УДК 550.837: 537.876.23 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2022-3-70-79

Изучение поляризационных эффектов с помощью техногенного электромагнитного поля

Вадим Анатольевич ДАВЫДОВ*

Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность и цель работы. Для большинства электроразведочных методов техногенные поля выступают в качестве помех, однако промышленные поля можно попытаться использовать и в качестве источника полезного сигнала, учитывая повсеместность их распространения. Целью работы является обоснование и практическое подтверждение возможности использования гармоник техногенного электромагнитного поля (ТЭМП) для выявления поляризационных эффектов геологической среды. К основным задачам исследований относится сравнительный анализ различных параметров ТЭМП на известных рудных объектах, обладающих электрической поляризацией.

Методология. Полевые наблюдения за электрическими и магнитными компонентами ТЭМП осуществлялись двухканальным универсальным приемником ОМАР-2 (ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург). Электрическая составляющая измерялась с помощью заземленной или стелющейся линии, в качестве магнитоприемников выступали пассивные и активные датчики индукционного типа. По данным синхронных наблюдений ортогональных компонент электромагнитного поля вычислялись электрические и поляризационные параметры среды.

Результаты. Представлены общие сведения об электрических и магнитных составляющих индустриальных полей и их связи с вызванной поляризацией. Вводятся понятия основных поляризационных параметров техногенных полей: коэффициентов частотной дисперсии и коэффициентов сетевых гармоник, приведены расчетные формулы для их вычисления. Рассмотрен спектральный состав электрических и магнитных компонент ТЭМП, на основании которого выделен вклад основной частоты и кратных гармоник в общую амплитуду сигнала. Определены главные условия получения достоверных данных: проведение измерений в ближней зоне (зоне индукции) техногенного источника, а также высокая амплитуда и стабильность сигналов. Для выполнения необходимых условий количество измеряемых частот ТЭМП ограничено тремя первыми гармониками: 50, 100 и 150 Гц. Приведены результаты опытно-методических работ на контрольных профилях четырех рудных объектов Свердловской области: Чусовском медноколчеданном месторождении, Шиловском медно-скарновом месторождении, Ельчевском сульфидном рудопроявлении и Воронцовском золоторудном месторождении.

Выводы. Результаты исследований указывают на принципиальную возможность изучения поляризационных эффектов среды с помощью техногенных электромагнитных полей. Так, в районе залегания рудных объектов зафиксированы повышенные значения коэффициентов частотной дисперсии и коэффициентов сетевых гармоник ТЭМП. Наиболее перспективными признаны коэффициенты сетевых гармоник, имеющие больший радиус действия зоны индукции и обладающие более контрастным аномалиями.

Ключевые слова: техногенное электромагнитное поле, зона индукции, импеданс, поляризация, частотная дисперсия, сетевые гармоники, сульфидная минерализация, рудные месторождения.

Введение

Линии электропередачи (ЛЭП), трансформаторные подстанции, электрические установки промышленных предприятий и других объектов являются мощными источниками техногенных электромагнитных полей (ТЭМП). Для большинства электроразведочных методов техногенные поля выступают в качестве помех, поэтому традиционная геофизическая аппаратура создается с учетом исключения сетевых гармоник из диапазона измерений или их существенного подавления. В то же время промышленные поля можно попытаться использовать и в качестве источника полезного сигнала, учитывая повсеместность их распространения. Вопросы измерения, моделирования и практического применения ТЭМП периодически возникали у многих отечественных исследователей [1–4]. За рубежом также проявляют интерес к изучению электромагнитных полей ЛЭП [5–11] и станций катодной защиты [12]. Однако работы по данной теме носят эпизодический характер и остаются в рамках научных исследований. Отсутствие развития объясняется сложностью и нестационарностью индустриальных полей с изменяющимся количеством источников разной направленности. Все предложенные ранее варианты использования ТЭМП предполагают изучение электропроводности или удельного электрического сопротивления (УЭС) среды.

✉davyde@yandex.ru

В дальней (волновой) зоне, когда поле подобно плоской волне, это не представляет никаких затруднений. Технология наблюдений и обработки соответствует магнитотеллурическим методам, однако на больших расстояниях от техногенного источника уровень сигнала ненамного превышает величину естественного магнитотеллурического поля. Более значительный уровень сигнала присутствует в ближней зоне (зоне индукции), однако здесь сложно учесть геометрию и суммарное влияние всех источников, что не позволяет точно вычислить коэффициент установки. В результате полученные значения УЭС не вполне отвечают реальным значениям, хотя и обладают определенной корреляцией с другими электроразведочными методами. Наиболее достоверные данные получаются в случае одного простого источника техногенного поля, например ЛЭП. Поле линии электропередачи в первом приближении соответствует полю бесконечно длинного кабеля (БДК), поэтому при определенных условиях можно воспользоваться приемами наблюдений и обработки, разработанными для БДК. Достаточно длинные электрические линии используются и в методе вызванной поляризации (ВП) с измерением срединного градиента. При этом изучение эффектов ВП можно проводить с помощью гармонических полей. Целью данной работы является обоснование и практическое подтверждение возможности использования гармоник техногенного электромагнитного поля для выявления поляризационных эффектов геологической среды. К основным задачам исследований относится сравнительный анализ различных параметров ТЭМП на известных рудных объектах, обладающих электрической поляризацией.

Основные положения

При неизвестной величине тока в источнике возбуждения электрофизические свойства среды изучают с помощью относительных измерений различных компонент электромагнитного поля. Измерения электрических E и магнитных H составляющих ТЭМП не отличаются от стандартных электроразведочных методов. Главные условия – придерживаться заданного направления и соблюдать взаимную перпендикулярность измеряемых составляющих сигнала. Основной параметр, рассчитываемый в результате проведения данных работ, – это входное сопротивление среды или импеданс Z, равный отношению ортогональных компонент электрического и магнитного полей:

$$Z = E_r/H_\varphi;\ Z_{xy} = E_x/H_y;\ Z_{yx} = E_y/H_x. \quad (1)$$

Индексы соответствуют осям координат в цилиндрической и декартовой системе.

В зоне индукции импеданс среды пропорционален удельному электрическому сопротивлению и не зависит от частоты, поэтому для определения одного из параметров поляризуемости можно воспользоваться формулой вычисления коэффициента частотной дисперсии (КЧД) [13] применительно к импедансу:

$$k_{EH} = (Z_1 - Z_i)/\ (Z_1 \cdot \lg(f_i/f_1)) = (Z_1 - Z_i)/(Z_1 \cdot \lg(i)), \quad (2)$$

где i – номер кратной гармоники; f_1 – частота первой гармоники (50 Гц); f_i – частота кратной гармоники; Z_1 – импеданс на первой гармонике; Z_i – импеданс на кратной гармонике.

Поляризационные свойства среды можно изучать и с помощью только магнитных отношений. В этом случае один датчик магнитного поля направлен вертикально – H_z, а другой ориентируется горизонтально, по минимуму сигнала. В случае присутствия единственной линии электропередачи уровень сигнала минимален, если ось датчика совпадает с направлением ЛЭП (H_φ). Компонента H_z соответствует первичному полю, а составляющая H_φ будет отвечать вторичному полю. Поскольку E_r порождает H_z, отношение $R = H_z/H_\varphi$ косвенно отражает импеданс $Z = E_r/H_\varphi$ [14]. Это дает возможность применить к магнитным отношениям способы обработки импедансных данных, например, вычислить индукционный коэффициент частотной дисперсии k_H:

$$k_H = (R_1 - R_i)/(R_1 \cdot \lg(i)). \quad (3)$$

При измерении одной электрической составляющей потребуется дополнительное нормирование за соотношение амплитуд гармоник в первичном сигнале: $n = E_1'/E_i'$. Тогда формула для вычисления КЧД электрического поля примет вид:

$$k_E = (E_1 - n \cdot E_i)/(E_1 \cdot \lg(i)). \quad (4)$$

Эффект вызванной поляризации может еще проявляться в том, что при воздействии первичного синусоидального поля H_p в неоднородной среде генерируется вторичное магнитное поле H_s на кратных гармониках основной частоты. В радиотехнике отношение паразитных гармоник, возникающих за счет нелинейности элементов, к сигналу несущей частоты известно как коэффициент нелинейных искажений или коэффициент гармоник. В нашем случае нелинейность связана с поляризацией горных пород и руд техногенным полем электрической сети, поэтому данное отношение уместно называть коэффициентом сетевых гармоник (КСГ):

$$K_H = |H_s|_i/|H_p|_1\ . \quad (5)$$

Сложность в изучении нелинейных искажений заключается в суммировании первичных гармоник сети с вторичными гармониками среды. Чтобы это учесть, необходимы одновременные наблюдения по профилю и на контрольном пункте (КП) рядом с первичным источником сигналов. Если сетевые гармоники относительно стабильны во времени, то первичные искажения проявляются в виде «фонового» уровня, который можно определить и вычесть как постоянную величину. Для изучения аномалий сетевых гармоник можно воспользоваться любыми магнитными компонентами ТЭМП:

$$K_H^{\,x} = |H_x|_i/|H_x|_1; \quad (6)$$
$$K_H^{\,y} = |H_y|_i/|H_y|_1; \quad (7)$$
$$K_H^{\,z} = |H_z|_i/|H_z|_1; \quad (8)$$
$$K_H^{\,xz} = |H_x|_i/|H_z|_1; \quad (9)$$
$$K_H^{\,yz} = |H_y|_i/|H_z|_1. \quad (10)$$

При этом для большей достоверности желательно испробовать все возможные варианты, поскольку в реаль-

ных условиях профильных наблюдений направленность и степень влияния различных источников ТЭМП может меняться.

Методика исследований

Положительные результаты измерения импеданса техногенного электромагнитного поля для изучения электрических свойств разреза были получены в Институте геофизики УрО РАН еще в 1980–1990-х гг. [15]. На ранних этапах наших исследований использовались одноканальные приемники, такие как АЗЧ-90, ЭРА–МАКС (НПП «ЭРА», г. Санкт-Петербург) и модернизированные милливольтметры на базе аналоговых и цифровых мультиметров. Применялась методика работ, принятая в методе радиокомпарации и пеленгации полей радиостанций (радиокип). С помощью используемой аппаратуры осуществлялись полевые наблюдения за электрическими и магнитными компонентами одной-двух гармоник ТЭМП на расстояниях меньше километра от действующих линий электропередачи, что соответствует квазистационарной зоне (зоне индукции). При изучении импеданса последовательно регистрировались электрическая составляющая E_x заземленной линии вдоль профиля и поперечная ей магнитная составляющая H_y резонансным магнитным датчиком, настроенным на измеряемые частоты промышленных гармоник. Из-за скачков нагрузки в ЛЭП и сильной нестабильности техногенного поля погрешность полевых измерений составляла более 10 %, поэтому было решено перейти на двухканальную приемно-регистрирующую аппаратуру. С начала XXI в. внедряются синхронные двухкомпонентные наблюдения с помощью универсального приемника ОМАР-2 [16], что позволило снизить погрешность измерений до приемлемого уровня на 3–5 %. Электрическая составляющая теперь измеряется как с помощью заземленной, так и стелющейся линии, а в качестве магнитоприемников выступают как пассивные резонансные, так и активные широкополосные датчики индукционного типа. По данным синхронных наблюдений E_x и H_y вычисляются импеданс среды по формуле (1) и кажущееся сопротивление КС с использованием формулы для ближней зоны электромагнитного источника поля:

$$\rho_к = Zr/4, \qquad (11)$$

где r – расстояние до источника сигнала, м.

Исходя из выражения (2) рассчитывается коэффициент частотной дисперсии k_{EH} для основных промышленных гармоник. Расчет электрического параметра гармоник k_E по формуле (4) проводится в отдельных случаях однокомпонентных измерений и для сравнения.

При изучении магнитных составляющих ТЭМП проводится совместная регистрация всех компонент поля по профилю наблюдений: H_x, H_y и H_z. В качестве параметров поляризуемости разреза выступают индукционные коэффициенты частотной дисперсии k_H (3) и сетевых гармоник K_H (5). Поскольку синхронные измерения на КП не практикуются, для большей информативности выбираются наиболее показательные отношения магнитных компонент ТЭМП, вычисляемые по формулам (6)–(10).

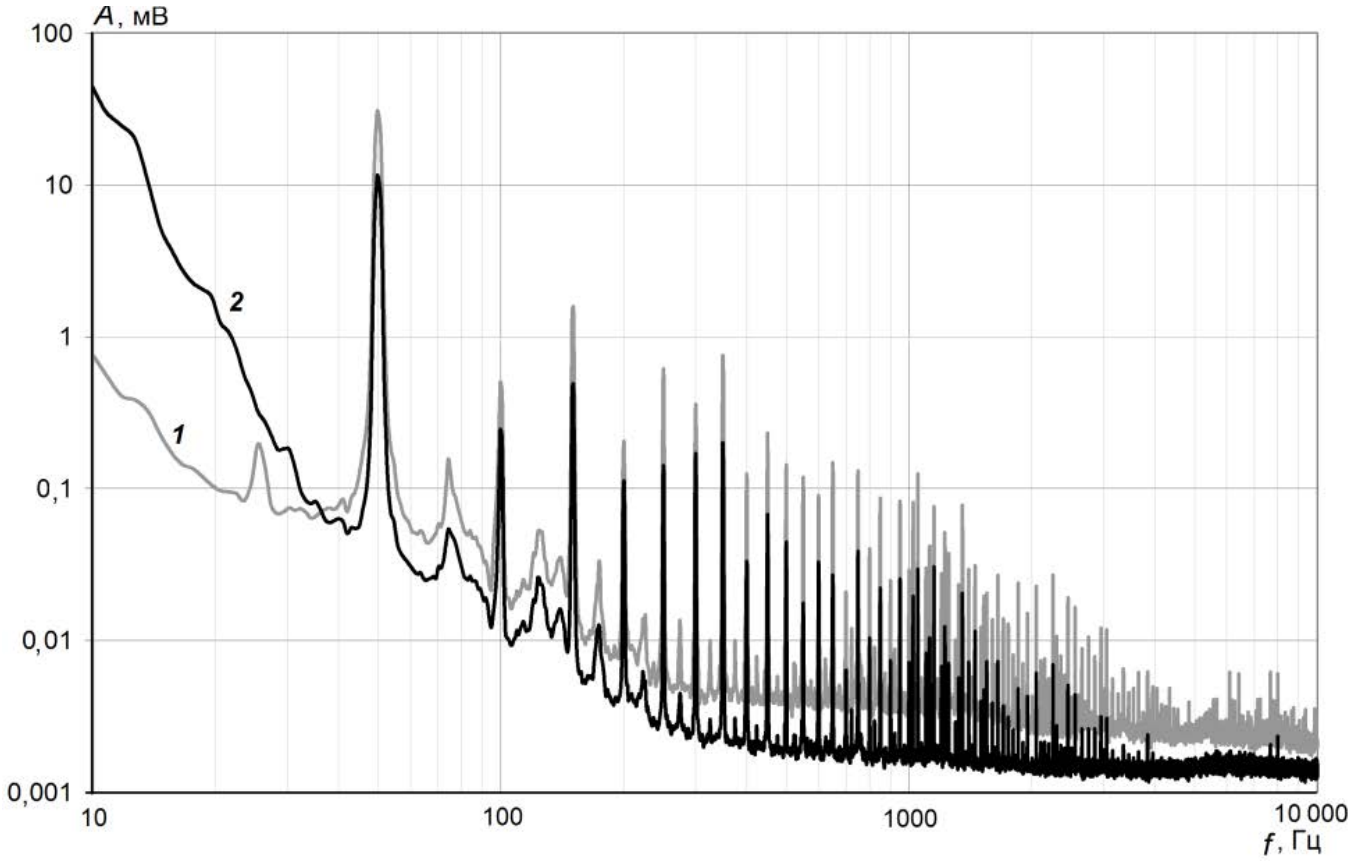

Рисунок 1. Амплитудные спектры электрических (*1*) и магнитных (*2*) компонент техногенного электромагнитного поля
Figure 1. Amplitude spectra of electric (*1*) and magnetic (*2*) components of the technogenic electromagnetic field

Результаты исследований

Изучение поляризационных эффектов с помощью техногенных полей проводилось на известных геологических объектах, в частности, на ряде уральских рудных месторождений. Промышленные районы Урала характеризуются высокой интенсивностью сетевых и индустриальных помех с многочисленными кратными гармониками. Для примера на рис. 1 приведен спектральный состав электромагнитных сигналов на расстоянии 1 км от действующего горнодобывающего предприятия.

В качестве датчика электрического поля использована десятиметровая стелющаяся линия, для измерения переменного магнитного поля применялся активный индукционный датчик чувствительностью 5 мВ/нТл в широкой полосе частот. Наибольший вклад в ТЭМП вносит основная (несущая) сетевая гармоника частотой 50 Гц, которая на порядок и выше превосходит другие гармоники. Ко второй по величине сигнала обычно относится третья гармоника (150 Гц), однако в зоне действия выпрямительных установок, таких как станции катодной защиты, более интенсивна вторая гармоника (100 Гц). Далее амплитуды четных и нечетных гармоник спадают по экспоненциальным зависимостям, хотя в некоторых случаях наблюдаются всплески на одной или нескольких частотах. Как показала практика, частотная дисперсия проявляется практически на всех частотах, но наиболее достоверные результаты получены на первых гармониках. Кроме того, чем ниже частота, тем на более дальнем расстоянии от источника сигналов располагается зона индукции, в которой допустимы наблюдения за поляризационно-частотными эффектами. Подсчитаем приблизительное рабочее расстояние от источника ТЭМП, используя формулу для электромагнитного параметра [17]:

$$P = 2{,}81r\cdot(f/\rho)^{0,5}, \qquad (12)$$

где r – расстояние до источника сигнала, км; f – частота электромагнитного поля, Гц; ρ – удельное электрическое сопротивление среды, Ом · м.

Для УЭС среды, равном 100 Ом · м, и частоте 50 Гц ближняя зона ($P < 1$) располагается на расстоянии до 500 м. Для частоты 100 Гц она сокращается приблизительно до 350 м, для 150 Гц – до 300 м, для 300 Гц – до 200 м, а для 550 Гц – до 150 м. Для получения максимально возможного расстояния, ограничимся измерениями параметров техногенного электромагнитного поля на первых трех гармониках: 50, 100 и 150 Гц. При этом следует отметить, что при изучении КСГ радиус действия зоны индукции определя-

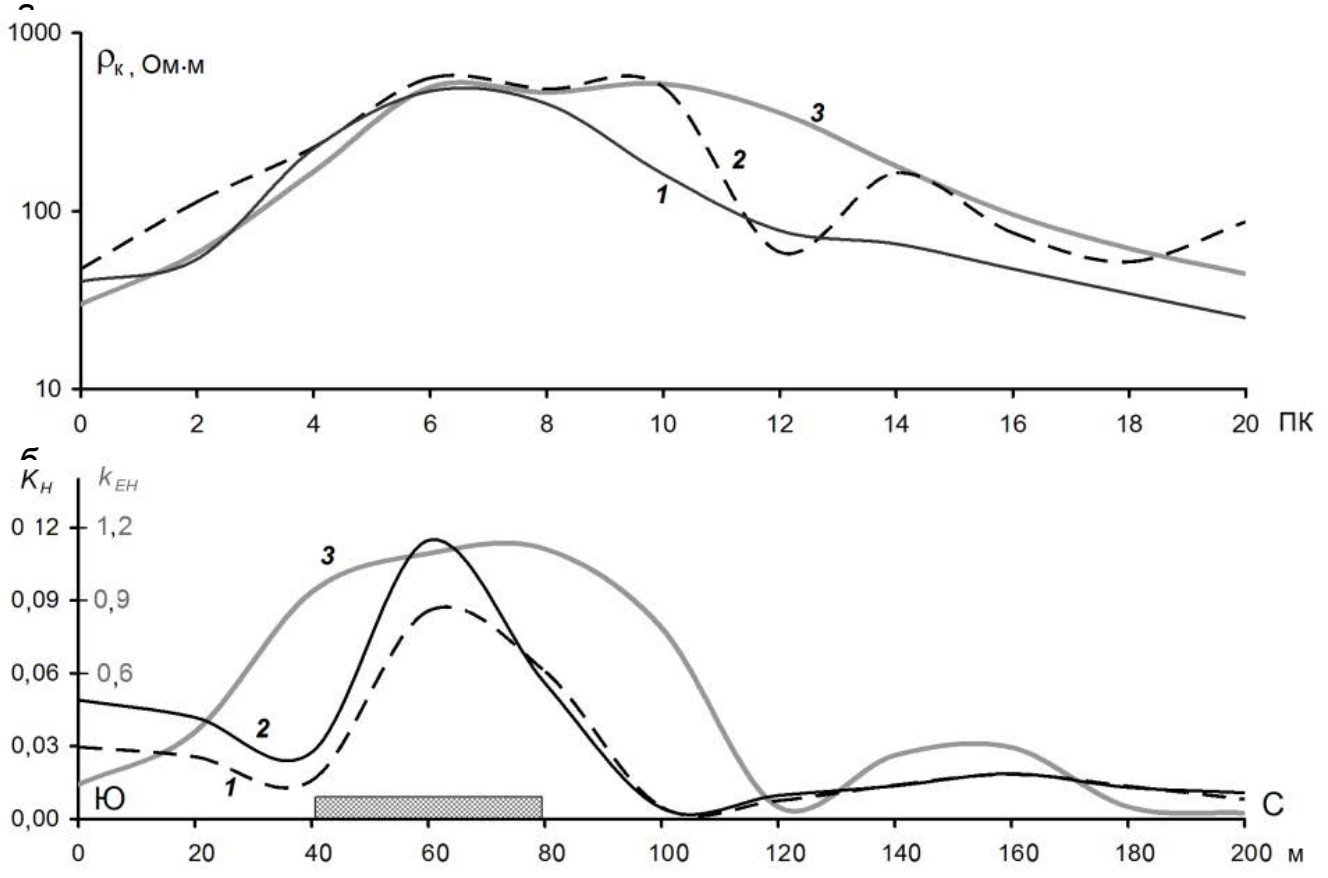

Рисунок 2. Результаты электропрофилирования по контрольному профилю Чусовского месторождения: *а* – графики кажущегося сопротивления $\rho_к$, полученные методами ТЭМП (*1*), ДЭМП (*2*) и СЭП (*3*); *б* – параметры техногенного электромагнитного поля: графики коэффициентов сетевых гармоник K_H^z (*1*), K_H^y (*2*) и коэффициента частотной дисперсии k_{EH} (*3*). Штриховкой выделена приблизительная проекция рудного тела на дневную поверхность

Figure 2. The results of electrical profiling on the control profile of the Chusovskoye field: *a* – graphs of apparent resistivity $\rho_к$, obtained by TEMF (*1*), DEMF (*2*) and TES (*3*) methods; *b* – technogenic electromagnetic field parameters: graphs of power-line harmonic coefficients K_H^z (*1*), K_H^y (*2*) and frequency dispersion coefficient k_{EH} (*3*). Hatching marks the approximate projection of the ore body onto the daylight surface

ется несущей частотой 50 Гц, а при изучении КЧД – частотой наблюдаемой кратной гармоники (100 или 150 Гц).

Чусовское месторождение. Чусовское медноколчеданное месторождение расположено в Полевском районе Свердловской области. Оно приурочено к зоне сочленения южной части Тагильского прогиба с западной границей Восточно-Уральского поднятия. Граница между указанными структурами проходит по Дегтярскому региональному разлому. Чусовское месторождение располагается в меридиональной Чусовско-Поварнинской зоне развития метаморфических сланцев, залегающих среди зеленокаменных пород палеозойского возраста (альбитофиры, порфироиды, серпентиниты). Месторождение представлено системой жилообразных тел, сложенных густыми вкрапленниками с линзами и прожилками сплошных колчеданов в метаморфических сланцах. Рудоносная зона состоит из нескольких тел, не выходящих на дневную поверхность и имеющих крутое падение на глубину до 300 м. Из-за небольшого размера и значительной глубины залегания, Чусовское месторождение не разрабатывалось, однако на нем проведен большой объем разведочного бурения и каротажа [18]. В течение длительного времени месторождение продолжает служить в качестве контрольного полигона для опытно-методических и научных работ.

Контрольный профиль исследований ТЭМП располагался параллельно линии электропередачи, проходящей в районе Чусовского месторождения. Дополнительно проводились измерения стандартными методами симметричного электропрофилирования (СЭП) и дипольного электромагнитного профилирования (ДЭМП). Параметры измерительных установок были выбраны таким образом, чтобы эффективная глубина исследований была глубже зоны аэрации, но недостаточно глубоко до собственно рудного тела. Таким образом, проводилось изучение области возможного ореола сульфидной минерализации над колчеданным месторождением. Для колчеданных месторождений Среднего Урала характерно их расположение среди кварцево-серицитовых сланцев с зоной интенсивного окварцевания над рудными телами. На местности они часто приурочены к положительным формам рельефа, а электрические сопротивления верхней части разреза (ВЧР) имеют повышенные значения. При этом гидротермальные изменения, обрамляющие рудные зоны, характеризуются понижениями сопротивлений в несколько раз. Подобная картина наблюдается и в районе Чусовского месторождения (рис. 2).

Кажущиеся сопротивления, по данным СЭП, ДЭМП и ТЭМП, имеют близкие значения, хотя и несколько отличаются по характеру поведения вдоль профиля. В районе оруденения КС составляют 250–600 Ом · м, снижаясь на периферии до 20–70 Ом · м. Область залегания рудного тела (ПК4–8) хорошо выделяется на графиках коэффициентов сетевых гармоник K_H^z и K_H^y, вычисленных для частоты 100 Гц (вторая гармоника). Зона аномальной частотной дисперсии k_{EH} шире рудного интервала и немного смещена (ПК3–10) в сторону снижения рельефа местности, однако максимальные величины КЧД наблюдаются непосредственно над рудным телом. Вообще поляризационные параметры, изучаемые с помощью техногенного поля (КЧД и КСГ), выглядят более убедительно, чем частотная дисперсия электропроводности, полученная на индукционных установках.

Шиловское месторождение. Шиловское медно-скарновое месторождение расположено вблизи г. Екатеринбурга, на окраине пос. Медный. Оно локализуется на контакте мраморизованных известняков с Решетнинской интрузией основного состава на периферии Верхисетского массива гранитоидов. В зоне контакта сформировались гранатовые и гранат-пироксеновые скарны с магнетитом и медно-сульфидной минерализацией. Сульфиды представлены халькопиритом, борнитом, халькозином и пиритом. Рудная минерализация локализуется в скарнах, диоритах, габбро и кварц-серицитовых метасоматитах, а также фиксируется в тектонических нарушениях. Шиловская рудная ассоциация близка к Ауэрбаховской группе медно-магнетитовых месторождений и также характеризуется повышенной золотоносностью руд [19]. Месторождение периодически разрабатывалось с XVIII до начала XX в. На территории сохранились свидетельства проведения горных работ, в том числе небольшой карьер. Подземные выработки (шахты, штольни) к настоящему времени засыпаны или недоступны.

В районе карьера коренные породы выходят на поверхность, к периферии мощность наносов увеличивается до 10 м. Результаты дистанционных индукционных зондирований (ДИЗ) показали, что удельные электрические сопротивления (УЭС) рыхлых отложений составляют 30–80 Ом · м, коренных пород кровли – 100–300 Ом · м, основания разреза – 400–1200 Ом · м. По электропроводности коренные породы не расчленяются, однако области старых горных выработок хорошо выделяются повышениями коэффициента частотной дисперсии ДЭМП [20]. В этих же местах наблюдаются аномалии поляризационных параметров техногенного электромагнитного поля (рис. 3).

При этом поляризационные аномалии ТЭМП выглядят более контрастно по сравнению с результатами ДЭМП. Приуроченность повышенных значений КЧД и КСГ к местам проведения старых горных работ позволяет предполагать, что аномалии данных параметров связаны с рудоносной минерализацией. На основании полученных результатов выделен еще один участок, перспективный на оруденение (ПК 38–48).

Ельчевское рудопроявление. Участок работ находится в 6 км севернее Дегтярского колчеданного месторождения в сходных с ним геологических условиях. Он приурочен к зоне полимиктового меланжа Серовско-Маукского регионального разлома, разделяющего вулканогенные породы Тагильской и Восточно-Уральской мегазон. Основная часть исследовательского профиля сложена базальтами и туфопесчаниками дегтярской свиты, вмещающими сульфидное медно-цинковое и полиметаллическое оруденение. На прилегающей территории обнаружен целый ряд старых шурфов и шахт, пройденных в меридиональном направлении. Цепь горных выработок, приуроченных к возвышенной части местности, пересекает линию профиля в районе отметок 160–180 м от начала профиля. Как и в предыдущих примерах, электрические сопротивления зоны оруденения имеют повышенные значения, понижаясь на флангах ру-

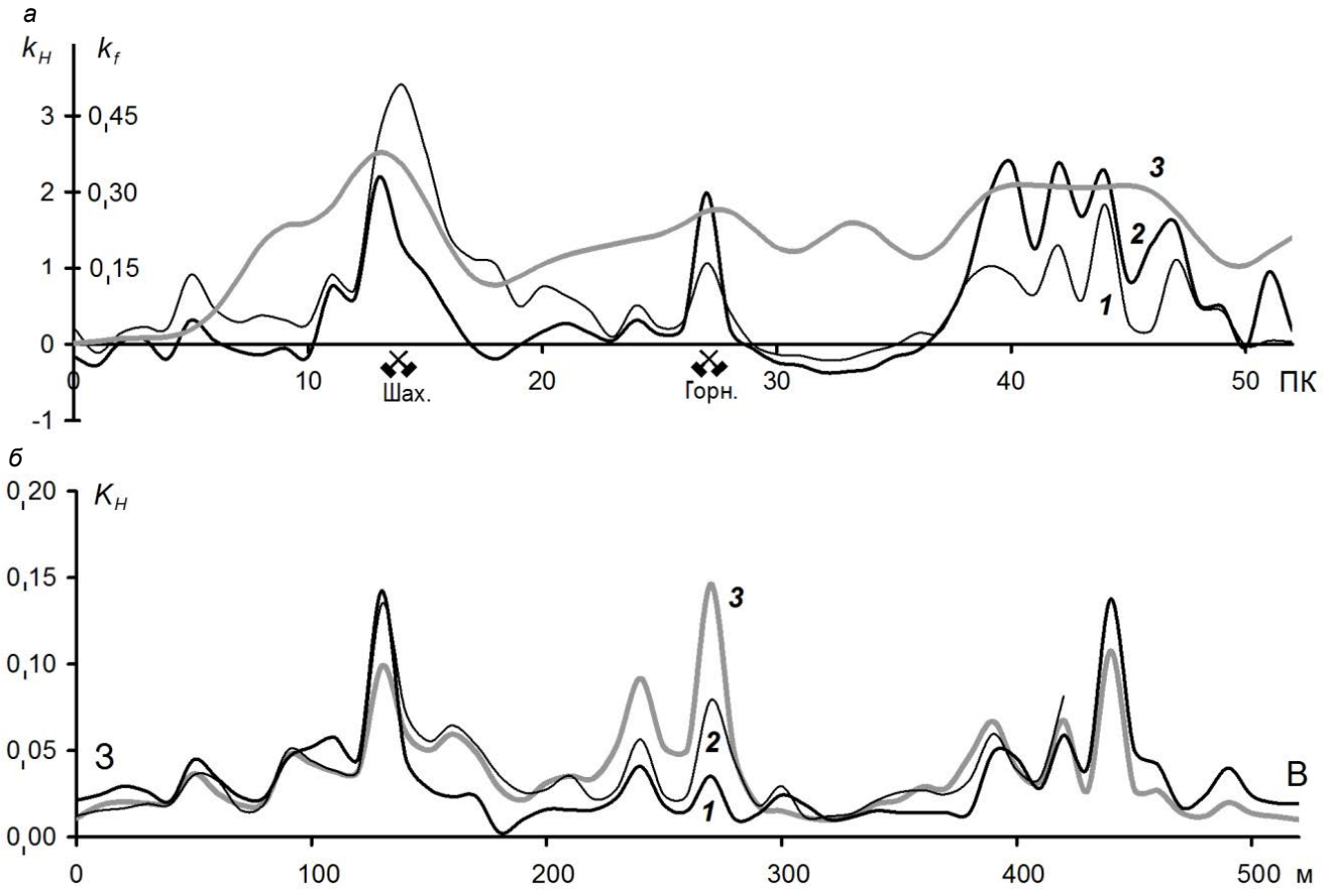

Рисунок 3. Поляризационные параметры по контрольному профилю Шиловского месторождения: *а* – графики техногенного индукционного коэффициента частотной дисперсии k_H на частотах 100 Гц (*1*) и 150 Гц (*2*) и график КЧД k_f по результатам ДЭМП на частотах 10 и 40 кГц (*3*); *б* – графики коэффициентов сетевых гармоник K_H^{yz} (*1*) и K_H^{xz} (*2*) на частоте 150 Гц и K_H^{z} (*3*) на частоте 100 Гц. Условные обозначения: шах. – шахта, горн. – горная выработка

Figure 3. Polarization parameters for the control profile of the Shilovskoye field: *a* – graphs of man-made induction coefficient of frequency dispersion k_H at frequencies of 100 Hz (*1*) and 150 Hz (*2*) and CPSC chart k_f according to the results of DEMF at frequencies of 10 and 40 kHz (*3*); *b* – power line harmonic coefficient graphs K_H^{yz} (*1*) and K_H^{xz} (*2*) at a frequency of 150 Hz and K_H^{z} (*3*) at 100 Hz. Legend: m. – mine, m. w. – mine working

допроявления. В этом можно убедиться по поведению импеданса техногенного поля (рис. 4, *а*).

Графики коэффициентов частотной дисперсии k_E и k_{EH} очень близки по форме и значениям, но не выделяют рудоносной зоны. С другой стороны, полоса горных выработок четко отмечается с помощью коэффициентов сетевых гармоник K_H, вычисленных для вертикальных и горизонтальных компонент магнитного поля на второй и третьей гармониках ТЭМП (рис. 4, *б*). Следует отметить, что различие в «фоновых» уровнях КСГ обусловлено первичным соотношением амплитуд кратных гармоник источника сигналов (о чем упоминалось ранее). Повышение значений КСГ в западном направлении может объясняться приближением к зоне меланжа регионального разлома.

Воронцовское месторождение. Воронцовское золоторудное месторождение входит в состав Турьинско-Ауэрбаховского рудного района и располагается в Краснотурьинском районе Свердловской области. В области контакта карбонатных пород краснотурьинской свиты с Ауэрбаховской интрузией сосредоточены многочисленные скарновые магнетитовые и медно-магнетитовые месторождения, характеризующиеся повышенной золотоносностью [21]. Воронцовское месторождение принадлежит к Ауэрбаховской группе месторождений, приуроченных к магнетитовому оруденению, сопряженных с жильной золото-сульфидно-кварцевой минерализацией. Рудная зона включает скарны, обогащенные железом и медью, а также кварцевые жилы и прожилки, содержащие золото и сульфиды. Главные рудные тела размещаются на контакте карбонатной и туфогенной толщ и локализованы в нарушениях, оперяющих главные разрывы.

Опытный профиль, пройденный на западном фланге Воронцовского месторождения, ставился с целью изучения поведения поляризационных параметров техногенного электромагнитного поля в зоне развития магнетитовой и сульфидной минерализации. Изучение коэффициентов частотной дисперсии k_{EH} и k_E значимых аномалий данных параметров не выявило. В то же время достаточно полезным оказалось использование импеданса ТЭМП и коэффициентов сетевых гармоник K_H (рис. 5).

Зоны, обогащенные магнетитом, хорошо идентифицируются с помощью магниторазведки положительными аномалиями магнитного поля Земли. Одна из таких аномалий располагается на исследуемом профиле в интервале отметок 320–420 м. Электрические сопротивления, по данным импеданса ТЭМП, имеют повышенные значения, что связывает выделенную область с коренными породами.

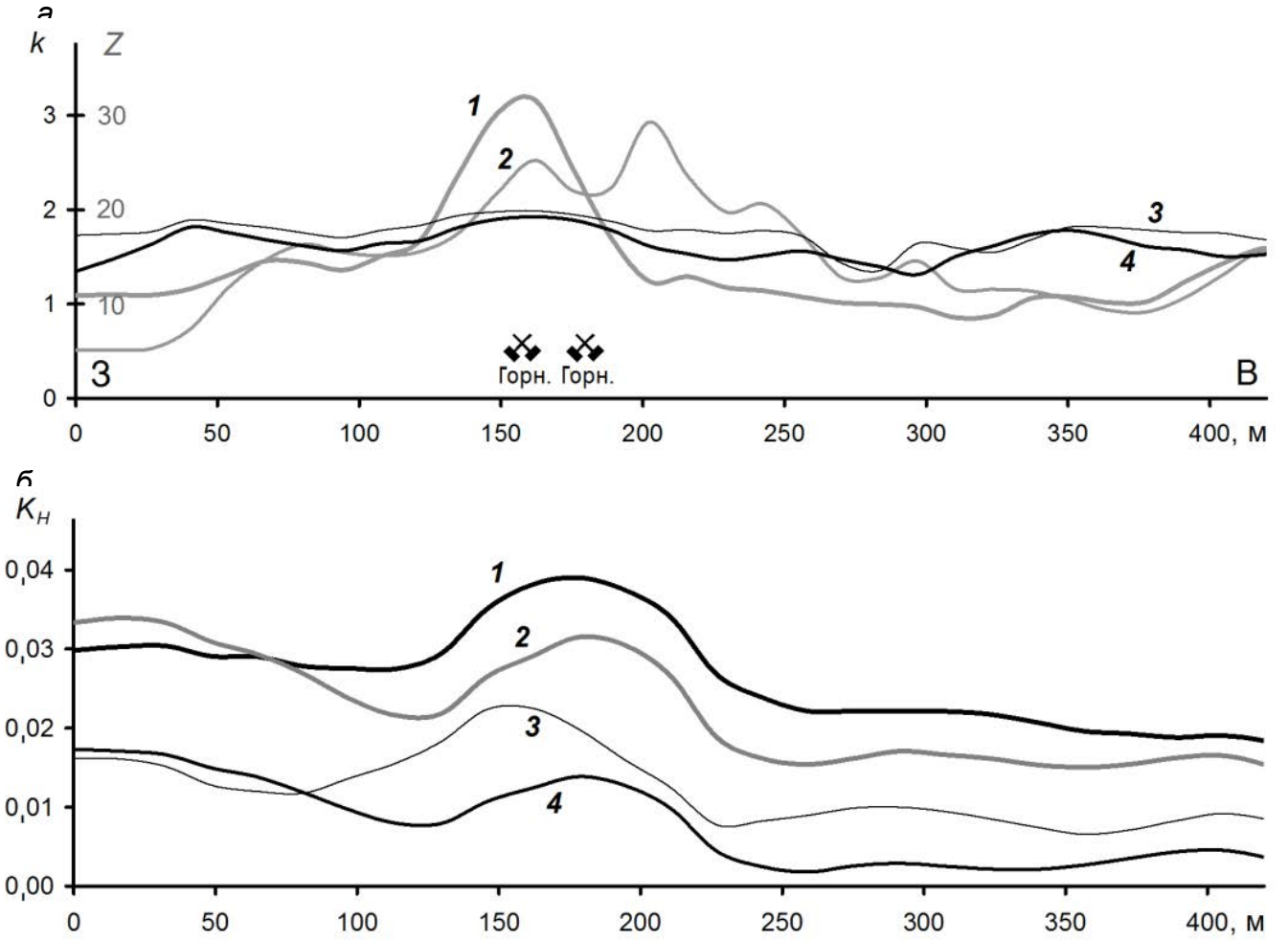

Рисунок 4. Электрометрические параметры на Ельчевском рудопроявлении: *а* – графики импеданса ТЭМП на частотах 50 Гц (*1*) и 100 Гц (*2*), коэффициентов частотной дисперсии k_E (3) и k_{EH} (*4*) на частоте 150 Гц; *б* – графики коэффициентов сетевых гармоник K_H^z (*1*), K_H^x (*4*) на частоте 150 Гц и K_H^x (*2*), K_H^z (*3*) на частоте 100 Гц. Условные обозначения: горн. – горная выработка

Figure 4. Electrometric parameters at the Yelchevskoye ore occurrence: *a* – TEMF impedance graphs at frequencies of 50 Hz (*1*) and 100 Hz (*2*), frequency dispersion coefficients k_E (*3*) and k_{EH} (*4*) at 150 Hz; *b* – power line harmonic coefficient graphs K_H^z (*1*), K_H^x (*4*) at a frequency of 150 Hz and K_H^x (*2*), K_H^z (*3*) at 100 Hz. Legend: m.w. – mine working

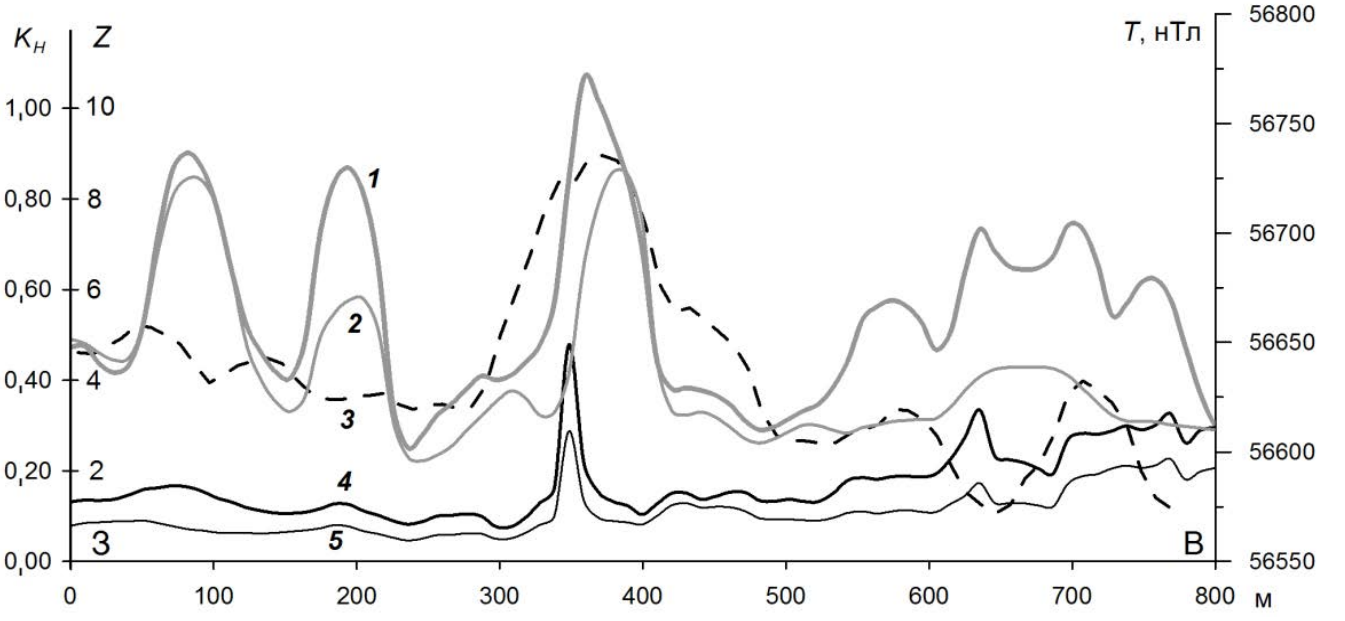

Рисунок 5. Результаты опытных работ на фланге Воронцовского месторождения. Графики импеданса ТЭМП на частотах 50 Гц (*1*) и 100 Гц (2), индукции геомагнитного поля *T* (*3*), коэффициентов сетевых гармоник K_H^y на частоте 100 Гц (*4*) и 150 Гц (*5*)

Figure 5. Results of experimental work on the flank of the Vorontsovskoye field. Graphs of TEMF impedance at frequencies of 50 Hz (*1*) and 100 Hz (*2*), geomagnetic field induction T (*3*), power line harmonic coefficients K_H^y at 100 Hz (*4*) and 150 Hz (*5*)

В пределах этой зоны магнетитовой минерализации наблюдается более узкая аномалия КСГ (340–360 м) на используемых гармониках ТЭМП. Повышенные величины коэффициентов сетевых гармоник наблюдаются также в конце профиля, примыкающего к разрабатываемому карьеру. Здесь магнитное поле минимально, однако импеданс довольно высокий. Таким образом, повышение КСГ можно связать с золото-сульфидно-кварцевой рудной минерализацией, являющейся объектом отработки карьера.

Выводы

Результаты исследований указывают на принципиальную возможность изучения поляризационных эффектов среды с помощью техногенных электромагнитных полей. Главными условиями получения достоверных данных являются проведение измерений в ближней зоне (зоне индукции) техногенного источника, а также высокая амплитуда и стабильность сигналов. Для выполнения этих условий количество измеряемых частот ТЭМП ограничено тремя первыми гармониками: 50, 100 и 150 Гц. Результаты опытно-методических работ на известных геологических объектах показали, что над рудными объектами могут наблюдаться аномалии таких поляризационных параметров ТЭМП, как коэффициенты частотной дисперсии и коэффициенты сетевых гармоник. Наиболее перспективными признаны коэффициенты сетевых гармоник, обладающие более контрастным аномалиями и максимальным радиусом действия зоны индукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астраханцев Г. В. О характере и распределении земных токов промышленной частоты на Среднем Урале // Геофизический сборник: труды Института геофизики. Свердловск: УФАН СССР, 1962. № 3. С. 307–309.
2. Вешев А. В., Яковлев А. В. Использование электромагнитных полей частотой 50 Гц для электроразведки // Геофизические методы поисков и разведки. Свердловск: СГИ, 1975. Вып. 1. С. 83–90.
3. Бобровников Н. В. Методические предпосылки использования электромагнитного поля промышленных помех для геоэлектроразведки // Электромагнитные методы геофизических исследований: сб. науч. трудов. Свердловск: УрО АН СССР, 1988. С. 79–84.
4. Сараев А. К., Ивочкин В. Г., Пертель М. И., Никифоров А. Б. Возможности электромагнитного профилирования на промышленной частоте 50 Гц при изучении Вуоксинского апатитоносного массива // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 1998. № 1. С. 63–68.
5. Szarka L. Geophysical aspects of man-made electromagnetic noise in the earth – A review // Surveys in Geophysics. 1988. Vol. 9. No. 3. P. 287–318. https://doi.org/10.1007/BF01901627
6. Risk G. F., Caldwell T. G., Bibby H. M. Use of magnetotelluric signals from 50 Hz power lines for resistivity mapping of geothermal fields in New Zealand // Geophysical prospecting. 1999. Vol. 47. Issue 6. P. 1091–1104. https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.1999.00167.x
7. Vallée M. A., Smith R. S., Keating P. Case history of combined airborne time-domain electromagnetics and power-line field survey in Chibougamau, Canada // Geophysics. 2010. Vol. 75. No. 2. P. B67–B72. https://doi.org/10.1190/1.3343573
8. Cohen M. B., Said R. K., Inan U. S. Mitigation of 50–60 Hz power line interference in geophysical data // Radio Science. 2010. Vol. 45. No. 6. P. 1–12. https://doi.org/10.1029/2010RS004420
9. Korpisalo A., Pohjolainen E. The 50 Hz EM method at the Pyhäsalmi massive sulphide deposit // Exploration Geophysics. 2019. Vol. 50. No. 3. P. 233–244. https://doi.org/10.1080/08123985.2019.1600300
10. Hu Y. F., Li D. Q., Yuan B., Suo G. Y., Liu Z. J. Application of pseudo-random frequency domain electromagnetic method in mining areas with strong interferences // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2020. Vol. 30. No. 3. P. 774–788. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65253-0
11. Chen W., Xue G., Song W., Hou D., Wang Y. Accurate calculation and characteristic analysis of power frequency electromagnetic field generated by AC high voltage transmission line // Chinese Journal of Geophysics. 2022. Vol. 65. No. 5. P. 1813–1821. https://doi.org/10.6038/cjg2022P0458
12. Lindau T., Becken M. Using impressed current cathodic protection systems of pipelines for electromagnetic exploration // Geophysics. 2018. Vol. 83. No. 4. P. B155–B165. https://doi.org/10.1190/geo2017-0651.1
13. Астраханцев Г. В., Улитин Р. В. Комплексная электропроводность горных пород на звуковых частотах и способы ее изучения в полевых условиях // Электрометрия при поисках сульфидных месторождений: сб. статей. Свердловск: УФАН СССР, 1968. С. 41–47.
14. Колесников В. П. К обоснованию применения промышленных электромагнитных полей для решения геологоразведочных задач // Вестник Пермского университета. 2013. Вып. 4 (21). С. 56–61.
15. Титлинов В. С. О возможности использования полей-гармоник 50-периодного тока промышленных ЛЭП в многочастотной электроразведке // Теория и практика электромагнитных методов геофизических исследований: сб. науч. трудов. Екатеринбург: Наука. Урал. отд-ние, 1992. С. 64–77.
16. Давыдов В. А. Универсальный полевой геофизический приемник ОМАР-2 // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 6. С. 127–128. https://doi.org/10.7868/S0032816216060252
17. Вешев А. В. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. Л.: Недра, 1980. 391 с.
18. Сравнительная характеристика методов скважинной электроразведки (по материалам Чусовского колчеданного месторождения) / П. Ф. Родионов [и др.] // Теория и практика электрометрии. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1972. С. 164–176.
19. Золотооруденение Екатеринбургского геологического полигона / В. Н. Сазонов [и др.]. Екатеринбург: УГГГА, 1997. 226 с.
20. Давыдов В. А., Байдиков С. В., Горшков В. Ю. Дистанционные индукционные зондирования с изучением поляризационно-частотного эффекта на рудных объектах // Разведка и охрана недр. 2020. № 4. С. 42–47.
21. Мурзин В. В., Сазонов В. Н. Минеральные ассоциации и условия образования сульфидных золотосодержащих руд Турьинско-Ауэрбаховского рудного поля (Урал). Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 97 с.

Статья поступила в редакцию 20 мая 2022 года

УДК 550.837: 537.876.23 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2022-3-70-79

Study of polarization effects using a technogenic electromagnetic field

Vadim Anatol'evich DAVYDOV*

Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

Abstract

Relevance and purpose of the work. For most electrical exploration methods, technogenic fields act as interference, but industrial fields can also be used as a source of a useful signal, given the ubiquity of their distribution. The purpose of the work is to substantiate and practically confirm the possibility of using the harmonics of the technogenic electromagnetic field (TEMF) to identify the polarization effects of the geological environment. The main objectives of the research include a comparative analysis of various parameters of the TEMF at known ore objects with electric polarization.

Methodology. Field observations of the electrical and magnetic components of the TEMP were carried out by a two-channel universal receiver OMAR-2 (IGF, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg). The electrical component was measured using a grounded or creeping line, passive and active induction type sensors acted as magnetic receivers. According to synchronous observations of orthogonal components of the electromagnetic field, the electrical and polarization parameters of the medium were calculated.

Results. General information about the electric and magnetic components of industrial fields and their relationship with induced polarization is presented. The concepts of the basic polarization parameters of technogenic fields are introduced: the coefficients of frequency dispersion and the coefficients of power-line harmonics, calculation formulas for their calculation are given. The spectral composition of the electric and magnetic components of the TEMF is considered, on the basis of which the contribution of the fundamental frequency and multiple harmonics to the total amplitude of the signal is distinguished. The main conditions for obtaining reliable data are determined: measurements in the near zone (induction zone) of a man-made source, as well as high amplitude and stability of signals. To fulfill the necessary conditions, the number of measured frequencies of the TEMF is limited to the first three harmonics: 50, 100 and 150 Hz. The results of experimental and methodological work on the control profiles of four ore objects of the Sverdlovsk region are presented: the Chusovsky copper-crusted deposit, the Shilovsky copper-scarn deposit, the Yelchevsky sulfide ore occurrence and the Vorontsov gold deposit.

Conclusions. The results of the research indicate the fundamental possibility of studying the polarization effects of the medium with the help of man-made electromagnetic fields. Thus, in the area of occurrence of ore objects, increased values of the coefficients of frequency dispersion and the coefficients of the power-line harmonics of the TEMF were recorded. The coefficients of power-line harmonics that have a larger radius of the induction zone and have more contrasting anomalies are recognized as the most promising.

***Keywords*:** technogenic electromagnetic field, induction zone, impedance, polarization, frequency dispersion, power-line harmonics, sulfide mineralization, ore deposits.

REFERENCES

1. Astrakhantsev G. V. 1962, On the nature and distribution of earth currents of industrial frequency in the Middle Urals. *Geofizicheskiy sbornik: trudy Instituta geofiziki* [Geophysical Collection: Proceedings of the Institute of Geophysics], no. 3, pp. 307–309. (*In Russ.*)
2. Veshev A. V., Yakovlev A. V. 1975, The use of electromagnetic fields with a frequency of 50 Hz for electrical exploration. *Geofizicheskiye metody poiskov i razvedki* [Geophysical methods of searches and intelligence], no. 1, pp. 83–90. (*In Russ.*)
3. Bobrovnikov N. V. 1988, Methodical prerequisites for the use of an electromagnetic field of industrial interference for geoelectro-exploration. Sverdlovsk, pp. 79–84. (*In Russ.*)
4. Saraev A. K., Ivochkin V. G., Pertel M. I., Nikiforov A. B. 1998. Possibilities of electromagnetic profiling at an industrial frequency of 50 Hz in the study of the Vuoksin apatite-bearing massif. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7. Geologiya. Geografiya* [Vestnik of St. Petersburg State University. Series 7. Geology. Geography], no. 1, pp. 63–68. (*In Russ.*)
5. Szarka L. 1988, Geophysical aspects of man-made electromagnetic noise in the earth – A review. *Surveys in Geophysics*, vol. 9, no. 3, pp. 287–318. https://doi.org/10.1007/BF01901627
6. Risk G. F., Caldwell T. G., Bibby H. M. 1999, Use of magnetotelluric signals from 50 Hz power lines for resistivity mapping of geothermal fields in New Zealand. *Geophysical prospecting*, vol. 47, issue 6, pp. 1091–1104. https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.1999.00167.x
7. Vallée M. A., Smith R. S., Keating P. 2010, Case history of combined airborne time-domain electromagnetics and power-line field survey in Chibougamau, Canada. *Geophysics*, vol. 75, no. 2, pp. B67–B72. https://doi.org/10.1190/1.3343573
8. Cohen M. B., Said R. K., Inan U. S. 2010, Mitigation of 50–60 Hz power line interference in geophysical data. *Radio Science*, vol. 45, no. 6, pp. 1–12. https://doi.org/10.1029/2010RS004420
9. Korpisalo A., Pohjolainen E. 2019, The 50 Hz EM method at the Pyhäsalmi massive sulphide deposit. *Exploration Geophysics*, vol. 50, no. 3, pp. 233–244. https://doi.org/10.1080/08123985.2019.1600300

✉davyde@yandex.ru

10. Hu Y. F., Li D. Q., Yuan B., Suo, G. Y., Liu Z. J. 2020, Application of pseudo-random frequency domain electromagnetic method in mining areas with strong interferences. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 30, no. 3, pp. 774–788. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65253-0
11. Chen W., Xue G., Song W., Hou D., Wang Y. 2022, Accurate calculation and characteristic analysis of power frequency electromagnetic field generated by AC high voltage transmission line. *Chinese Journal of Geophysics*, vol. 65, no. 5, pp. 1813–1821. https://doi.org/10.6038/cjg2022P0458
12. Lindau T., Becken M. 2018, Using impressed current cathodic protection systems of pipelines for electromagnetic exploration. *Geophysics*, vol. 83, no. 4, pp. B155–B165. https://doi.org/10.1190/geo2017-0651.1
13. Astrakhantsev G. V., Ulitin R. V. 1968, Complexed electrical conductivity of rocks on sound frequencies and methods for studying in field conditions. Sverdlovsk, pp. 41–47. (*In Russ.*)
14. Kolesnikov V. P. 2013, To substantiate the use of industrial electromagnetic fields for solving geological exploration tasks. *Vestnik Permskogo universiteta* [Bulletin of Perm University], issue 4 (21), pp. 56–61. (*In Russ.*)
15. Titlinov V. S. 1992, On the possibility of using harmonic fields of 50-period current of industrial power lines in multi-frequency electrical exploration. Ekaterinburg, pp. 64–77. (*In Russ.*)
16. Davydov V. A. 2016, Universal field geophysical receiver OMAR-2. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and experimental techniques], no. 6, pp. 127–128. (*In Russ.*) https://doi.org/10.7868/S0032816216060252
17. Veshev A. V. 1980, Electrical profiling on direct and alternating current. Leningrad, 391 p. (*In Russ.*)
18. Rodionov P. F. [et al.]. 1972, Comparative characteristics of downhole electrical exploration methods (based on the materials of the Chusovsky pyrite deposit). Theory and practice of electrometry. Sverdlovsk, pp. 164–176. (*In Russ.*)
19. Sazonov V. N. [et al.]. 1997, Gold mining of the Ekaterinburg geological polygon. Ekaterinburg, 226 p. (*In Russ.*)
20. Davydov V. A., Baidikov S. V., Gorshkov V. Yu. 2020, Remote induction sensing with the study of the polarization-frequency effect on ore objects. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and protection of mineral resources], no. 4, pp. 42–47. (*In Russ.*)
21. Murzin V. V., Sazonov V. N. 1996, Mineral associations and conditions of formation of sulfide gold-bearing ores of the Turyinsk-Auerbach ore field (Ural). Ekaterinburg, 97 p. (*In Russ.)*

The article was received on May 20, 2022