

Спектральные измерения ВП горных пород в естественном залегании с использованием высокоточной аппаратуры

■ Зорин Н.И., ООО «Северо-Запад», Москва

■ Мариненко В.А., Институт геофизических исследований МЭ РК, Курчатов, Казахстан

Введение

Метод вызванной поляризации (ВП) широко применяется при поиске вкрапленных и прожилково-вкрапленных руд, а также при решении ряда инженерных, археологических, экологических и других задач геофизики [Комаров, 1980]. Попытки классификации аномалий ВП по частотным характеристикам предпринимались достаточно давно [VanVoorhisetal., 1973; Peltonetal., 1978], но развитие методики долгие годы сдерживалось из-за недостаточной точности и стабильности аппаратуры [Измерение ..., 1990]. В настоящее время вопрос технических возможностей полевой электроразведки также сохраняет свою актуальность в связи с все возрастающим интересом исследователей к измерению спектральных характеристик вызванной поляризации [Kemnaetal., 2012; Куликов и др., 2013; Zorin, 2015; Гурин и др., 2015; Куликов, Соловьева, 2016].

Важно отметить, что возникающие в большинстве горных пород вторичные токи вызванной поляризации примерно на порядок слабее первичных токов, связанных с работой внешнего источника поля. Таким образом, точность измерения отклика поляризуемой горной породы на пропускание через нее электрического тока, необходимая для изучения спектральных характеристик ВП, должна быть как минимум на два порядка выше точности, достаточной для определения величины удельного сопротивления этой же породы. В результате, к техническим параметрам электроразведочной аппаратуры, применяемой при работе методом спектральной вызванной поляриза-

ции (СВП), предъявляются самые высокие требования. В первую очередь, это относится к полевой аппаратуре, используемой для изучения погребенных поляризуемых тел в естественном залегании, когда приходится работать с большими установками и малыми сигналами, а также нередко в условиях значительного влияния промышленных, теллурических, индукционных и других помех.

Дифференциально-фазовые измерения ВП

Измерения методом ВП могут проводиться как во временной, так и в частотной области. При этом полученные результаты являются по сути эквивалентными, поскольку при достаточном количестве данных могут быть формально переведены друг в друга с помощью известных соотношений [Shuey, Johnson, 1973]. Однако сам процесс измерения обладает рядом особенностей и в каждом случае имеет свои плюсы и минусы. Так, например, работа во временной области обычно более производительна, но менее устойчива к влиянию сторонних помех. В свою очередь, измерения в частотной области позволяют проводить узкополосную фильтрацию, а также вносить поправки за изменение параметров канала с помощью калибровки, что значительно увеличивает помехоустойчивость метода. При этом, однако, для полноценной обработки сигнала необходима регистрация не менее 10-20 периодов на каждой из частот, что в некоторых случаях может заметно понизить производительность работ. Таким

образом, в наиболее благоприятных условиях - т.е. при работе с небольшими установками, хорошими заземлениями, при отсутствии значительных сторонних помех, а также при обязательном использовании специальных «неполяризующихся» электродов – изучение характеристик ВП удобнее проводить во временной области; в противном случае более рациональными оказываются частотные измерения.

Существует два подхода к измерениям эффекта вызванной поляризации в частотной области – фазовый и амплитудный. В первом случае изучаемым параметром является фаза измеряемого сигнала $\varphi(\omega)$, во втором случае – его амплитуда $|p(\omega)|$, вместе представляющие собой две вещественных характеристики одной и той же комплексной функции $p(\omega)$, описывающей эффективное сопротивление поляризуемой среды

$$p(\omega) = |p(\omega)| \cdot e^{i\varphi(\omega)}. \quad (1)$$

Можно показать, что кривая $\varphi(\omega)$ представляет собой сглаженную производную от кривой $|p(\omega)|$ на билогарифмическом бланке [Zonge et al., 1972; Zorin, 2015], поэтому эти два параметра также являются эквивалентными друг другу и на практике обычно рассматривают лишь один из них. Поскольку измерение амплитуды гармонического сигнала не требует синхронизации между генератором и измерителем, то на заре развития частотной модификации метода ВП в основном использовались амплитудные параметры вызванной поляризации [Van Voorhis et al., 1973]. Однако в 1970-е годы в Советском Союзе был разработан (и реализован в аппаратуре ИНФАЗ-ВП и ВПФ) специальный метод измерения эффекта вызванной поляризации, не только не требующий синхронизации

между источником и приемником поля, но и обладающий значительно большей помехоустойчивостью по сравнению с обычными фазовыми или амплитудными измерениями [Куликов, Шемякин, 1978]. В качестве основной рассматриваемой величины в данной методике используется дифференциальный фазовый параметр (ДФП) $\Delta\varphi$, определяемый следующим образом

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi(\omega_1)\omega_2 - \varphi(\omega_2)\omega_1}{\omega_2 - \omega_1}. \quad (2)$$

Обычно в качестве двух частот ω_1 и ω_2 используется первая и третья гармоники сигнала формы «разнополярный меандр» (РПИ-1). Из формулы (2) следует, что ДФП полностью подавляет прямо пропорциональные частоте фазовые сдвиги, которые нередко присутствуют в измеряемом сигнале в связи с искажающим влиянием некоторых аппаратурных помех, а также емкостных и индукционных эффектов в области малых параметров поля. В результате, на практике параметр $\Delta\varphi$ определяется значительно более устойчиво, чем φ . При этом важно понимать, что кривые ДФП и фазы ВП совпадают только когда последняя достаточно медленно меняется с частотой. В противном случае они могут заметно различаться (хотя на качественном уровне все равно останутся похожими), что необходимо учитывать при использовании аналитических моделей ВП для количественной интерпретации полученных результатов [Zorin, 2014].

Аппаратура

Измерение эффекта ВП с помощью дифференциального фазового параметра реализовано, например, в приборе ЭИН-209М (Институт геофизических исследований МЭ РК), МЭРИ-24 (ООО «Северо-Запад») и других высокочастотных

одноканальных измерителях, давно и успешно зарекомендовавших себя в полевой электроразведке. Однако, в отличие от стандартной работы на одной-двух частотах, полноценные спектральные измерения вызванной поляризации могут занимать достаточно долгое время (значительно превышающее время раскладки приемной линии), поэтому для работ методом СВП намного удобнее использовать многоканальную приемную аппаратуру, такую как ВПФ-8К-М или ИМВП-8 (Табл. 1).

Восьмиканальный измеритель ВПФ-8К-М (Институт геофизических исследований МЭ РК) предназначен для работ методами сопротивлений и вызванной поляризации как во временной области (дискретные измерения импульсных параметров или непрерывная запись), так и в частотной (гармонический анализ). Важной особенностью прибора является повышенная разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП), что в сочетании с аналоговой фильтрацией (фильтры 4 порядка),

▼ Табл. 1. Многоканальная приемная аппаратура для метода СВП.

		
Название	ВПФ-8К-М	ИМВП-8
Производитель	ИГИ МЭ РК, г. Курчатов, Казахстан	ООО «Северо-Запад», г. Москва, Россия
Количество каналов	8 каналов	8 каналов
Разрядность АЦП	31 разряд	24 разряда
Частота следования отсчетов АЦП	2500 Гц	2500 Гц
Рабочий диапазон частот	0.019 – 9.76 Гц	0.001 – 100 Гц
Дрейф установки частот	не более $2 \cdot 10^{-6}$	не более $5 \cdot 10^{-6}$
Макс. ампл. входного сигнала	5 В	2.5 В
Мин. ампл. измеряемого сигнала	0.1 мкВ	10 мкВ
Погрешность изм. напряжения	0,2 %	0,2 %
Погрешность измерения ДФП	0,02°	0,02°
Входное сопротивление	10 МОм	не менее 5 МОм
Объем встроенной памяти	16 Гб	отсутствует
Емкость встроенного аккумулятора	3000 мА·ч	отсутствует
Питание от внешнего источника	12.6±2 В	12.6±2 В
Интерфейс для связи с компьютером	USB	USB, Wi-Fi (в разработке)
Масса	3.6 кг	0.8 кг
Габариты	27x25x18 см	19x15x6 см

цифровой фильтрацией и встроенными алгоритмами статистической обработки позволяет превзойти известные аналоги по минимальному уровню измеряемых сигналов (от 0.1 мкВ)

Регистратор ИМВП-8 (ООО «Северо-Запад») представляет собой объединенные в одном небольшом корпусе восемь гальванически развязанных электрических каналов, каждый из которых оборудован

▼ Табл. 2. Генераторы электрического тока для метода СВП.

				
Название	Астра-100	ГЭР-65	ГЭР-1000	ГЭР-5000
Производитель	ООО «Северо-Запад», г. Москва, Россия	ИГИ МЭ РК, г. Курчатов, Казахстан	ИГИ МЭ РК, г. Курчатов, Казахстан	ИГИ МЭ РК, г. Курчатов, Казахстан
Макс. выходная мощность	100 Вт	65 Вт	1000 Вт	5000 Вт
Макс. выходной ток	1 А	1.5 А	15 А	25 А
Макс. выходное напряжение	400 В	500 В	1000 В	1000 В
Форма выходного тока	меандр (РПИ-1)	меандр (РПИ-1), меандр с паузой	меандр (РПИ-1), меандр с паузой	меандр (РПИ-1), меандр с паузой
Рабочий диапазон частот	0.08 – 2500 Гц	0.01 – 625 Гц	0.01 – 625 Гц	0.01 – 625 Гц
Относительн. погрешность формирования частот	не более $5 \cdot 10^{-6}$	не более 10^{-5}	не более $3 \cdot 10^{-6}$	не более $2.5 \cdot 10^{-6}$
Нестабильность выходных токов	не более 0.1 %	не более 0.1 %	не более 0.1 %	не более 0.1 %
Питание от внешнего источника	12,6±2 В аккумулятор	12,6±2 В аккумулятор	220±20 В, 50±2 Гц однофазный источник	220±20 В, 50±2 Гц трехфазный источник
Масса	2 кг	3.3 кг	19 кг	32 кг
Габариты	20x18x12 см	27x25x18 см	50x25x36 см	64x28x39 см

дован своим АЦП с частотой дискретизации в 2500 Гц, достаточной для решения большинства задач метода СВП. Визуализация и запись данных происходит с помощью ноутбука, что значительно облегчает контроль качества принимаемого сигнала в полевых условиях. В свою очередь, регистрация непосредственно временных рядов позволяет проводить более сложную обработку данных с использованием специальных алгоритмов подавления помех [Pankratov, Geraskin, 2010], реализованных в программе Octopus Pro (ООО «Северо-Запад»). Среди важных преимуществ указанной программы следует выделить также возможность автоматической разметки частот произвольного свип-сигнала, пакетной обработки данных, учета геометрии установки (для метода сопротивлений) и др.

Для реализации высоких потенциальных возможностей приведенных выше приемников электрического поля необходимо, чтобы ток в питающей линии АВ был стабильным во времени, не изменялся при изменении сопротивления заземления питающих электродов и напряжения питания и т.д. В таблице 2 приведены сведения о некоторых электроразведочных генераторах, способных обеспечить необходимую стабильность формы тока в питающей линии, а также обладающих достаточно большим набором частот для проведения работ методом СВП.

Полевое тестирование

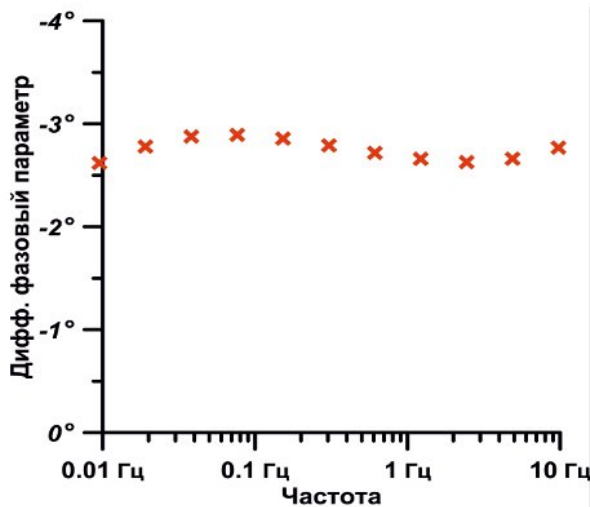
Для решения большинства инженерно-геологических задач, а также при исследовании спектральных характеристик вызванной поляризации неглубоко залегающих (первые десятки метров) горных пород, наиболее удобно использовать легкие портативные генераторы,

такие как Астра-100 и ГЭР-65 (Табл. 2). Однако целью настоящей работы было исследование возможностей современной аппаратуры при работе методом СВП на больших глубинах (от 100 м и более), поэтому для проведения полевых испытаний был выбран наиболее мощный генератор ГЭР-5000 в паре с многоканальным регистратором ИМВП-8.

Экспериментальные полевые работы проводились в южной части Горного Алтая (Восточный Казахстан), в районе с большим количеством значительных (2–3 градуса) аномалий фазы ВП, связанных с развитием сульфидных, магнетитовых, полиметаллических и других оруденений. В качестве основной использовалась установка срединного градиента ($AB = 1500$ м, $MN = 40$ м), сила тока – 2 А; питающая линия заземлялась в грунт с помощью группы стальных электродов, приемная – обычными слабополяризуемыми металлическими электродами (латунь).

Для первых тестовых записей был выбран участок, наиболее благоприятный с точки зрения качества данных – удаленный от населенных пунктов и прочих источников промышленных помех, с относительно хорошими условиями заземления, но при этом с достаточно высокими значениями среднего удельного сопротивления пород разреза (более 1 кОм·м), что гарантировало высокий уровень полезного сигнала в приемной линии при минимальном искажающем влиянии индукционных помех. Проведение непрерывных измерений на одном месте в течение длительного времени (более 1 часа) показали исключительно высокую повторяемость результатов. В частности, разброс значений дифференциального фазового параметра на каждом из восьми каналов и во всем используемом диапазоне

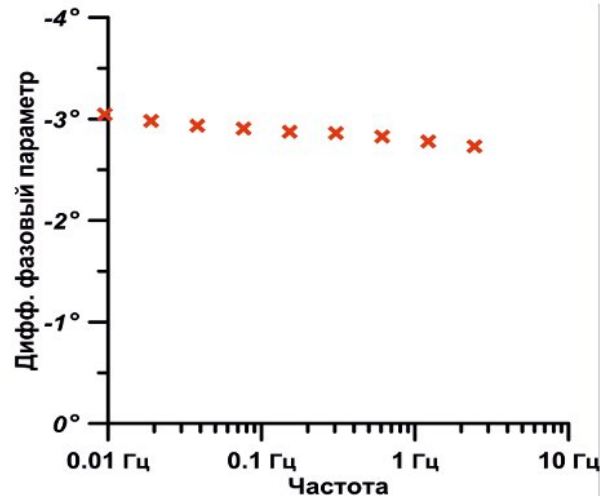
частот (от 0.01 Гц до 10 Гц) не превысил 0.01° , что, на наш взгляд, позволяет смело отнести результат указанных измерений к разряду самых высокоточных полевых данных, когда-либо полученных методом СВП. Пример такой кривой, зарегистрированной над наиболее интенсивной локальной аномалией вызванной поляризации, приведен на Рис. 1.



▲ Рис. 1. Данные СВП, полученные на первом этапе полевых испытаний.

Второй этап экспериментальных работ подразумевал проверку возможностей аппаратуры в более тяжелых условиях, для чего измерительная установка была разложена прямо под действующей линией электропередач в районе развития сильно углефицированных пород. Крайне низкое удельное сопротивление разреза (в среднем – порядка 10 Ом·м) привело к тому, что амплитуда полезного сигнала упала ниже 1 мВ при токе 2А, а индукционные искажения оказались критическими уже начиная с частоты 0.15 (!) Гц. Для минимизации индукционных эффектов было принято решение использовать ортогональную установку (приемная линия расположена перпендикулярно линии АВ на расстоянии порядка 0.5 км от ближайшего питающего электрода), что позволило получить неискажен-

ную кривую ДФП вплоть до первых герц (Рис. 2).



▲ Рис. 2. Данные СВП, полученные на втором этапе полевых испытаний.

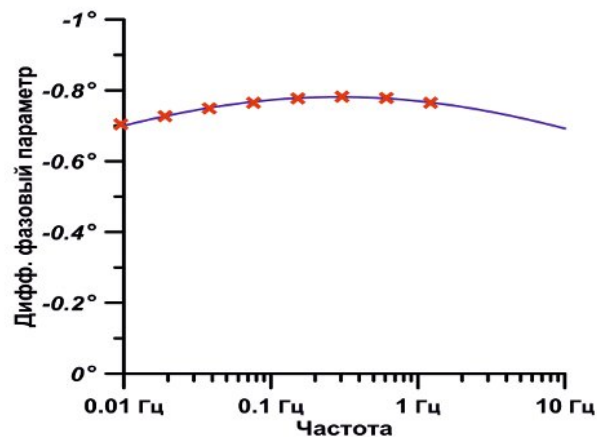
Несмотря на низкий уровень полезного сигнала и значительное влияние сторонних помех (амплитуда промышленных наводок в приемных линиях достигала 1 мВ) точность полученных данных оказалась достаточно высокой. В частности, как видно из Рис. 2, она позволяет непосредственно по полученной кривой ДФП утверждать, что максимум интенсивности эффекта ВП лежит далеко за пределами измеренного частотного диапазона – на периодах в несколько сотен или даже тысяч секунд, что вполне характерно для графитизированных сланцев и других углефицированных пород [Peltonetal., 1978].

На другой день, другим оператором, другим комплектом измерительной аппаратуры, другим генератором и с другой силой тока были проведены контрольные измерения. Данные измерения, проведенные в соответствии с максимально жесткими из возможных требований, предусмотренных в действующей инструкции по электроразведке [Инструкция..., 1984], показали невязку значений дифференциального фазового параметра менее 0.05° .

Практическое применение

В качестве примера применения рассматриваемой аппаратуры для решения практических задач электроразведки можно привести результаты измерения спектральных характеристик ВП пород тульского и бобриковского горизонтов нижнего карбона в районе учебной базы геофизических практик «Александровка» (Калужская область, Россия) геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова [Электроразведка..., 2005]. Указанные горизонты представлены преимущественно песчано-глинистыми отложениями со значительной (до 10%) рассеянной пиритизацией и, повсеместно залегая на глубинах в среднем от 40-60 м до 80-140 м, представляют собой наиболее интенсивный источник аномалий ВП в данном районе [Куликов и др., 2016]. Исходя из приведенных оценок глубины целевого объекта, для спектральных измерений ВП было решено использовать установку срединного градиента с питающей линией АВ = 640 м, заземленной с помощью двух шнековых электродов (забуренных в землю еще два десятилетия назад для проведения работ методом частотного зондирования в рамках студенческих практик). Для возбуждения электрического поля использовался генератор ГЭР-5000, обеспечивший стабилизированный ток амплитудой 5 А в питающий линии. Измерение сигнала проводилось с помощью многоканального регистратора ИМВП-8.

Поскольку на данном разноразном влиянии приповерхностных поляризуемых тел на регистрируемый сигнал пренебрежимо мало и наблюдаемый эффект ВП можно полностью связать с целевым объектом, то измеренные кривые подбирались непосредственно с помощью модели Cole-Cole (Рис. 3).



▲ Рис. 3. Полевые измерения СВП (крестики) и подобранная модельная кривая (сплошная линия)

$$\rho_{CC}(\omega) = \rho_0 \left(1 - \eta \frac{(i\omega\tau)^C}{1 + (i\omega\tau)^C} \right), \quad (3)$$

где η — асимптотическое значение поляризуемости, C — показатель степени, ρ_0 — сопротивление среды на постоянном токе, и τ — постоянная времени [Peltonetal., 1978]. Результаты подбора по всем точкам измерения позволили получить следующие оценки параметров ВП:

$$\eta = 0.15 \div 0.17, C = 0.19 \div 0.20, \tau = 0.1 \div 0.2 \text{ сек}$$

Заметим, что полученные параметры формально являются кажущимися (так как целевой поляризуемый объект представляет собой не однородное полупространство, а субгоризонтальный слой конечной мощности), в результате чего приведенная оценка η должна быть несколько заниженной. Однако кажущиеся параметры C и τ в таких случаях незначительно отличаются от истинных [Song, Vozoff, 1985] и вследствие этого могут рассматриваться как характерные для терригенных пород тульского и бобриковского горизонтов нижнего карбона в данном районе. В свою очередь, знание априорных спектральных характеристик ВП тех или иных горных пород значительно повышает

устойчивость решения обратной задачи метода СВП при наличии нескольких поляризуемых объектов в разрезе.

Заключение

В настоящей работе рассматриваются возможности современной высокоточной аппаратуры при изучении спектральных характеристик вызванной поляризации погребенных горных пород в естественном залегании. Проведенные полевые эксперименты наглядно показывают, что даже при использовании больших разносов и при наличии значительного влияния сторонних помех точность данных, полученных с помощью представленной в статье аппаратуры, оказывается достаточной не только для качественного разделения аномалий ВП от тел различной геологической природы, но и для их использования в программах количественной интерпретации.

Благодарность

Данная работа выполнена при поддержке гранта МОН РК 1757/ГФ4, а также компании ООО «Северо-Запад».

Литература

1. Гурин Г.В., Тарасов А.В., Ильин Ю.Т., Титов К.В. Использование дебаевской декомпозиции для анализа данных профилирования методом вызванной поляризации (золото-серебряное месторождение Джульетта, Магаданская обл.) // Геология и Геофизика. 2015. Т. 56. № 12. С. 2222 – 2239.
2. Измерение электрических и магнитных полей с электроразведочной аппаратурой ЭИН-204 при поисках рудных месторождений. Научн. ред. Сарбаш В.Ф. Алма-Ата: НПО «Рудгеофизика», 1990. – 225 с.
3. Инструкция по электроразведке. Под ред. Г.С. Франтова. Л.: Недра, 1984. – 534 с.
4. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. Л.: Недра, 1980. – 391 с.
5. Куликов А.В., Шемякин Е.А. Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации. М.: Недра, 1978. – 157 с.

6. Куликов В.А., Зорин Н.И., Манжеева И.Т., Яковлев А.Г. Разделение аномалий вызванной поляризации по частотным характеристикам дифференциального фазового параметра // Геофизика. 2013. № 6. С. 23–31.
7. Куликов В.А., Алексанова Е.Д., Алексеев А.С., Зайцев С.В., Соловьева А.В., Шустов Н.Л. Строение крупной миоценовой палеодолины в Калужской области по результатам комплексных электроразведочных работ // Инженерные Изыскания. 2016. № 13. С. 26 – 36.
8. Куликов В.А., Соловьева А.В. Результаты измерений методом спектральной вызванной поляризации (СВП) на слабоконтрастных магнитных аномалиях // Разведка и Охрана Недр. 2016. № 3. С. 26 – 31.
9. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. Под ред. В.К. Хмелевского, И.Н. Модина и А.Г. Яковлева. М.: 2005. – 311 с.
10. Kemna A., Binley A., Cassiani G., Niederleithinger E., Revil A., Slater L., Williams K.H., Orozco A.F., Haegel F.H., Hördt A., Kruschwitz S., Leroux V., Titov K., Zimmermann E. An overview of the spectral induced polarization method for near-surface applications // Near Surface Geophysics. 2012. V. 10. № 6. P. 453 – 468.
11. Pankratov O.V., Geraskin A.I. On processing of controlled-source electromagnetic data // Geologica Acta. 2010. V. 8. № 1. P. 31 – 49.
12. Pelton W.H., Ward S.H., Hallof P.G., Sill W.R., Nelson P.H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP // Geophysics. 1978. V. 43. P. 588 – 609.
13. Shuey R.T., Johnson M. On the phenomenology of electrical relaxation in rocks // Geophysics. 1973. V. 38. P. 37 – 48.
14. Song L., Vozoff K. The complex resistivity spectra of models consisting of two polarizable media of different intrinsic properties // Geophysical Prospecting. 1985. V. 33. P. 1029 – 1062.
15. Van Voorhis G.D., Nelson P.H., Drake T.L. Complex resistivity spectra of porphyry copper mineralization // Geophysics. 1973. V. 38. P. 49 – 60.
16. Zonge K.L., Sauck W.A., Sumner J.S. Comparison of time, frequency, and phase measurements in induced polarization // Geophysical Prospecting. 1972. V. 20. P. 626 – 648.
17. Zorin N. On application of differential phase parameter in spectral IP // Proceedings of 3rd International Workshop on Induced Polarization. 2014. Oleron Island, France.
18. Zorin N. Spectral induced polarization of low and moderately polarizable buried objects // Geophysics. 2015. V. 80. № 5. P. E267 – E276.