

VII. ГЕОФИЗИКА

УДК 550.837.6

С. И. Евдокимов, И. М. Евдокимов

О ВЛИЯНИИ ИНДУКТИВНО ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ СРЕДЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТОДОМ ИНДУКТИВНОСТИ ПЕТЛИ

Аннотация. В статье рассмотрен опыт применения метода индуктивности петли для поисков рудных залежей, обладающих явлением индуктивно вызванной поляризации. Обобщен опыт интерпретации материалов измерений методом индуктивности петли, проведенных над сплошными рудными телами, крупнозернистыми вкрапленниками и рассеянными мелкодисперсными залежами с непромышленным содержанием металлов.

Ключевые слова: электроразведка, метод индуктивности петли, МИВП, сульфидная минерализация, крупнозернистые вкрапленники, индуктивно вызванная поляризация, нелинейная поляризация, линейная поляризация, «отрицательные» аномалии проводимости, магнетиты, титаномангнетиты, коэффициент частотной дисперсии.

При работах методами индуктивной электроразведки наряду с чисто индукционными эффектами наблюдается влияние индуктивно возбуждаемой вызванной поляризации — ИВП. В методе переходных процессов (МПП) — наиболее распространенном индуктивном методе часто наблюдаются «отрицательные» аномалии, когда наблюдаемый сигнал изменяет знак на обратный по отношению к тому, который имеет место над участками с повышенной электропроводностью. В других случаях сигнал переходного процесса хотя и не меняет знак, но может быть существенно снижен за счет влияния ИВП, настолько, что рудная залежь может остаться незамеченной. Теория и практика методов МПП и ВП свидетельствует о тесной связи явлений переходных процессов и поляризуемости в среде, так как первичное поле возбуждает оба процесса одновременно. Проблема оценки влияния ИВП на переходный процесс МПП и на измеряемые сигналы в других индуктивных методах является одной из самых актуальных проблем индуктивной электроразведки — прежде всего потому, что сигнал ИВП по знаку противоположен сигналу от проводящих рудных залежей и маскирует их, а при значительных величинах может полностью стереть аномалию проводимости и тем самым скрыть рудную залежь. В случае изучения природы магнитных аномалий ИВП, вызванная вкрапленниками магнетитов или рассеянной рудной минерализацией, может существенно повлиять на оценку природы данной анома-

лии. Разделение индукционного и поляризационного эффектов представляет большой практический интерес как для устранения искажающего влияния ИВП, так и для получения дополнительной информации о поляризуемости среды.

Способ измерения, принятый в МПП, не позволяет отделить сигнал переходного процесса от сигнала ИВП. В методе индуктивности петли применяется мостовой способ измерения, в котором реализуется раздельное измерение внесенного импеданса строго по составляющим, в соответствии с теоретическими расчетами и реальной физикой изучаемых процессов: внесенная индуктивность соответствует вещественной части вторичного магнитного поля, а внесенное активное сопротивление — мнимой его части. ЭДС вызванной поляризации, как будет показано ниже, находится в противофазе с внесенной индуктивностью и снижает ее величину, но практически не влияет на величину внесенного активного сопротивления. Независимость измерения внесенного активного сопротивления делает возможным определение проводимости среды без влияния ИВП и дальнейшее вычисление коэффициента поляризуемости.

Оценка влияния поляризуемости проводящего полупространства на входное сопротивление витка произведена в работе М.М. Федорова и П.П. Скачкова [1977]. При малых параметрах (низких частотах) формула для присоединенного комплексного сопротивления витка выражает зависимость от электромагнитного параметра среды и коэффициента частотной дисперсии, связанного с поляризуемостью и пропорционального объемному содер-

жанию электропроводящих включений в породе. Исходя из этого, нами получено выражение для присоединенной индуктивности петли на однородном и поляризуемом полупространстве [Евдокимов, Селезнева, 1994].

$$\Delta L/A = -0,185x^3 + \Psi(1,32x^2 - 0,59x) \text{ мкГн/м. (1)}$$

Первый член выражения характеризует внесенную индуктивность петли, обусловленную проводимостью при нулевой поляризуемости среды, второе слагаемое — вклад поляризуемости среды. Проводимость и поляризуемость вносят вклады противоположных знаков. Влияние индуктивно вызванной поляризации среды проявляется при малых параметрах как отрицательные аномальные эффекты. При значениях коэффициента частотной дисперсии $\Psi = 0,1-0,2$, характеризующих вкрапленники проводящих минералов, аномальные эффекты ИВП могут достигать значений $0,01-0,03$ мкГн/м, т.е. например, для петли 400×400 м аномальный эффект составит $2-6$ мкГн, что вполне соизмеримо с аномальными эффектами от проводящей среды.

Структура полученного выражения способствует разделению аномального эффекта на индуктивную и поляризационную части и позволяет производить такое разделение, используя измерения на одной петле на нескольких частотах. Этот способ был применен для определения проводимости и коэффициента частотной дисперсии на нескольких участках, получены удовлетворительные результаты. Однако следует подчеркнуть, что такая методика может использоваться с достаточной степенью достоверности при условии малого электромагнитного параметра и при условии однородности среды как по проводимости, так и по поляризуемости. При невыполнении этого условия изменение проводимости на глубине маскирует изменение вызванной поляризации и наоборот. Таким образом, этот способ разделения аномальных эффектов не представляется достаточно эффективным. Для этой цели более интересным является использование мнимой составляющей поля (т.е. внесенного активного сопротивления).

$$\Delta R/\omega A = x^2(0,26 - 0,115x + 0,47x\Psi) \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м. (2)}$$

По уравнениям (1) и (2) составлена программа для расчета на компьютере и рассчитаны значения аномальных эффектов ΔL и ΔR для широкого диапазона электромагнитного параметра X и коэффициента частотной дисперсии Ψ ($X = 0,1-10$; $\Psi = 0,005-0,30$). По результатам расчета построены палетки $\Delta L(X, \Psi)$, $\Delta R(X, \Psi)$. При этом оказалось, что значения ΔR при всех коэффициентах Ψ мало отличаются друг от друга, и влияние поляризуемости на активное сопротивление петли практически

можно не учитывать. Отсюда вытекает возможность разделения аномальных эффектов от проводимости и поляризуемости среды. Вкратце схема может быть изложена так: с помощью палетки $\Delta R(X, \Psi)$ по измеренному значению ΔR на некоторой частоте определяется электромагнитный параметр X и проводимость среды. Затем, используя полученное значение параметра и измеренное ΔL по палетке $\Delta L(X, \Psi)$, способом интерполяции определяется значение частотной дисперсии и соответствующая поляризуемость. Применяя этот способ для всех используемых частот можно получить распределение проводимости и поляризуемости по глубине, так как для каждой частоты существует величина $H_{эфф}$ — эффективная глубина проникновения электромагнитного поля в среду на данной частоте.

Приведем пример применения этого способа к результатам работ на участке Муртыкты (месторождение с сульфидным рассеянным оруденением). В то время как значения кажущейся проводимости составляют $0,001-0,002$ Сим/м и равномерно убывают с глубиной, значения коэффициента частотной дисперсии на глубине $94-163$ м достигают максимума и составляют $0,06-0,076$, что может быть связано с вкрапленниками с содержанием до 5% .

Изучение проводимости геологических разрезов при различных токах в петле показало, что большинство разрезов содержащих рассеянные вкрапленники сульфидов, магнетитов и т.д. в больших объемах, обладают, наряду с линейной, также и нелинейной поляризуемостью. Появление внесенной ИВП является следствием сложных электрохимических процессов, протекающих в породе под воздействием электромагнитного поля. Она обнаруживается при мостовом способе измерения с высокой чувствительностью. Установлено, что влияние нелинейной ИВП на измеряемые величины внесенной индуктивности может быть значительно ослаблено за счет снижения тока в петле до десятых и сотых долей ампера. Величина внесенной индуктивности, обусловленная проводимостью и линейной ИВП, не зависит от величины тока в петле.

Оценка влияния ИВП на результаты работы методом индуктивности петли. Влияние ИВП на результаты расшифровки природы магнитных аномалий

Измерения, проводившиеся на магнетитовых месторождениях, представленных сплошными рудами, с целью создания и дальнейшего совершенствования методики расшифровки магнитных аномалий на магнетитовое оруденение методом индуктивности петли, не осложнялись индуктивно вызванной поляризацией, так как крупные тела

магнетитовых руд залегают, как правило, в немагнитных породах — это Канакайское, Кужайское, Краснокаменское, Березовское, Изыгское месторождения. Примером совместного залегания магнетитовых руд и магнитных пород могут служить Круглогорское месторождение магнетитов в Челябинской области и Нижне-Быстринское рудопроявление магнетитовых руд в Красноярском крае. Круглогорское месторождение приурочено к периферической зоне габбрового массива, прорывающего эффузивно-осадочные породы ирендыкской свиты. В основном породы немагнитны, за исключением серпентинитов, которые залегают над рудными телами. Влияние серпентинитов на измеряемые величины не выходит за пределы тех расчетных значений, которые были сделаны авторами при неоднократных измерениях на Круглогорском месторождении, что свидетельствует об отсутствии сколько-нибудь значительных проявлений нелинейной вызванной поляризации. Прежде всего потому, что эти измерения проводились в разные годы разными комплектами аппаратуры, при разных величинах тока в петле от 0,1 А до 2 А, и тем не менее повторяемость, т.е. воспроизводимость результатов измерений, получилась в пределах 0,03%. Нижне-Быстринское проявление магнетитовых руд, расположенное в одном из эпицентров магнитной аномалии, в контакте интрузивного массива, представлено линзой магнетитовой руды, залегающей в пироксен-эпидотовых скарнах. Магнетитовое тело окружено дайками диоритовых порфиритов, диабазовыми порфиритами эффузивными и пирокластическими породами среднего состава. Все они отличаются высокими значениями магнитной восприимчивости, немагнитными являются карбонатные и вулканогенные породы кислого состава. Учитывая отсутствие заметной поляризуемости, можно вполне уверенно утверждать, что повышенные значения магнитной восприимчивости пород объясняются рассеянным на атомно-молекулярном уровне по всему объему пород магнитным веществом.

Иллюстрацией проявления ИВП служат измерения, проведенные на магнитных аномалиях в районе Магнитогорска, где присутствуют сильномагнитные породы, создающие линейное ИВП, повышающее расчетные значения магнитной восприимчивости, в Сибири на аномалии горы Сосновой и аномалии А-59-2 в Оренбургской области. На площади аномалии горы Сосновой распространены осадочные породы: известняки, песчаники, а также трахилипариты на контакте с андезитобазальтами. Измерения характеризовались такими размерными соотношениями аномальных эффектов, которые не поддавались интерпретации палет-

ками геометрического зондирования. Интерпретация отдельными установками указывала, что основная магнитная масса имеет безрудный характер. Однако аномальные эффекты на всех петлях были завышены в 1,5–2 раза. По результатам расчетов был сделан прогноз, что на глубине 80 м находится тело с повышенной магнитной восприимчивостью, размером 200×100×25 м. Далее на глубине 350–360 м — сильномагнитный объект, размером минимум 400×400, мощностью минимум 100 м с близкой к рудной магнитной восприимчивостью $\epsilon \sim 0,06$ единиц СГС, характерной для сплошных магнетитов. Бурение показало, что на глубине 350 м находятся вкрапленники магнетитов с большой магнитной восприимчивостью, но по содержанию до 10–20% магнетитов. Вкрапленники магнетитов с содержанием менее 20% должны были дать ϵ не более 0,04 единиц СГС. Анализ результатов измерений, проведенный в настоящее время, позволил выявить наличие влияния ИВП. Следовательно, повышенные значения аномальных эффектов объясняются наличием линейно вызванной поляризации.

Аномалия А-59-2, находящаяся в 1,5 км на запад от населенного пункта Просторы, служит примером удачного использования ИВП. На площади аномалии развиты отложения ранневизейского возраста, представленные липаритовыми и липарито-дацитовыми порфирами и их туфами. С ними связано крупное линзовидное тело диабазов, вытянутое в субмеридиональном направлении. На аномалии был проделан полный комплекс работ: измерены петли со стороной 200, 400, 600, 800 м. На каждой петле проверялось наличие ИВП. Измерения проводились при минимальной нелинейной поляризуемости, обеспечиваемой минимальным током в петле. При интерпретации было учтено проявление нелинейной ИВП и прогнозирована основная масса магнитного материала как вкрапленники магнетитов и титаномagnetитов. Аномалия была интерпретирована как нерудная с содержанием магнетитов менее 20%. Бурение показало, что вмещающие породы — порфиры немагнитны, тело магнитной массы расположено, как и прогнозировалось, на глубине 150 м и представлено вкрапленниками магнетитов и титаномagnetитов с содержанием от 12 до 15%. Все эти аномалии были разбурены после проведенных нами работ, что позволило оценить степень влияния ИВП на измеряемые величины. Наши прогнозы были подтверждены бурением.

Ярким примером поляризуемой среды служат породы, насыщенные вкрапленниками сульфидной минерализации. Расчеты ИВП, проведенные по результатам измерений на участках «Фланги

рудопроявления Березки», «Месторождение Озерное и его фланги», «Муртыкты», «Мансурово» и др., показывают, что вкрапленники сульфидов вызывают в петле, наряду с нелинейной поляризацией, также и линейную ИВП.

На участке «Фланги рудопроявления Березки» породы представлены вулканогенно-обломочными слоистыми образованиями улутауской свиты, осложненными тектоническими нарушениями субмеридионального и северо-западного простирания. Породы на участке в целом высокоомны. Здесь отмечаются аномалии проводимости на частотах 130–89 Гц. При измерениях была зафиксирована на самых низких частотах нелинейная поляризация. Расчеты поляризуемости, проведенные на разных частотах, показали поляризуемость $\Psi = 0,05$; $\Psi = 0,045$; $\Psi = 0,036$; $\Psi = 0,032$, причем наибольшую на низких частотах. Уровень поляризуемости указывает на отсутствие больших скоплений вкрапленников сульфидной минерализации. Следовательно, есть все основания констатировать — промышленной руды на данном участке на глубинах до 300 м нет.

Участок в районе пос. Мансурово располагается в пределах Ахуново-Первомайской структурно-формационной зоны Учалинского рудного района. На участке развиты породы улутауской и ирендыкской свит. Было разложено 30 петель, несколько из них зафиксировали повышенную проводимость, однако повышенная поляризуемость отмечена не всеми петлями. Бурение, проведенное на участке, вскрыло вкрапленники сульфидной минерализации, причем именно там, где аномалии ИВП достигали наивысшего значения $\Psi = 0,1-0,14$, скважиной вскрыты наибольшие по содержанию вкрапленники. Те же петли, что отмечали нелинейную ИВП, имели и линейную, причем величины рассчитанной линейной поляризации и определенные по ним процентные содержания вкрапленников хорошо совпали с результатами химических анализов.

Аналогичная картина наблюдается на известной залежи золото-сульфидного месторождения Муртыкты, несмотря на малую площадь горизонтального сечения залежи вкрапленников сульфидов по сравнению с площадью петли $\sim 1:20$. Получена аномалия проводимости, но, что особенно ценно, расчеты выявили аномальные значения вызванной поляризации $\Psi = 0,06$; $0,07$; $0,075$; $0,070$ на глубине от 90 до 200 м, совпадающие с интервалами повышенной проводимости.

Кроме работ связанных с поисками магнетитовых, медноколчеданных руд и скоплений сульфидной минерализации, проводились также работы на участках с проявлениями графитовой минерализации. В первом случае в районе г. Миасс, а во втором

у с. Абзаково [Евдокимов, Селезнева, 1996] юго-восточнее г. Белорецк. В обоих случаях не было отмечено существенного проявления нелинейной ИВП, однако расчеты показали, что имеет место значительная линейная поляризация $\Psi = 0,1$; $0,14$; $0,15$; $0,13$; $0,16$; $0,08$. Эти данные хорошо согласуются с широко распространенным представлением о поляризуемости графитов. Видимо, природа вызванной поляризации графитов несколько отличается от природы ВП, обусловленной сульфидной минерализацией. На основании этих данных можно сделать предположение, что графит на контакте с диэлектриком, которым является порода, не создает значительной нелинейной индуктивно вызванной поляризации.

Сплошные медноколчеданные и магнетитовые руды при индуктивном возбуждении поля не проявляют эффектов ИВП. Мы проверили это, проанализировав материалы измерений на всех известных месторождениях сплошных медноколчеданных (Октябрьское, Чебачье, Юбилейное, Подольское) и магнетитовых (Круглогорское, Канакайское, Кужайское, Краснокаменское, Березовское, Изыгское) руд, на которых мы работали.

Из приведенного анализа результатов измерений за многие годы совершенно очевидно следует, что ИВП несет существенную информацию о том, в каком виде находится минерализация, обуславливающая повышенную проводимость той или иной породы.

Следует отметить положительную особенность метода индуктивности петли — отсутствие зависимости измеряемой величины от величины тока в петле при отсутствии нелинейной ИВП, что исключает один из основных источников погрешностей, свойственных другим индуктивным методам.

В настоящее время можно с уверенностью считать, что нами установлена причина повышенных значений магнитной восприимчивости, получаемых при изучении геологической природы магнитных аномалий петлевыми индуктивными методами. Ряд магнитных аномалий, проверенных бурением в Красноярском крае, Челябинской и Оренбургской областях, будучи вызваны вкрапленниками магнетитов, в низкочастотных электромагнитных полях создавали повышенные значения магнитной восприимчивости, обусловленные влиянием ИВП.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод, что сигнал индуктивно вызванной поляризации, во всех индуктивных методах являющийся помехой для определения проводимости и магнитной восприимчивости среды, в методе индуктивности петли является дополнительным параметром, характеризующим среду.

Литература:

Евдокимов И.М., Селезнева Г.В. Влияние вызванной поляризации на входное сопротивление петли // Ежегодник–1993 / УНЦ РАН. – Уфа, 1994. – С. 156–160.

Евдокимов И.М., Селезнева Г.В. Некоторые особенности аномалии проводимости, обнаруженной мето-

дом индуктивности петли у с. Абзаково // Ежегодник–1994 / ИГ УНЦ РАН. – Уфа, 1996. – С. 131–134.

Федоров И.М., Скачков И.П. О влиянии поляризуемости внешней среды на входное сопротивление витка // Электромагнитные исследования при поисках и разведке рудных месторождений. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1977. – С. 130–132.

Сведения об авторах:

Евдокимов Сергей Игоревич. Институт геологии Уфимского научного центра Российской академии наук (ИГ УНЦ РАН), г. Уфа. E-mail: geomip@mail.ru.

Евдокимов Игорь Михайлович. Независимый исследователь, автор метода, г. Уфа. E-mail: igoriv8@mail.ru.

INFLUENCE OF INDUCTIVELY INDUCED POLARIZATION OF ENVIRONMENT ON RESULTS OF MEASUREMENTS BY METHOD OF A LOOP INDUCTANCE

S. I. Evdokimov, I. M. Evdokimov

Evdokimov Sergey Igorevich, Institute of geology of the Ufimian scientific centre (IG USC RAS), Ufa, Russia. E-mail: geomip@mail.ru.

Evdokimov Igor Mikhaylovich. Independent researcher, author of the method, Ufa, Russia. E-mail: igoriv8@mail.ru.

Abstract. An experience of application of a loop inductance method for prospecting of ore deposits based on the phenomenon of inductively induced polarization is considered. The interpretation of the measurements carried out by a method of loop inductance is summarized for continuous ore bodies, coarse-grained disseminated ores, and scattered fine deposits with nonindustrial metal contents.

Keywords: electric prospecting, method of inductance and mutual inductance of the loop MIMIL, sulphide mineralization, coarse phenocrysts, inductively induced polarization, «negative» conductance anomaly, magnetite, titanomagnetite, frequency dispersion coefficient.