

Об извлечении геофизической информации из электромагнитных и сейсмических шумов Земли

■ Шайдуров Г.Я., Потылицын В.С., Майков О.А., Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

В статье изложены алгоритмы обработки низкочастотных шумовых сигналов естественных электромагнитных и сейсмических полей Земли в диапазоне частот 0.1 – 20 Гц при поисках полиметаллических руд методом вызванной поляризации и углеводородов сейсмо-электрическим методом. Приведены графики профилирования на известных месторождениях железных руд (респ. Хакасия), полиметаллов (Восточный Казахстан) Минусинском газоконденсатном месторождении (респ. Хакасия) и на нефтяных участках (Пермская обл.). Делается вывод о максимально возможной глубинности поисков за счет использования теллурических токов.

Ключевые слова: шумовые поля, электромагнитные, сейсмические, вызванная поляризация, сейсмо-электрический, теллурический метод, алгоритмы обработки, полевые, испытания.

Введение

Шумовые поля Земли являются естественными источниками, переносящие информацию о структуре и свойствах геологических разрезов. Их использование не требует специальных генераторов для излучения поля, что является большим преимуществом перед другими методами электро- и сейсморазведки. Однако статистическая неоднородность этих полей по пространству, неэргодичность по времени и спектру, требует разработки алгоритмов обработки сигналов и методов проведения работ инвариантных или, по крайней мере, устойчивых против изменяющихся параметров.

Электромагнитные шумовые поля в электроразведке применяются при постановке методов кажущегося сопротивления, например, АФМАГ [1] в диапазоне частот 10 Гц ÷ 10 кГц, а также теллурического зондирования на сверхнизких частотах < 10 Гц для структурных исследований на глубинах до нескольких километров [2].

На сегодняшний день широкое распространение для поиска углеводородов получили сейсмические методы, связанные с использованием активных источ-

ников сейсмического поля (2D и 3D сейсморазведка), но данные методы дают лишь 30 процентов продуктивных скважин, поэтому для увеличения результативности разрабатываются новые методы поиска с использованием различных физических и химических эффектов. Использование сейсмических шумов для прямых поисков углеводородов, основанное на явлении генерации инфразвуковых волн нефтегазовой залежью, зарегистрировано в России как научное открытие [3].

Известны работы Ведерникова Г.В. [4] в этой области по регистрации шумов в диапазоне сверхнизких частот в паузах между сейсмическими воздействиями, что по-видимому связано с акустическим резонансом залежи.

Первые предложения по применению шумов Земли в электроразведке методом вызванной поляризации (ВП) относятся к 70-м годам прошлого столетия [5, 6].

В течении многих лет автором и его сотрудниками производились аппаратные разработки и их полевое апробирование в различных районах России, Белоруссии, Казахстане, Узбекистане, в том числе и в лабораторных бассейнах со

многими удачными и неудачными результатами. Лишь, начиная с 2010 года, удалось разработать методику обработки сигналов и произвести успешные полевые работы по регистрации потенциалов ВП на рудных месторождениях.

Совместное использование сейсмических и электрических шумов для работы сейсмо-электрическим методом при поиске углеводородов было апробировано авторами настоящей статьи на Минусинском газоконденсатном месторождении (республика Хакасия) в 2010 – 2018 годах [7, 8], а в 2019 году на нефтяных проявлениях в Пермской области, показавших целесообразность постановки работ подобным способом и для решения задачи поиска нефти.

Алгоритмы обработки шумовых сигналов

Исходной предпосылкой для извлечения информации из шумов является теорема «черного ящика», известного американского математика Норберта Винером [10], из которой следует, что при подаче на линейную систему с импульсной характеристикой $K(t)$ «белого» шума $x(t)$, с автокорреляционной функцией в виде единичного дельта-импульса $\delta(\tau)$, определяемой как:

$$R_{xx}(\tau) = R_0 \delta(\tau) = R_0 \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x(t-\tau)dt \quad (1)$$

Путем вычисления функции взаимной корреляции $R_{xy}(\tau)$ шумовых сигналов на входе $x(t)$ и на выходе «черного ящика» $y(t)$, можно получить его импульсную характеристику:

$$\begin{aligned} R_{xy}(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t-\tau)dt = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \int_{-\infty}^{\infty} x(t)K(t-\tau)dt dt = R_0 K(\tau) \end{aligned} \quad (2)$$

В реальных условиях, входной шум имеет спектральную характеристику, ограниченную по частоте, например, в виде Марковского шума:

$$S_x(\omega) = \frac{R_0}{\alpha_1^2 + \omega^2} \quad (3)$$

В этом случае теорема Винера требует уточнений.

Если импульсная характеристика системы для метода ВП описывается экспоненциальной функцией:

$$K(t) = A\alpha_2 e^{-\alpha_2 t} \quad (4),$$

с частотной характеристикой вида

$$K(j\omega) = \frac{A\alpha_2}{\alpha_2 + j\omega} \quad (5),$$

то свертка (3) и (5), определяющая функцию взаимной корреляции в спектральном представлении будет иметь вид:

$$S_{xy}(\omega) = \frac{AR_0 \cdot \alpha_2}{(\alpha_1^2 + \omega^2)(\alpha_2^2 + \omega^2)} \quad (6)$$

Эта функция зависит от параметров R_0 , α_1 , являющихся случайными величинами. По этой причине необходимо найти алгоритм обработки, обеспечивающий инвариантность измеряемого параметра относительно нестабильных величин R_0 , α_1 , в (3).

Представим шумовые сигналы $x(t)$ и $y(t)$ в виде разложения в ряд Карунена – Лозва:

$$x(t) = \sum_{j=1}^n \bar{x}_{ij} \psi_{ij}(t) \quad (7)$$

$$y(t) = \sum_{j=1}^n \bar{y}_{ij} \psi_{ij}(t) \quad (8)$$

Где $\psi_{ij}(t)$ – базисные взаимно-ортогональные функции, подчиняющиеся на интервале $[0, \tau]$ закону:

$$\int_0^T \psi_i(t) \psi_j(t) dt = 0 \quad (9)$$

Нормированные по дисперсии случайные амплитуды сигналов, можно записать как:

$$\bar{x}_i = \frac{x_i}{\sqrt{\sigma_x^2}}; \quad \bar{y}_i = \frac{y_i}{\sqrt{\sigma_y^2}} \quad (10)$$

Для получения фазового сдвига $\Delta\varphi_i(\omega_i)$, как информационного параметра ВП, минимизируем разность (7, 8), путем адаптивной вариации некоторого коэффициента γ :

$$\frac{1}{T} \int_0^T [\bar{x}(t) - \gamma \bar{y}(t)]^2 dt \rightarrow \min \quad (11)$$

Для примера, представим базисные функции ψ_i, ψ_j в виде тригонометрических рядов:

$$\psi_{xi} = \sin(\omega_i t + \varphi_i); \psi_{xj} = \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (12)$$

$$\psi_{yi} = \sin(\omega_i t + \varphi_i + \Delta\varphi_i); \psi_{yj} = \cos(\omega_i t + \varphi_i + \Delta\varphi_i)$$

Здесь: ω_i – частота гармоник шумового сигнала; φ_i – начальная фаза; $\Delta\varphi_i = \Delta\varphi(\omega_i)$ – фазовый сдвиг за счет эффекта ВП на i -й гармонике.

Ограничиваясь двумя членами рядов в (7, 8), получим разность амплитуд сигналов x_i и y_i для первой гармоники:

$$\eta = \bar{x}_1 - \gamma \bar{y}_1 = \sqrt{x_i y_i} \sin \Delta\varphi_i [\cos(\omega_i t + \Delta\varphi_i) - \sin(\omega_i t + \Delta\varphi_i)] \quad (13)$$

При малом $\Delta\varphi_i$ и отфильтровки частотно зависимых функций $\sin \omega_i t$ и $\cos \omega_i t$, разность этих сигналов соответствует измеряемому параметру $\Delta\varphi_i$

$$\eta = \sqrt{x_i y_i} \cdot \Delta\varphi_i.$$

Общее число гармоник, при равенстве в (11) амплитуд $\bar{x}(t) = \gamma \bar{y}$, и минимизации этой разницы автоподстройкой коэффи-

циента γ , дает:

$$\eta_n = \sum_{i=1}^n \sqrt{\sigma_{xi}^2} \Delta\varphi_i \quad (14)$$

Это означает, что расширение спектра входных случайных сигналов $x(t)$ за счет появления дополнительных источников помех, лишь увеличивает чувствительность метода.

Если наблюдать функцию взаимной корреляции $R_{xy}(\tau)$ между сигналами $x(t)$ и $y(t)$, то:

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x_i(t) \bar{y}_i(t - \tau) dt = \sigma_{x,y}^2 [\sin \Delta\varphi + \cos \Delta\varphi + \sin(2\alpha + \Delta\varphi)] \quad (15)$$

При малом фазовом сдвиге $\Delta\varphi \rightarrow 0$, эта функция дает коэффициент взаимной корреляции в виде:

$$R_{xy}(0) \approx \sigma_{x,y}^2 (1 + \Delta\varphi \cos 2\alpha) \quad (16)$$

Таким образом, алгоритм вычисления функции взаимной корреляции не позволяет наблюдать малый информационный параметр $\Delta\varphi_i \ll 1$ на фоне большой величины дисперсии сигнала σ_y^2 . По этой причине можно сделать заключение о целесообразности использования в методе ВП разностного алгоритма обработки случайных сигналов (13), дающего возможность получить фазовый сдвиг этого процесса, определяемый через импульсную характеристику $K(\tau)$, как произведенную переходной характеристики разряда двойного электрического слоя ВП:

$$K(\tau) = \frac{\delta}{\delta t} h(t) = h'(t) \quad (17)$$

где для процесса ВП

$$h(t) = A \alpha_2 e^{-\alpha_2 t} \quad (18)$$

Спектральная и фазо-частотные харак-

теристики объектов поиска с импульсной функцией (18):

$$K(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} A\alpha_2 e^{-\alpha t} e^{-j\omega(t-\tau)} dt = \frac{A\alpha_2}{\alpha_2 + j\omega} \quad (19)$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{J_m(j\omega)}{R_e(j\omega)} = \frac{\omega}{\alpha_2} \quad (20)$$

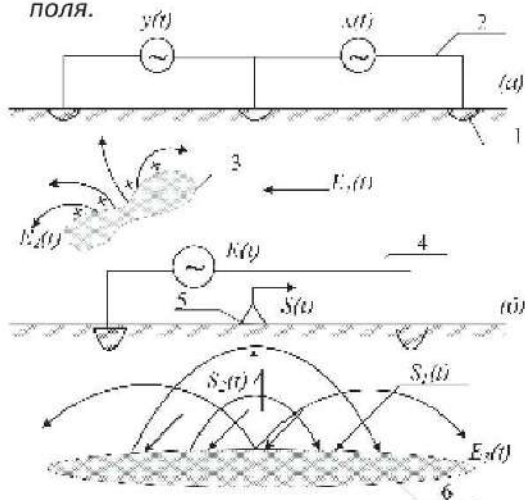
При малом фазовом сдвиге, каждая спектральная линия шумового сигнала дает:

$$\Delta\varphi_i = \frac{\omega_i}{\alpha_{2i}}.$$

Таким образом, общий вид измерительной установки будет иметь следующий вид, представлены на рис. 1а.

Откуда следует, что оценка фазового параметра по (14, 20), приемлема для работ методом ВП. На рис. 2 показана схема проведения экспериментальных работ сейсмо-электрическим методом ВПЕМПЗ на руднике Жомарт 7-8 сентября 2021 (месторождение Жаман-Айбат в

- ▼ Рис. 1. а – электроразведка ВП;
б – сейсмо-электроразведка (СЭ);
1 – неполяризуемые электроды;
2 – приемные линии ВП; 3 – рудное тело;
4 – приемная линия СЭ; 5 – сейсμοприемник;
6 – углеводородный пласт;
 $E_1(t)$, $S_1(t)$ – первичные электрические и сейсмические шумовые поля (СЭШ);
 $E_2(t)$, $E_3(t)$ – вторичные электрические поля.



▲ Рис. 2. Карта проведения полевых работ с нанесенным профилем наблюдений и контуром рудного тела на руднике Жаман-Айбат.

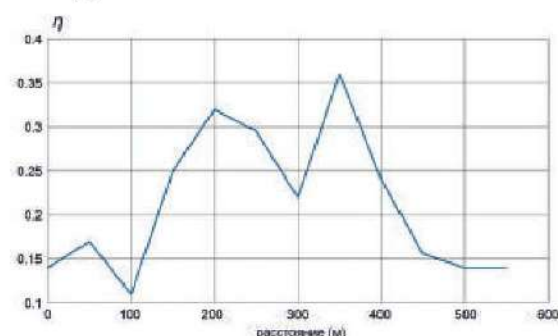
Восточном Казахстане).

Полиметаллическая рудная залежь вкрапленного типа находилась на глубине 600 м. Приповерхностный слой Земли 10-40 м состоит из смесей песка и суглинка, обуславливающих высокое кажущееся сопротивление на участке работ.

Для приема использовалась дифференциальная установка из двух смежных электрических диполей длиной 50 м с заземлением на неполяризующиеся электроды конструкции ВИТРа. Запись сигналов производилась на микроконтроллер с 24-х разрядного аналого-цифрового преобразователя. При обработке сигналов использовался разностный алгоритм (14).

На рис. 3. Представлен график профилирования поперек рудного тела по

▼ Рис. 3. График профилирования по параметру вызванной поляризации на руднике «Жаман-Айбат».



параметру ВП η содержащий два пика по краю аномалии, соответствующий приему градиентной установкой с соотношением сигнал/фон 5:1.

Поскольку использовался диапазон шумовых частот $0.1 \div 20$ Гц, входит в область теллурических токов, то это позволило достичь глубинности 600 м, что по мнению авторов является объяснимой гипотезой появления потенциалов ВП под действием этих токов на больших глубинах.

Можно сделать вывод, что потенциально возможная глубинность исследований методом ВПЕМПЗ соответствует глубине достигаемости методами становления поля и теллурических токов, но работающих по параметрам кажущегося сопротивления.

Применение шумового метода при поиске углеводородов

Представляет интерес использование пассивного сейсмо-электрического метода с выделением информации из сейсмических и электромагнитных шумов Земли при поиске и разведке нефти и газа.

В отличие от метода ВП, основанного на перезарядке двойного электрического слоя – электронный проводник – ионно-проводящая среда, физической основой сейсмо-электрического эффекта является регистрация дополнительного электрического заряда углеводородного пласта под действием сейсмических шумов.

В этом случае, по причине синхронности этих процессов, за исключением временной задержки вторичного электромагнитного поля на участке между поверхностями пласта и земли, оказалось целесообразным использовать в качестве информационного параметра коэффициент взаимной корреляции

между нормированными по дисперсии сигналами, снимаемыми одновременно с сейсмоприемника $S(t)$ и электрического заземленного диполя $E(t)$:

$$R(0) = \frac{1}{T} \int_0^T \overline{E(t)} \overline{S(t-\tau)} dt \quad (21)$$

Здесь T – время наблюдений.

Взаимно-корреляционная функция связи сейсмо-электрического поля, как результат сейсмо-электрического эффекта, вызванного действием сейсмической волны, будет соответствовать импульсной переходной характеристике разряда емкости возбужденного слоя продуктивного пласта:

$$R_{ES}(\tau) = S_0^2 \frac{\delta E(\tau)}{\delta \tau} \quad (22)$$

Это означает, что вторичное электрическое поле СЭ эффекта несет информацию об его электрических и геометрических параметрах.

В [12] были изложены результаты наблюдений методом ВПЕМПЗ на Минусинском газоконденсатном месторождении с использованием дифференциальной электрической установки с длиной приемных диполей до 200 м. График профилирования этой установки показал максимум коэффициента ВП (14) на краю месторождения. Такой результат можно объяснить эффектом разряда эквивалентной емкости продуктивного пласта на окружающую среду. Это позволяет надеяться на использование сейсмо-электрического эффекта в комбинации с методом ВП при поиске углеводородов.

В [11] показано, что при действии на газовый пласт ударного импульса сейсмического источника, амплитуду $E(\tau)$ можно оценить, как:

$$E_x = \frac{E_0 \sigma_2 L_1 L_2 P_2 \tau_u}{4\pi h_1^2 \sigma_1 h_2 V_2 \rho_2} e^{-\beta h_1} \quad (23)$$

Где: $E_0 = 120$ В/м – напряженность статического электрического поля Земли; σ_1, σ_2 – соответственно электропроводности окружающей пласт горной породы и углеводородной среды; L_1, L_2 – продольный, поперечный размер пласта; h_2 – его мощность; h_1 – глубина положения пласта; P_2 – давление сейсмического удара на его поверхность; τ_u – длительность ударного импульса; V_2 – скорость продольной сейсмической волны в среде пласта; ρ_2 – плотность углеводородной среды; β – коэффициент поглощения электромагнитной волны в горной породе.

Для нефтяного пласта, в связи с более высокой плотностью его среды, амплитуда $E(\tau)$ уменьшается как показано в [11] на величину множителя

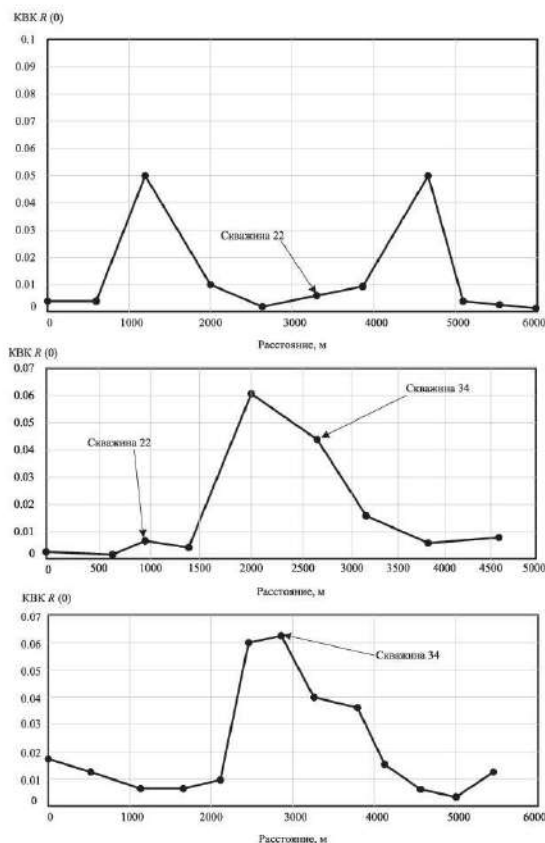
$$1 + \frac{P_0 \tau_u}{m V_2}, \text{ где } P_0 = \frac{P_C}{\lambda_{S2}^2};$$

P_C – сила сопротивления среды; λ_{S2} – размер первой зоны Френеля на поверхности пласта; m – масса смещаемой среды. Этот коэффициент необходимо уточнять лабораторным экспериментом. Однако, с учетом того что для нефти параметр $\frac{P_0 \tau_u}{m V_2}$, то в расчетах E_X можно пользоваться формулой с подстановкой V_2 и ρ_2 характерных для этой среды.

На рис. 4 приведены результаты наблюдений СЭ при регистрации по профилям коэффициента взаимной корреляции электрических и сейсмических сигналов $R(0)$ (26). Работы проводились на нефтяных участках одного из нефтедобывающих предприятий (г. Пермь) в 2019 году.

Как видно из этих графиков, прибор давал четко выраженные аномалии над залежами нефти.

К сожалению, у авторов не было материалов по геологическим структурам района работ.



▲ Рис. 4. Графики профилирования на нефтяном месторождении (Пермская обл.) пассивным сейсмо-электрическим методом.

Выводы

1. Показано, что для выделения информации о потенциалах ВП из шумовых электромагнитных полей Земли в диапазоне частот (0.1÷20 Гц) на полиметаллических месторождениях, можно использовать дифференциальный метод, реализуемый вычислением разности амплитуд сигналов двух смежных электрических диполей.

2. Для поиска углеводородов пассивным сейсмо-электрическим методом, целесообразно использовать алгоритм оценки коэффициента взаимной корреляции между электрическим и сейсмическим шумовыми сигналами.

3. В связи с работой на сверхнизких частотах в диапазоне 0.1÷20 Гц, как при поиске полиметаллических месторождений методом ВП, так и углеводородов

сейсмoeлектрическим методом, в обоих случаях достигается максимально возможная глубинность характерная для электротеллурических исследований.

4. Возможно создание универсального переносного прибора для работы обоими методами.

Работы выполнены при поддержке гранта РФФИ № 20-07-00267.

Литература

1. Преимущества и недостатки метода АФМАГ. Перевод Комен А.А., ред. Вишняков А.Э. Геофизическая аппаратура. Л.: Недра, 37, 28-37.

2. Бердичевский М.Н. Электрическая разведка методом теллурических токов. Гос. н-т изд. нефтяной и горно-топливной лит., М.: Гостоптехиздат, 1960. 237 с.

3. Арутюнов С.Л., Давыдов В.Ф., Кузнецов О.Л. Явление генерации инфразвуковых волн нефтегазовой залежью. — Научное открытие. 1993 - № 109.

4. Ведерников Г.В. Прогноз залежей углеводородов по характеристикам микро-сейсм. Новосибирск. Изд. СВис, 2012, 165 с.

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

6. Шайдуров Г.Я. Об использовании электромагнитных естественных полей для выделения потенциалов ВП. Сборник трудов ВИТРА, № 81, 1972. С. 50-55.

7. Потылицын В.С., Шайдуров Г.Я. Некоторые результаты полевых испытаний метода ВП на основе выделения информации из естественного электромагнитного поля Земли // Приборы и системы разведочной геофизики. «Информ-Геофиз Сервис», Саратов: №. 4, 2012. С. 51-54.

8. Шайдуров Г.Я., Кудинов Д.С., Потылицын В.С. и др. О наблюдении сейсмoeлектрического эффекта на газоконденсатном месторождении в естественных электромаг-

нитных и сейсмических шумах Земли в диапазоне 0.1÷20 Гц. Геология и геофизика, № 5, т. 59, 2018. С. 703-708.

9. Шайдуров Г.Я. Способ предсказания горного удара в шахтах и рудниках. Патент РФ № 2727317 от 15.10.2019.

10. Винер Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине. М.: Сов. Радио, 1968. 325 с.

11. Шайдуров Г.Я. Методика системного анализа сигналов сейсмoeлектрического эффекта при поиске углеводородов Приборы и системы разведочной геофизики Информ. Геофиз. Сервис Саратов 2021 № 4, с. 33-37.

12. Шайдуров Г.Я., Кудинов Д.С., Потылицын В.С. и др. Первые результаты наблюдений сейсмо-электрического эффекта и вызванной поляризации на газоконденсатном месторождении в естественных шумовых полях Земли. Приборы и системы разведочной геофизики. Информ. Геофиз. Сервис Саратов 2016, с. 81-88.

Подробнее об авторах



Шайдуров
Георгий Яковлевич,

д.т.н., профессор
Сибирского федерального
университета (СФУ)
г. Красноярск



Потылицын
Вадим Сергеевич

старший научный
сотрудник,
НИЛ «Электроакустика»
СФУ, г. Красноярск



Майков
Олег Анатольевич

заведующий лабораторией,
Лаборатория электроакустики,
Департамент науки
и инновационной
деятельности СФУ