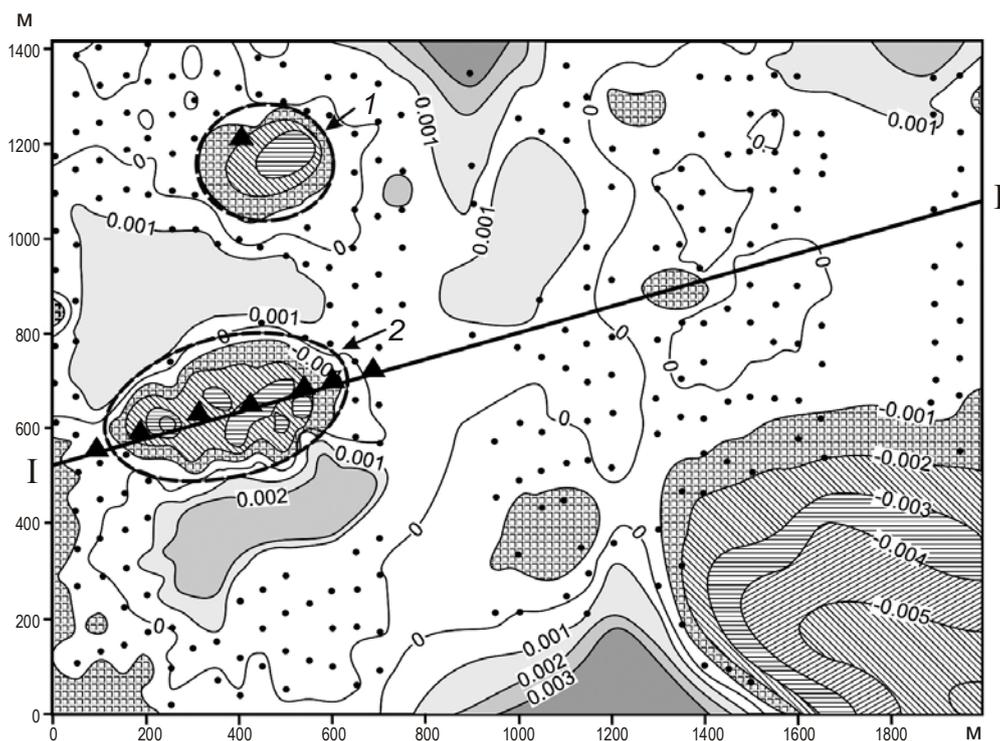
Недостаточная детальность кривых переходных процессов на ранней стадии объясняется низкой частотой дискретизации (2.5 кГц). Это означает, что в полосу пропускания попадают частоты немногим более 1 кГц (согласно теореме Найквиста). Кроме того, отсутствие привязки (аппаратной синхронизации) к фронту выключения существенно затрудняет вычисление переходных характеристик.

С применением быстрого преобразования Фурье к усредненной кривой переходного процесса были рассчитаны относительные фазовые характеристики для первой и третьей, третьей и пятой гармоник, имеющих высокую корреляцию с параметром  $\eta_k$ , полученным в штатной программе Ocorpus Pro. Анализ фазовых характеристик показал, что они являются обобщенной трансформантой, характеризующей форму кривой переходного процесса, чья информативность сопоставима со значениями временной производной на поздних задержках. Использование относительных фазовых характеристик не позволяет делать уверенные выводы о вкладах в наблюдаемое поле индукционных процессов и процессов вызванной поляризации. По этим характеристикам нельзя делать выводы и о глубине залегания объектов с использованием скин-эффекта. В то же время, такие оценки вполне возможны при анализе самих переходных процессов и их временных производных.

Для качественного анализа полевого материала необходимо минимизировать зависимость нормированных кривых  $DU$  и  $dtDU$  от положения измерительной линии и питающего диполя. Решение этой задачи аналогично приему, применяемому в гравиметрии для снятия региональной составляющей гравиметрического поля и выделения

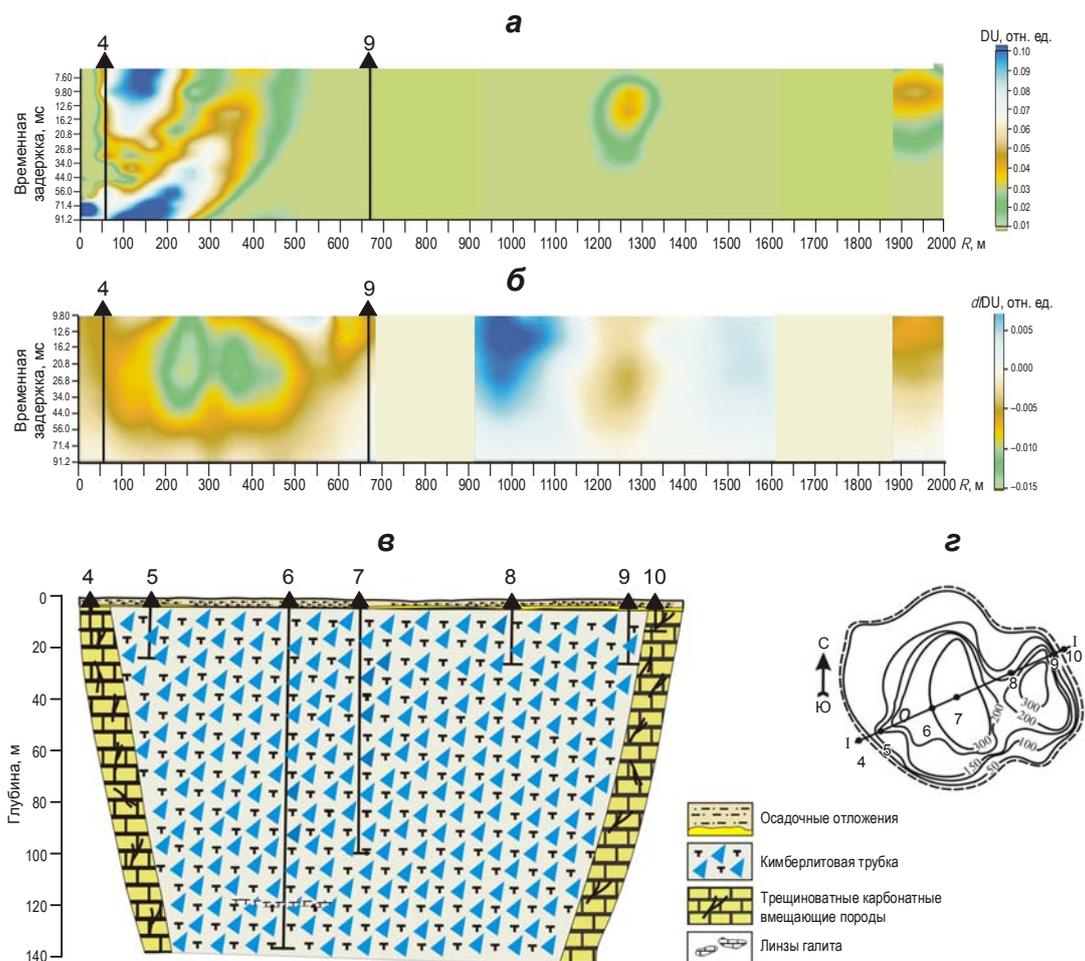
локальных аномалий. При обработке полевых кривых зондирований использовался оригинальный алгоритм робастной инверсии [Грайвер и др., 2010; Veeken et al., 2009], в котором с помощью итеративного подхода в исходных данных минимизируется влияние факторов, в дальнейшем называемых регрессорами. Робастность позволяет избежать появления смещенных оценок, возникающих под влиянием аномальных значений наблюдаемого поля, надежно увязав тренд в исходных данных с зависимостями, которые описывают регрессоры [Hubert et al., 2008]. В нашем случае в качестве регрессоров использовались аналитические функции, отражающие зависимость от положения питающего диполя  $AB$  и приемных электродов  $MN$ . Кроме того, в качестве регрессоров использовались значения переходных процессов, рассчитанные от эталонного многослойного разреза по площади съемки для соответствующих положений генераторного и приемных диполей.

С применением алгоритма робастной регрессии на каждой временной задержке построены карты (рис. 2) и псевдоразрезы (рис. 3, 4), в которых снято влияние геометрического фактора “источник–приемник” [Давыденко и др., 2012]. На псевдоразрезах можно уверенно дифференцировать аномальное поле протяженного на глубину объекта и локальные возмущения приповерхностных неоднородностей. Свойства же этих объектов определяются посредством инверсии в рамках модели среды с частотной дисперсией электропроводности.

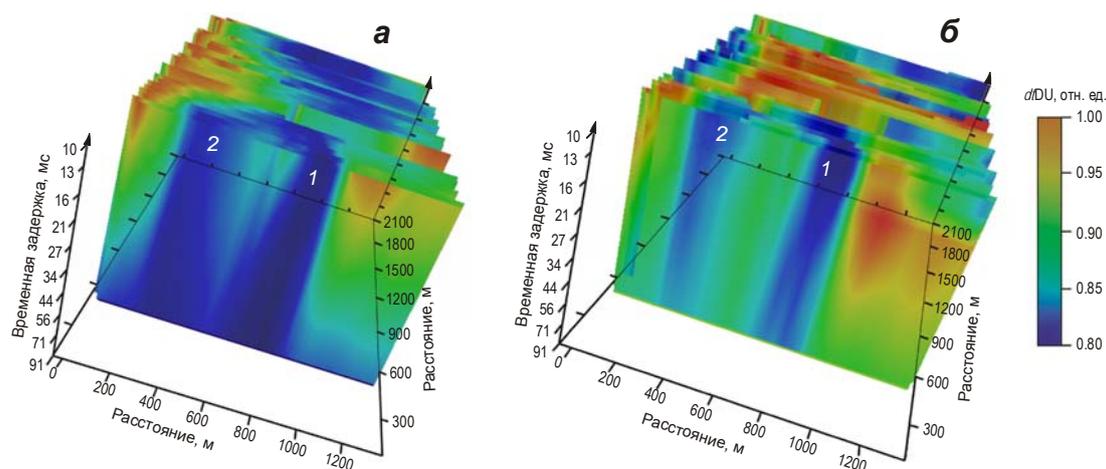


**Рис. 2.** Схема изолиний временной производной переходного процесса  $dtDU$  на поздней задержке (70 мс) после снятия влияния геометрического фактора “источник–приемник”. На схему нанесены контуры объектов, выделенных в магнитном поле после исключения интенсивных магнитных аномалий и эффекта рельефа в программе GelioSMI на участке проведения электрозведочных работ

1, 2 – исследуемые объекты; точки – пункты наблюдения, соответствующие серединам приемных линий  $MN$ ; треугольники здесь и далее – скважины, подтвердившие существование трубок взрыва; прямая I–I – линия, вдоль которой построены псевдоразрезы, представленные на рис. 3



**Рис. 3.** Псевдоразрезы переходных процессов  $DU$  (а) и их временных производных  $dtDU$  (б) по линии I–I, построенные после минимизации влияния эталонной модели и зависимости от геометрии установки. Сопоставление с геологическим разрезом, построенным по результатам бурения (в), г – проекция трубки на дневную поверхность с вынесенной линией профиля I–I



**Рис. 4.** Трехмерная визуализация переходных процессов, рассчитанных по методике ЭМЗ-ВП до (а) и после (б) минимизации влияния геометрического фактора “источник–приемник”

I – эталонный объект (выходящая на поверхность трубка взрыва), 2 – трубка, перекрытая высокоомными многолетнемерзлыми озерными отложениями, выделенная по результатам переобработки. Используются первичные данные ИНФАЗ-ВП (срединный градиент)

Анализ наблюдаемых кривых с применением робастного регрессионного анализа с привлечением результатов инверсии в рамках одномерной модели позволил выделить два объекта, заверенных бурением (объекты 1, 2 на рис. 2, 4). О наличии объекта 2 не было известно до тех пор, пока результаты переобработки не дали уверенный прогноз о наличии известной диатремы 1 (тело субщелочных безпироксеновых пикритов и других включений). Особенно хорошо оба объекта выделяются на поздних временных задержках; наиболее яркий результат получен на задержке 70 мс (см. рис. 2). Объекты хорошо совпадают с контурами аномалий в магнитном поле, выделенных после исключения интенсивных аномалий и эффекта рельефа. Следует отметить, что небольшая по размерам трубка взрыва (объект 2 на рис. 3, 4), перекрытая многолетнемерзлыми терригенными отложениями, не выделялась по карте кажущегося удельного сопротивления из-за наличия высокоомного экрана.

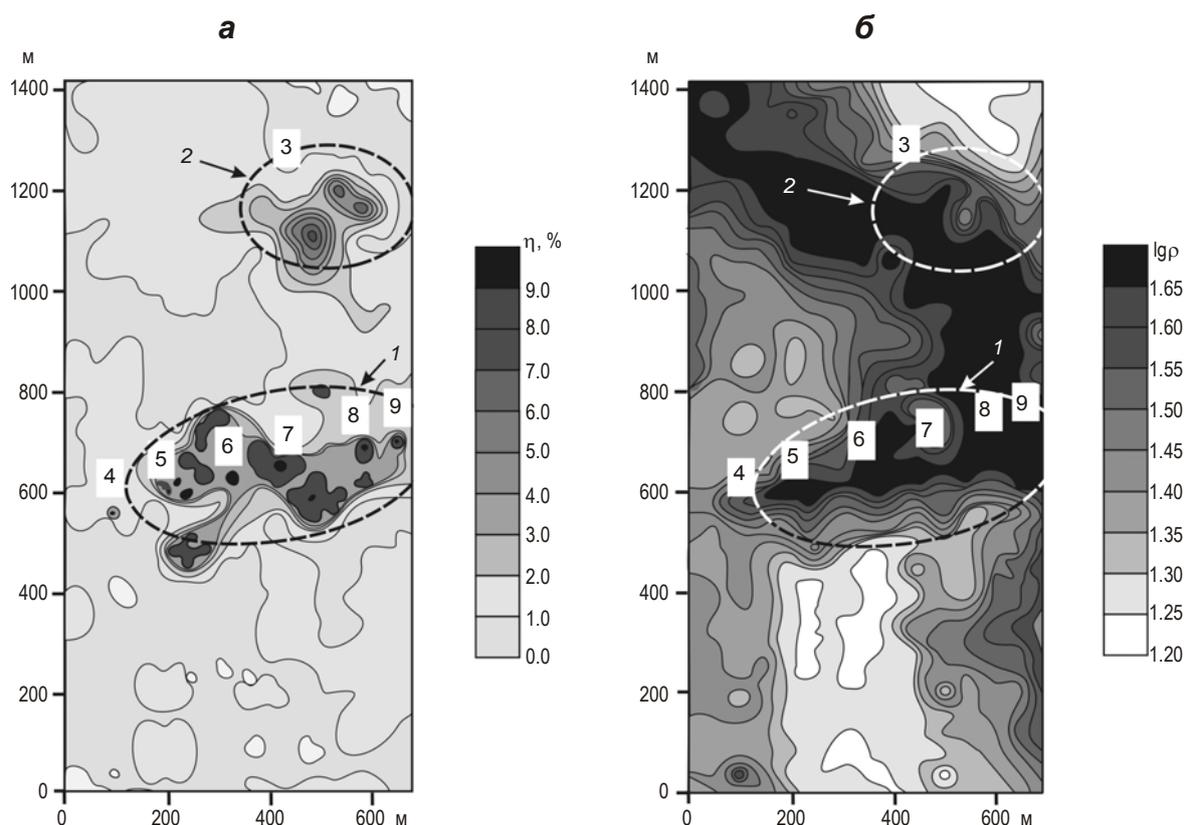
Ниже приведены результаты применения одномерной инверсии, в ходе которой для каждой точки зондирования рассчитывался сигнал от горизонтальнослоистого полупространства, а параметры слоев задавались с учетом частотной дисперсии электропроводности по формуле *Cole-Cole*. Таким образом выполнялось математическое моделирование полевых кривых *DU* и *dtDU* для получения слоистого геоэлектрического разреза по профилям. С учетом частотной дисперсии электропроводности были определены численные значения параметров поляризуемости разреза для каждого из слоев по всем точкам наблюдений. Всего до глубины 1200 м было выделено пять слоев.

Для обработки и интерпретации полевых данных использовался программный комплекс Mars 1D, обеспечивающий решение прямой и обратной задач геоэлектрики для заземленной линии. Динамическая библиотека с прямой задачей была любезно предоставлена авторам доктором физико-математических наук А.А. Петровым. Временной диапазон, используемый при моделировании, определялся достоверностью входных данных, т.е. точностью измерения каждого параметра в каждой точке наблюдения. В качестве функции невязки, минимизируемой в результате инверсии, использовалось среднеквадратическое отклонение. Результаты инверсии представляются в виде карт и разрезов распределения удельного электрического сопротивления и поляризуемости. При подборе в рамках одномерной модели раскреплялась поляризуемость только первого и третьего слоев, коэффициент множественной корреляции между которыми достаточно низкий – 0.3.

В районе трубок взрыва поляризуемость увеличивается до 2–6 %. Поляризуемость эталонной трубки (объект 1) распределена неравномерно – в северо-восточной части наблюдаются её значительный рост в первом слое (рис. 5, а) и кольцевой эффект с аномалиями посередине третьего слоя.

Наиболее достоверные данные о проводимости получены для второго геоэлектрического слоя мощностью 350 м, подошва которого залегает на глубине 450 м. Это объясняется тем, что аппаратные погрешности для соответствующих слою времен переходного процесса на результатах инверсии сказываются слабо. Удельное электрическое сопротивление второго слоя  $\rho_2$  соответствует по величине удельному электрическому сопротивлению известняков (доломитов) карбонатной толщи. Зональность распределения  $\rho_2$ , ориентированная вдоль силового кабеля, во втором слое выражена значительно слабее, чем в первом.

В пределах объектов 1 и 2 находится подковообразная зона пониженного сопротивления, связанная, по-видимому, с повышенной трещиноватостью ослабленных разломных зон, к которым приурочены трубки взрыва (рис. 5, б). Возможно, здесь существуют две разломные зоны, одна из которых имеет юго-западное простирание, вторая – северо-восточное; в центре площади эти зоны пересекаются под углом 30°–35°.



**Рис. 5.** Карты поляризуемости первого (0–100 м) слоя геоэлектрической модели (а) и распределения значений десятичного логарифма удельного электрического сопротивления в пределах второго (100–450 м) слоя

1, 2 – исследуемые объекты (трубки взрыва); пунктир – контуры трубок взрыва по данным бурения и магниторазведки; 3–9 – пробуренные скважины

Расчеты для переобработанных данных ИНФАЗ-ВП на участке “Марс” заверены независимой экспертизой, проведенной доктором технических наук, профессором Новосибирского государственного технического университета М.Г. Персовой. Выполненное трехмерное моделирование в программном комплексе GeoEM [Персова, Соловейчик, Тригубович, 2011] показало высокую чувствительность кривых становления для данной установки к геоэлектрическим параметрам среды и возможность локализации трехмерных объектов. Для получения приближенного распределения расчетных кривых на площади съемки потребовалось использование модели поляризующегося объекта, расположенного в верхней части разреза. Для других вариантов положения объекта получалась неприемлемая сходимость теоретических и наблюдаемых кривых.

Комплексный анализ позволяет делать надежные геологические прогнозы, поскольку включает в себя сопоставление локальных аномалий, выявленных после снятия влияния геометрии системы измерений посредством применения робастной регрессии, с результатами инверсии электромагнитных зондирований, проведенной с учетом частотной дисперсии электропроводности и данных детальной съемки магнитного поля.

Высокая плотность данных электромагнитных зондирований в методе срединного градиента делала возможным проведение их 3D-инверсии, для чего было необходимо усовершенствование методики проведения полевых работ и обработки данных.

Технология ЭМЗ-ВП и экспериментальный образец аппаратно-программного электроразведочного комплекса “Марс” прошли успешную апробацию в Якутии,

Приольхонье, Монголии, где за 2013–2015 гг. было записано более 5000 точек зондирования. Проведенные исследования показали, что по сравнению с традиционными методами постоянного тока и зондирования установкой “петля–петля” (МПП) технология ЭМЗ-ВП обеспечивает более высокую чувствительность к поляризационным параметрам разреза и разрешающую способность по латерали. При проведении полевых работ предлагаемая методика отличается высокой гибкостью и технологичностью. При этом стоимость одной физической точки наблюдения ЭМЗ-ВП в два-три раза ниже стоимости точки МПП.

Интерес представляет совместное использование на одном участке двух методов – ЭМЗ-ВП и МПП. Высокая разрешающая способность МПП, позволяющая установить распределение проводимости разреза по глубине, может значительно снизить области эквивалентности в используемой в ЭМЗ-ВП геоэлектрической модели с поляризационными параметрами. Выводы, сделанные для объектов типа “трубка взрыва”, распространяются и на другие объекты поиска в рудной геофизике. Как правило, частотная дисперсия электропроводности в районе рудных тел существенно отлична от дисперсии вмещающих пород, что позволяет их обнаруживать с использованием предлагаемой технологии.

### **Выводы**

С использованием технологии ЭМЗ-ВП осуществляется надежное выделение слабоконтрастных объектов, перекрытых породами мощностью до 200–300 м. Поэтому её следует опробовать при поисках слепых рудных тел (золота, полиметаллов и др.), находящихся в высокоомных средах (в гранитах, под покровами базальтов) и в других сложных геолого-геофизических условиях.

Благодаря применению заземленных источника и приемника метод обладает более высокой чувствительностью к выявлению неоднородностей в геоэлектрическом разрезе по сравнению с методами, использующими индукционные источники возбуждения и приема. Высокая частота дискретизации разрабатываемой аппаратуры обеспечивает полосу прозрачности более 40 кГц, что делает возможным изучение процессов становления поля для пород верхней части разреза, начиная с первого десятка метров.

Использование технологии ЭМЗ-ВП для инженерно-геологических изысканий существенно повысит информативность традиционно применяемых в малоглубинной геофизике методов постоянного тока и позволит делать выводы о вещественном составе отложений.

Многолетнемерзлые породы, широко распространенные в северных регионах России, экранируют проникновение постоянного тока и накладывают существенные ограничения на глубину исследований. Использование информации об индукционной составляющей электромагнитного поля делает эти высокоомные экраны прозрачными для методики ЭМЗ-ВП, что говорит о перспективности ее применения в комплексе геофизических методов для инженерно-геофизических изысканий в условиях Сибири и Дальнего Востока. Таким образом, разрабатываемая технология ЭМЗ-ВП представляется мощным инструментом для исследования криолитозоны при решении инженерных задач, в том числе при изысканиях под строительство дорог и трубопроводов в условиях Крайнего Севера.

### **Благодарности**

Авторы выражают искреннюю благодарность участникам проекта, без активного участия которых было бы невозможно получение описанных выше результатов:

- доктору физико-математических наук, профессору А.Ю. Давыденко за разработку алгоритмов робастной регрессии для анализа данных переходных процессов;
- доктору технических наук, профессору М.Г. Персовой за верификации материалов с помощью трехмерного моделирования;
- доктору физико-математических наук А.А. Петрову за любезно предоставленные динамические библиотеки с прямой задачей становления поля;
- С.В. Яковлеву за неоценимый вклад в обработку первичных данных;
- И.Ю. Пестереву за разработку программы одномерной инверсии Mars 1D и проявленную настойчивость в достижении геологически непротиворечивых результатов моделирования;
- ведущим геофизикам ОАО “Алмазы Анабара” И.С. Куприянову и С.В. Слепцову за ответственный подход к проведению полевых работ и предоставление полноценных первичных данных.

### Литература

- Грайвер А.В., Давыденко А.Ю., Давыденко Ю.А., Иванов С.А., Легейдо П.Ю. Статистический подход к обработке и анализу высококоррелированных данных морской электроразведки // Материалы 37-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского. М.: ИФЗ РАН, 2010. С.111–115.
- Давыденко Ю.А., Давыденко А.Ю., Персова М.Г., Трусов А.А., Попков П.А. Интеграция статистического подхода и трехмерного моделирования при обработке и интерпретации данных электромагнитных зондирований (метод электромагнитных зондирований и вызванной поляризации (ЭМЗВП), аэроэлектроразведка) // Тезисы доклада на 2-й международной научно-практической конференции “Геобайкал 2012”. Иркутск, 2012. Электронный ресурс: <http://www.earthdoc.org>.
- Давыденко Ю.А., Давыденко А.Ю., Куприянов И.С., Пестерев И.Ю., Попков П.А., Слепцов С.В., Яковлев С.В. Эффект интеграции робастного регрессионного анализа с инверсией для переходных процессов в методе срединного градиента при изучении трубок взрыва на Анабарском щите // Записки горного института. СПб., 2013. № 200. С.28–33.
- Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Тригубович Г.М. Компьютерное моделирование геоэлектромагнитных полей в трехмерных средах методом конечных элементов // Физика Земли. 2011. Т. 47, № 2. С.3–14.
- Davydenko A.Y., Grayver A.V., Principal component analysis for filtering and leveling of geophysical data // J. Appl. Geophys. 2014. V. 109. P.266–280.
- Hubert M., Rousseeuw P.J., Van Aelst S. High-Breakdown Robust Multivariate Methods // Statistical Science. 2008. V. 23, N 1. P.92–119.
- Veeken P.C.H., Legeydo P.Y., Davydenko Yu.A., Ivanov S.A., Kudryavceva E.O., Chuvaev A.A. Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration // Geophysics. 2009. V. 74, N 2. P.47–58.

#### Сведения об авторах

**ДАВЫДЕНКО Юрий Александрович** – кандидат физико-математических наук, доцент, Научно-исследовательский Иркутский государственный технический университет. 664038, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83. Тел.: 8(914) 871-98-42. E-mail: [davidenkoya@gmail.com](mailto:davidenkoya@gmail.com)

**ПОПКОВ Петр Александрович** – начальник геофизического отдела ОАО “Алмазы Анабара”. 677000, Республика Саха (Якутия), Якутск, ул. Чернышевского, д. 6. Тел.: 8(4112) 45-03-06. E-mail: [popkova@alanab.ru](mailto:popkova@alanab.ru), [PPitA@rambler.ru](mailto:PPitA@rambler.ru)

**НОВОПАШИНА Анна Владимировна** – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН. 664038, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128. Тел.: 8(950) 140-57-88. E-mail: anek@crust.irk.ru

## PERSPECTIVES OF USING THE INDUCTIVE COMPONENT OF TRANSITION PROCESS IN TRADITIONAL DC METHODS

Y.A. Davidenko<sup>1,2</sup>, P.A. Popkov<sup>3</sup>, A.V. Novopashina<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *National Research Irkutsk State Technical University, Irkutsk, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia*

<sup>3</sup> *JSC "Anabar diamonds", Yakutsk, Russia*

**Abstracts.** The paper discusses electromagnetic sounding and induced polarization methods (EMIP method) developed for solving a wide range of problems in shallow-depth, ore and oil geophysical exploration.

The idea of EMIP methods has been formulated through re-processing of the data obtained by exploration using INFAZ IP method for measurement of the mean gradient to reveal blowholes on the Anabar shield. The use of program modules of the geoelectric hardware-software complex (GHSC) "Mars" provided an opportunity to make the fieldwork material more informative and identify transient impulses. As a result, a blowhole not shown on the apparent resistivity map has been contoured near the reference object. The drilling data has shown that the blowhole is overlain by high-resistivity terrigenous multi-year frozen lacustrine sediments preventing current penetration. Sensitivity to variation in the section of geoelectric parameters has been determined based on one-dimensional inversion of the areal data to a depth of 1200 m.

EMIP methods imply the maximum use of information on transient processes recorded using potential electrodes at the current passage through grounded dipole. High-resistivity layers are transparent for induced currents arising from impulse cutoff. Besides, passage of current evokes polarized medium, and current cut-off leads to the induced polarization (IP) effects related to chemical composition and physical properties of the rocks. Simultaneous use of information on the induction component and IP processes allows identifying low-contrast polarizable objects (rocks with disseminated sulfide mineralization) in high-resistivity rocks (granites, basalts, etc.).

**Keywords:** robust regression analysis, induced polarization, electromagnetic sounding, mean gradient, transients, frequency dispersion of conductivity, robustness.