

ФАЗОВЫЙ СПОСОБ ВЫДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ШУМОВЫХ СИГНАЛОВ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Г.Я. Шайдуров, В.С. Потылицын, Д.С. Кудинов

Сибирский федеральный университет, 660036, Красноярск, Академгородок, 13А, Россия

Рассмотрены физические основы фазового электроразведочного способа вызванной поляризации (ВП) на основе извлечения информации из естественного электромагнитного поля Земли (ЕЭМПЗ) в диапазоне частот 0.1—20.0 Гц.

Дано научно-техническое обоснование дифференциальной схемы измерения параметров ЕЭМПЗ, алгоритма обработки принимаемых сигналов с выделением коэффициента вызванной поляризации, исходя из условия идентичности характеристик поля в обеих приемных линиях.

Способ заключается в регистрации случайных шумовых сигналов с двух смежных электрических приемных диполей при одновременном запоминании амплитуд и автоматическом их выравнивании. Далее производится вычисление разности сигналов с последующей нормировкой по энергии.

Изложенные в статье теоретические основы выделения коэффициента ВП ЕЭМПЗ и алгоритм обработки были проверены в ходе лабораторных испытаний. При полной идентичности среды под приемными диполями был получен коэффициент ВП порядка 0.01—0.03, обусловленной погрешностью элементной базы входных цепей аналогового тракта.

Приведены результаты полевых испытаний на железорудном месторождении Самсон, Республика Хакасия. В ходе опытных работ подтвержден эффект ВП в ЕЭМПЗ в районе аномалии и показана сходимость результатов с теоретическими и лабораторными исследованиями, а также данными, полученными с помощью импульсной аппаратуры КЭП-М.

Сделан вывод о возможности применения данного способа для обнаружения продуктивных аномалий, а также о его преимуществах в части исключения искусственных источников возбуждения гео-разреза.

Вызванная поляризация, естественное электромагнитное поле, Земля, дисперсия, фаза, электроды, теллурические токи.

PHASE-INDUCED POLARIZATION METHOD BASED ON PROCESSING NOISE SIGNALS OF THE NATURAL ELECTROMAGNETIC FIELD OF THE EARTH

G.Ya. Shaidurov, V.S. Potylitsyn, and D.S. Kudinov

The paper deals with the physical fundamentals of the phase geoelectric method of induced polarization (IP) based on the extraction of information from the natural electromagnetic field of the Earth (NEMFE) in the frequency range 0.1–20.0 Hz.

Scientific and technical justification is provided for the differential measurement circuit parameters of the NEMFE and the algorithm of processing of the received signals with the calculation of the IP coefficient, assuming the identity of the field characteristics in two receiving lines.

The method consists in recording random noise signals from two adjacent receiving electrical dipoles with simultaneous memorizing of the amplitudes and their automatic equalization. Then the difference between the signals is calculated, with subsequent energy normalization.

The presented theoretical fundamentals for the calculation of the IP coefficient of the NEMFE and the processing algorithm were tested in laboratory experiments. Under the assumption of the complete identity of the medium beneath the receiving dipoles, the IP coefficient was 0.01–0.03, due to the error in the elemental base of the analog input path.

The paper also presents the results of field experiments on the Samson iron deposit in the Republic of Khakassia. The experimental work confirmed the effect of IP on the NEMFE in the anomalous area and showed that the results are consistent with theoretical and laboratory predictions and the data obtained using a KEP-M pulse system.

It is concluded that this method can be used to detect productive anomalies and has an advantage of eliminating artificial sources of excitation of geologic sections.

Induced polarization, natural electromagnetic field, Earth, dispersion, phase, electrodes, telluric currents

ВВЕДЕНИЕ

Электроразведка вкрапленных руд полиметаллов наиболее эффективна при работе методом вызванной поляризации (ВП), основанном на возбуждении геологического разреза искусственными импульсными либо гармоническими токами низких частот в диапазоне ниже 20 Гц.

Недостатками метода ВП является необходимость прокладки в сложной горно-таежной местности заземленных питающих линий и использования источников электропитания мощностью до 10 кВт и более [Бобачев и др., 2006].

В работе [Шайдуrow, 1967] впервые была показана возможность применения метода вызванной поляризации на основе извлечения информации из естественного электромагнитного поля Земли (ВП ЕЭМПЗ), что позволяло отказаться от искусственных источников возбуждения геологического разреза. Подобные эксперименты проводились позднее геофизиками Индии [Murali, Rao, 1983]. Естественные электромагнитные (ЭМ) поля используются также в методе AFMAG (audio frequency magnetic), основанном на амплитудно-фазовой обработке сигналов ЕЭМПЗ [Шауб, 1971].

В методе AFMAG применяются достаточно высокие частоты, в диапазоне более 100 Гц, что не позволяет регистрировать медленные электрохимические процессы на границах полиметаллических руд, поэтому его используют при работах в основном методом кажущегося сопротивления, который дает неоднозначные результаты особенно при поиске вкрапленных руд. Для работы фазовым методом ВП была разработана также аппаратура ИНФАЗ ВП и ВП-Ф [Бобровников и др., 1985].

Начиная с 1972 г. делались попытки создать методику и аппаратуру метода ВП на основе ЕЭМПЗ, работающую в условиях неоднородности поля по пространству и нестационарности по времени [Борисов, Шайдуrow, 1972; А.с...., 1979]. Было разработано несколько модификаций этой аппаратуры (Шум1, Шум2, Шум3) [Шайдуrow и др., 1991], проведены полевые испытания на различных месторождениях России, Белоруссии, Казахстана.

Однако из-за отсутствия в то время необходимой элементной базы цифровой схемотехники и быстродействующих микроЭВМ с достаточным объемом оперативной памяти не удалось реализовать полевой прибор с требуемым алгоритмом обработки сигналов ЕЭМПЗ.

Отметим, что термин «неоднородность по пространству» означает зависимость статистических характеристик поля ЕЭМПЗ от координат точки приема [Рытов, 1966].

Только в 2012 г. были получены первые устойчивые полевые результаты на основе реализации дифференциально-фазового алгоритма обработки шумов ЕЭМПЗ с использованием современной вычислительной техники [Потылицын, Шайдуrow, 2012].

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СПОСОБА

Способ заключается в регистрации сигналов ЕЭМПЗ, полученных с двух смежных приемных электрических линий (диполей). При этом в оперативно-запоминающем устройстве (ОЗУ) микроконтроллера оба сигнала регистрируются одновременно с автоматическим выравниванием амплитуд по алгоритму Пауэлла [Моисеев и др., 1978]. Критерием наличия продуктивной аномалии является коэффициент ВП, который определяется путем вычисления нормированной дисперсии разности сигналов следующим образом:

$$\eta_E = \frac{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (E_1(t) - \tilde{k} \cdot E_2(t))^2 \cdot dt}{\sigma_1^2} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $E_1(t)$ и $E_2(t)$ — это ЭДС, зависящие от времени t и соответственно снимаемые с первого и второго электрических диполей; σ_1^2 — дисперсия одного из сигналов, по которой проводится нормирование искомой величины η_E ; T — время наблюдения сигналов; \tilde{k} — коэффициент компенсации, устанавливаемый в приборе автоматически.

Схема полевой установки приведена на рис. 1.

Алгоритм (1) основан на допущении полной идентичности сигналов $E_1(t)$ и $E_2(t)$ по времени в случае нахождения установки на георазрезе, несодержащем рудной залежи. Влияние статистической неоднородности поля по пространству снижается за счет максимально возможного сближения приемных линий. Для исключения влияния неэргодичности статистических характеристик ЕЭМПЗ оба сигнала записываются в ОЗУ одновременно.

Наличие под одним из приемных диполей продуктивной аномалии, поляризующейся под действием токов ЕЭМПЗ, приводит к тому, что сигнал $E_2(t)$, снимаемый с этого диполя, приобретает фазовый сдвиг по отношению к $E_1(t)$.

Представим эти сигналы как сумму гармонических составляющих со случайными амплитудами и нулевыми начальными фазами:

$$E_1 = \sum_{i=1}^n E_{i1} \cdot \sin \omega_i \cdot t, \quad (2)$$

$$E_2 = \sum_{i=1}^n E_{i2} \cdot \sin(\omega_i \cdot t + \Delta\varphi_i). \quad (3)$$

Учитывая коэффициент компенсации \tilde{k} , получаемый из решения уравнения [Моисеев и др., 1978],

$$\frac{\partial (E_1(t) - \tilde{k} \cdot E_2(t))^2}{\partial \tilde{k}} \rightarrow \min, \quad (4)$$

запишем разность $E_1(t)$ и $E_2(t)$ в виде:

$$E_1(t) - E_2(t) = \sum_{i=1}^n (E_{i1}(t) - \tilde{k} \cdot E_{i2}(t)). \quad (5)$$

В случае неполяризуемого георазреза путем автоподстройки коэффициента \tilde{k} при равенстве первого и второго членов (5) и $\Delta\varphi_i = 0$ должно выполняться $(E_1(t) - E_2(t))^2 = 0$, при условии полной идентичности характеристик среды под приемными диполями 1 и 2.

Данный вывод был подтвержден в ходе лабораторных экспериментов, при которых величина коэффициента ВП, связанная с $(E_1(t) - E_2(t))^2$ соотношением (1), составляла $\eta = 0.01 - 0.03$, что обуславливается неидентичностью входных аналоговых трактов [Потылицын, 2013].

При условии равенства амплитуд $E_1(t)$ и $E_2(t)$ фазовый сдвиг за счет эффекта ВП над рудным телом можно получить из следующего соотношения:

$$\overline{(E_1(t) - E_2(t))^2} = 4 \cdot \sum_{i=1}^n E_{i1}^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta\varphi_i}{2} \right) \cdot \cos^2 \left(\frac{\omega_i t + \Delta\varphi_i}{2} \right), \quad (6)$$

где n — число гармонических составляющих в полосе измеряемых частот.

При малом фазовом сдвиге $\Delta\varphi_i$ выражение (6) можно записать как

$$(E_1(t) - \tilde{k} \cdot E_2(t))^2 \approx \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n E_{i1}^2 \cdot \Delta\varphi_i^2 \cdot \cos^2 \left(\frac{2\omega_i \cdot t + \Delta\varphi_i}{2} \right). \quad (7)$$

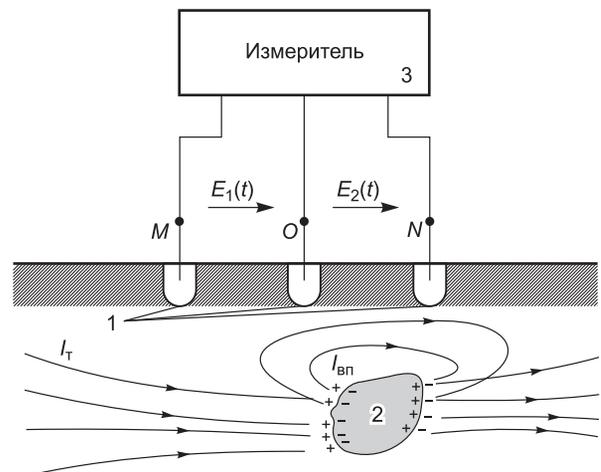
Таким образом, разность амплитуд двух шумовых сигналов после нормировки по энергии $W \approx \sum_{i=1}^n E_{i1}^2 \cdot \cos^2(\omega_i \cdot t)$ дает усредненный фазовый сдвиг по всему диапазону частот, учитывающий статистический характер измерений:

$$\Delta\varphi_W^2 \approx \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta\varphi_i^2. \quad (8)$$

Поскольку фазовый сдвиг не является энергетическим параметром и зависит лишь от инерционных процессов ВП в виде заряда-разряда границы раздела электронный проводник—ионопроводящая среда, то он является детерминированным параметром и может быть вычислен в виде коэффициента ВП, описываемого соотношением (1).

Рис. 1. Дифференциальная измерительная установка.

1 — неполяризуемые электроды, 2 — рудное тело, 3 — измерительный прибор, $E_1(t)$ и $E_2(t)$ — ЭДС, снимаемые с соответствующих диполей, I_T — теллурические токи, $I_{\text{вп}}$ — токи вызванной поляризации.



Заметим, что фазовый сдвиг $\Delta\varphi_w$ в диапазоне используемых частот сигналов ЕЭМПЗ соответствует наблюдаемому фазовому сдвигу $\Delta\varphi_i(\omega_i)$ известных методов ВП на переменном токе инфранизкой частоты ВП-Ф и ИНФАЗ-ВП [Бобровников и др., 1985], получаемому на нескольких дискретно устанавливаемых частотах. Однако с позиции помехоустойчивости измерение $\Delta\varphi_w$ по сравнению с $\Delta\varphi_i(\omega_i)$ предпочтительнее, поскольку обеспечивает энергетический выигрыш, по крайней мере, на число учитываемых в шумовом сигнале гармоник и требует минимальных затрат измерительного времени.

Сопоставим по энергетическому критерию отношение сигнал/шум ВП ЕЭМПЗ с методом ВП-Ф, основанном на использовании питающей линии с гармоническим поляризирующим током в том же самом диапазоне частот — 0.1—20.0 Гц.

Для метода ВП ЕЭМПЗ отношение сигнал/шум по энергии можно определить как

$$q_E = \frac{0.5 \cdot N \cdot \Delta f \cdot T}{N_E} \cdot \eta^2, \quad (9)$$

где N — спектральная плотность мощности шумового сигнала ЕЭМПЗ, N_E — спектральная плотность мощности шума приемных электродов, Δf — полоса рабочих частот от 0.1 до 20.0 Гц, T — время наблюдения.

При этом коэффициент ВП определяется по формуле

$$\eta^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta\varphi_i^2. \quad (10)$$

В случае измерения методом ВП-Ф фазового сдвига на выбранной частоте отношение сигнал/шум будет равно:

$$q_\varphi = \frac{0.5 \cdot U_\varphi^2 \cdot T}{N + N_E} \cdot \eta_\varphi, \quad (11)$$

где U_φ — амплитуда принимаемого сигнала, а коэффициент ВП соответствует измеренной фазе на выбранной частоте ω_i :

$$\eta_\varphi = \Delta\varphi_i(\omega_i) = \Delta\varphi. \quad (12)$$

Отношения (10) и (12) определяют энергетический выигрыш или величину улучшения помехоустойчивости сравниваемых методов

$$\frac{q_E}{q_\varphi} = \frac{N \cdot \Delta f}{U_\varphi^2} \cdot \left(1 + \frac{N}{N_E}\right). \quad (13)$$

Поскольку путем подбора длины приемных диполей всегда можно обеспечить неравенство $N_E \ll N$, то принимая измеряемые фазовые сдвиги одинаковыми $\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta\varphi_i^2 = \Delta\varphi_i^2$ при равенстве требуемого соотношения сигнал/шум $q_E = q_\varphi$, из (14) получим необходимую амплитуду сигнала первичного поляризирующего поля ВП-Ф.

$$U_\varphi = \sqrt{N \cdot \Delta f \cdot \frac{N}{N_E}}. \quad (14)$$

Для примера дадим количественную оценку (15) с учетом опытных данных:

$$\frac{N}{N_E} = 10, \quad \Delta f = 20 \text{ Гц}, \quad N = 1000 \text{ мкВ}^2 / \text{Гц}. \quad (15)$$

При одинаковой необходимой мощности первичного поля, когда $U_\varphi^2 \cdot \Delta f = 10$, выигрыш по мощности в помехоустойчивости метода ВП ЕЭМПЗ по сравнению с ВП-Ф составит $\frac{q_E}{q_\varphi} = \frac{N}{N_E} = 10$, а по амплитуде $\frac{q_E}{q_\varphi} \approx 3.3$.

Как видно из (11) и (15) увеличение уровня внешних шумов улучшает помехоустойчивость метода ВП ЕЭМПЗ и снижает этот показатель для ВП-Ф. Заметим, что последний специально разрабатывался для существенного увеличения чувствительности метода ВП по сравнению с импульсными техноло-

гиями. Таким образом, ВП ЕЭМПЗ обладает принципиальным преимуществом перед лучшим из известных методов ВП, использующих искусственные источники поляризуемого поля.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПОЛЕВЫХ РАБОТ

Для реализации способа использовался прибор, функциональная схема которого изображена на рис. 2. Схема реализована на базе микроконтроллера MSP430F2274 с выводом наблюдаемых сигналов и результатов обработки информации на цветной дисплей. Масса прибора составляет 2 кг, размеры $30 \times 23 \times 11$ см.

Аналоговая часть прибора реализуется в виде блоков предварительных усилителей 1_1 и 1_2 с фильтрами нижних частот, обрезающими прохождение промышленной помехи с частотой 50 Гц на уровне не менее 60 дБ. Остальные функциональные схемы построены программным способом на указанном выше микроконтроллере. При необходимости в приборе можно оставить лишь аналоговую часть и ОЗУ с выносом всех других операций на вторичную обработку после окончания полевых наблюдений.

Полевые испытания приводились на железорудном месторождении Самсон в Республике Хакасия (Ширинский район) с 27 июня по 6 июля 2011 г. и с 23 по 26 июля 2012 г.

Целью испытаний являлась проверка работоспособности разрабатываемого алгоритма и прибора в полевых условиях на реальном месторождении.

На рис. 3 показан геологический разрез по X разведочной линии с данными профилирования импульсным методом срединного градиента с помощью прибора КЭП-М и методом ВП ЕЭМПЗ.

На рис. 4 изображены графики профилирования параметра η_E ВП ЕЭМПЗ по четырем разведенным линиям одновременно с данными профилирования по параметру η_i . Последние получены с помощью импульсной станции ВП КЭП-М [Кондратенко, Шайдуров, 1968] в режиме однополярных импульсов длительностью 100 мс с паузами 100 мс и временем наблюдения на точке 180 с. Длина питающей линии составляла $AB = 1500$ м, а измерения приводились методом срединного градиента. Сплошными линиями показаны характеристики параметра η для различных профилей. Измеряемый параметр вычислялся по формуле $\eta_i = \frac{\Delta V_{ВП}}{\Delta V_{ПР}}$, где $\Delta V_{ВП}$ — разность потенциалов ВП, $\Delta V_{ПР}$ — разность потенциалов тока пропускания на приемной линии.

Как видно из графиков, метод ВП ЕЭМПЗ отмечает аномальную зону месторождения повышенным уровнем параметра $\eta_E = 65\%$ на фоне флуктуации 20%, т. е. отношение сигнал/шум равно 3.25. Разница по форме графиков профилирования по параметрам η_E и η_i , возможно, связана с методами профилирования — дифференциальной установкой по параметру η_E и установкой срединного градиента по параметру η_i .

Уровень повышенного фона параметра η_E можно объяснить влиянием некоррелированных шумов неполяризующихся электродов, используемых для приема сигналов.

Заметным преимуществом метода ВП ЕЭМПЗ, кроме отсутствия питающей линии AB , является в три раза меньшее время наблюдения сигнала на точке — 60 с, вместо 180 с, что также может указывать на лучшее эквивалентное отношение сигнал/шум.

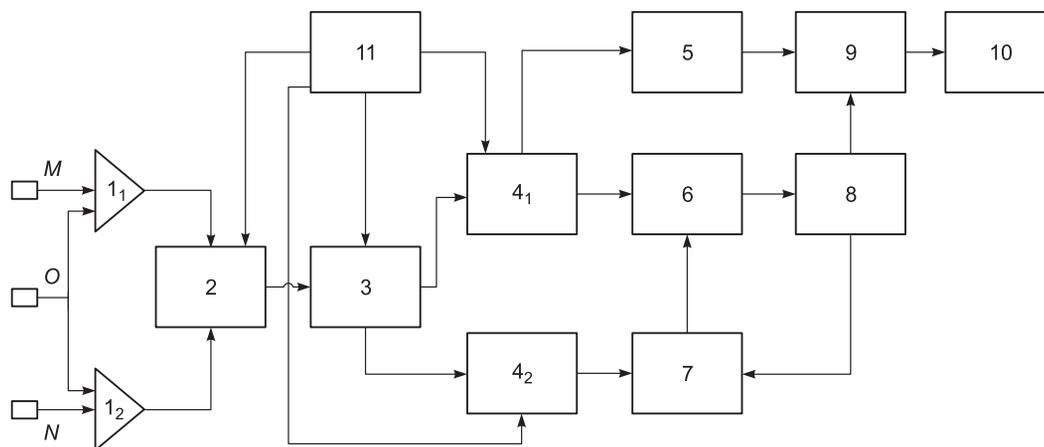


Рис. 2. Функциональная схема работы поискового прибора.

1 — усилители (1_1 , 1_2), 2 — коммутатор, 3 — аналогово-цифровой преобразователь, 4 — оперативно-запоминающие устройства (4_1 , 4_2), 5 — блок вычисления дисперсии $E_1(t)$, 6 — вычитающее устройство, 7 — управляемый аттенуатор, 8 — блок вычисления дисперсии разности сигналов $E_1(t)$ и $E_2(t)$, 9 — нормирующий делитель, 10 — блок индикации, 11 — блок управления.

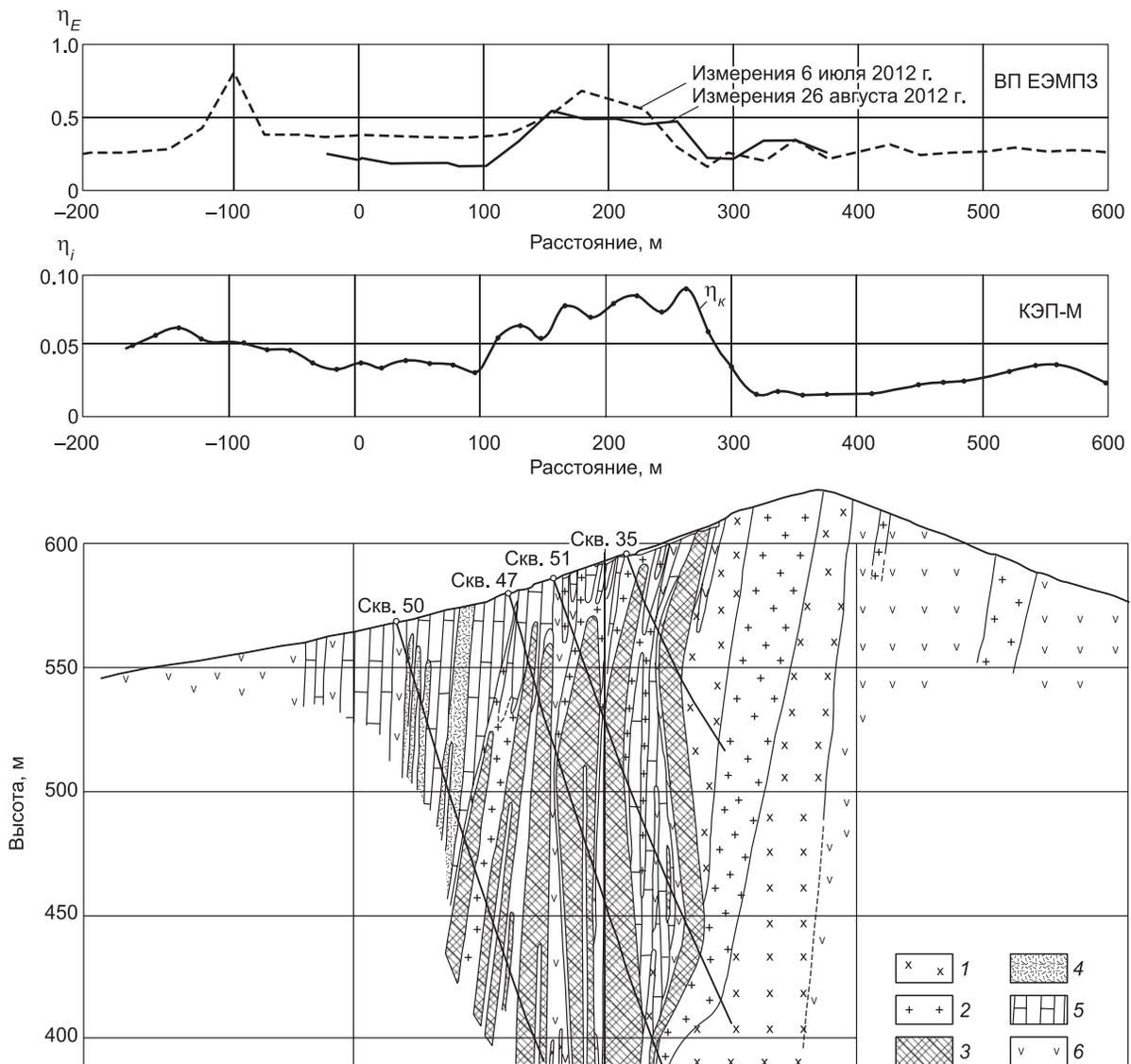


Рис. 3. Общий план разведочных работ, произведенных при помощи аппаратуры КЭП-М и методом ВП ЕЭМПЗ [Кондратенко, Шайдуров, 1968].

1 — диориты, габбро-диориты, монзониты; 2 — габбро-сиениты; 3 — кондиционные магнетитовые руды с содержанием Fe 25 %; 4 — аргиллиты, алевролиты, песчаники, 5 — известняки мраморизованные; 6 — диоритовые и диабазовые порфириты.

В целом эти результаты демонстрируют практическую целесообразность совершенствования метода ВП ЕЭМПЗ как в части алгоритмов обработки сигналов, так и по направлению аппаратной их реализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные в статье материалы по разработке алгоритма и прибора для реализации метода ВП ЕЭМПЗ в варианте измерений суммарного фазового сдвига шумовых сигналов ЕЭМПЗ в диапазоне частот от 0.1 до 20.0 Гц, наблюдаемого на смежных приемных линиях *MON*, свидетельствуют о следующих преимуществах метода ВП ЕЭМПЗ по сравнению с методом ВП-Ф:

- исключает необходимость использования питающих линий и генераторов поляризующего тока, что снижает затраты, упрощает и удешевляет проведение работ;
- обеспечивает большую помехоустойчивость;
- снижает не менее чем в 3 раза время наблюдения на точке.

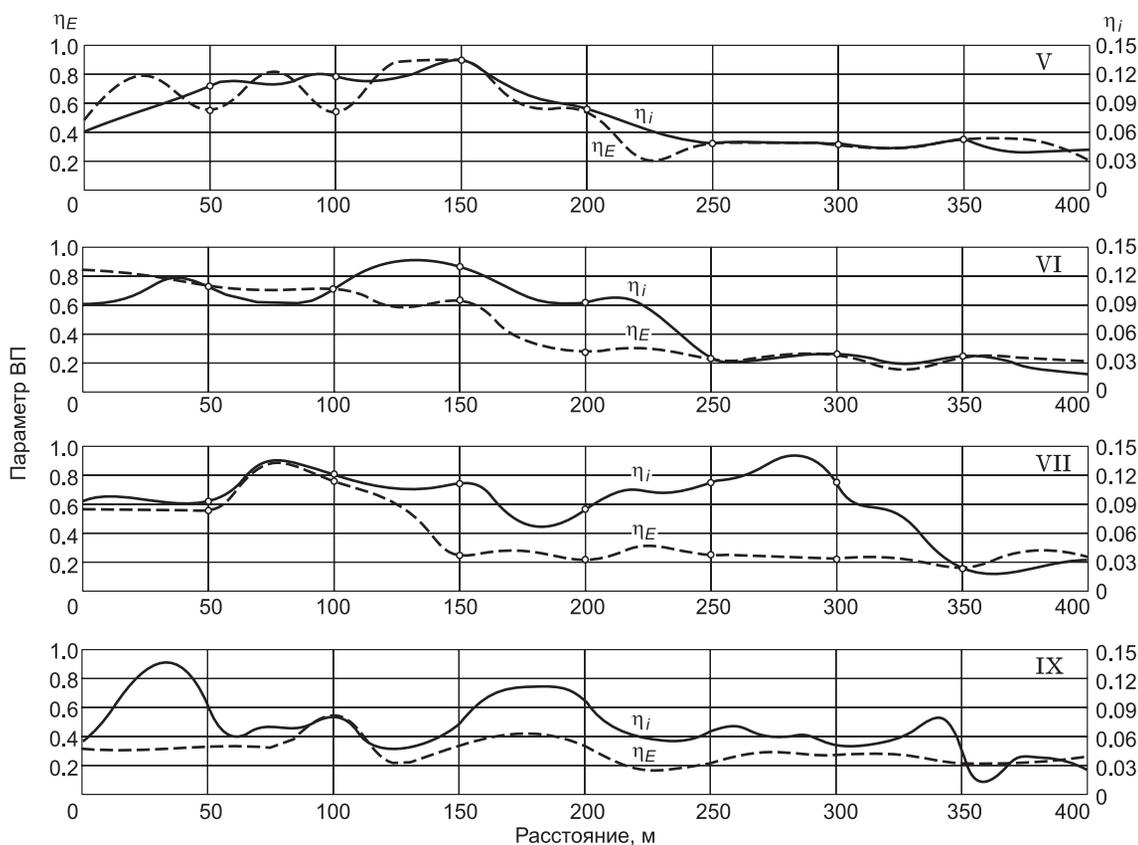


Рис. 4. Графики профилирования по четырем разведочным профилям импульсным методом и способом ВП ЕЭМПЗ.

Имеются все основания для продолжения опытных работ на различных полиметаллических месторождениях.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 13-07-00143/14А) «Извлечение геофизической информации из естественного электромагнитного поля Земли (ЕЭМПЗ) для поиска рудных месторождений».

ЛИТЕРАТУРА

А.с. 84682 СССР. Корреляционное электроразведочное устройство / Борисов Н.А., Ясников А.И., Шайдунов Г.Я. Оpubл. 14.04.1979. Бюл. № 3.

Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики, 2006, № 2, с. 14—17.

Бобровников Л.З., Кадыров И.Н., Попов В.А. Электроразведочная аппаратура и оборудование. М., Недра, 1985, 336 с.

Борисов Н.А., Шайдунов Г.Я. Об использовании электромагнитных естественных полей для выделения потенциалов вызванной поляризации // Сб. трудов ВИТР, 1972, № 81, с. 50—55.

Кондратенко А.Ф., Шайдунов Г.Я. Комплексный электроразведочный прибор КЭП-М // Геофизическая аппаратура. Л., Недра, 1968, вып. 37, с. 51—56.

Моисеев Н.Н., Иванилов Ю.П., Столярова Е.Н. Методы оптимизации. М., Наука, 1978, 351 с.

Потылицын В.С. Метод дифференциальной идентификации инерциальных объектов в случайных полях // Журнал СФУ. Техника и технологии, 2013, т. 6, № 2, с. 178—182.

Потылицын В.С., Шайдунов Г.Я. Некоторые результаты полевых испытаний метода вызванной поляризации на основе выделения информации из естественного электромагнитного поля Земли // Приборы и системы разведочной геофизики, 2012, № 4, с. 51—54.

Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. М., Наука, 1966, 404 с.

Шайдуров Г.Я. О возможности использования естественных электромагнитных полей для регистрации потенциалов вызванной поляризации // Новая аппаратура и методика ее применения в народном хозяйстве. Красноярск, 1967, вып. 2, с. 3—7.

Шайдуров Г.Я., Козлов Ю.Н., Маркушин Я.В. Дифференциальный метод извлечения информации о потенциалах ВП из ЕЭМПЗ // Геофизическая аппаратура, 1991, № 94, с. 35—42.

Шауб Ю.Б. Методы аэроэлектроразведки, основанные на использовании искусственных гармонических электромагнитных полей. Л., Недра, 1971, 220 с.

Murali S., Rao J.B. On the possibility of measuring the polarizability of rocks using telluric currents. New approaches in the method // Geol. Surv. India. Spec. publser, 1983, v. 2, № 2, p. 495—504.

*Рекомендована к печати 24 сентября 2015 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию
4 июня 2015 г.*