



УДК 550.837

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОИСКОВ ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ МЕТОДОМ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПРИ МАГНИТОВАРИАЦИОННОМ ПРОФИЛИРОВАНИИ

К.М.ЕРМОХИН*Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН (СПбФ ИЗМИРАН), Санкт-Петербург, Россия*

Традиционно считается, что эффект вызванной поляризации является мешающим фактором для измерения электромагнитных полей и их интерпретации при проведении работ методами магнитотеллурических зондирований и магнитовариационного профилирования.

В работе предложен новый метод выделения эффектов вызванной поляризации при проведении магнитовариационных исследований с целью поиска залежей углеводородов на основе фазовых измерений при проведении магнитовариационного профилирования. Явление вызванной поляризации предлагается использовать в качестве особого поискового признака для глубоко залегающих месторождений углеводородов.

Традиционный метод вызванной поляризации использует искусственные источники поля, мощности которых принципиально недостаточно для достижения глубин 3-5 км, что приводит к необходимости поиска альтернативных – естественных, источников в виде теллурических и магнитотеллурических полей.

Метод позволяет обнаружить и интерпретировать эффекты вызванной поляризации от глубокозалегающих залежей нефти и газа прямым путем, не опираясь на косвенные признаки.

Ключевые слова: эффект вызванной поляризации, магнитовариационный метод, залежи углеводородов, глубинность исследований.

Как цитировать эту статью: Ермохин К.М. Перспективы поисков залежей углеводородов методом вызванной поляризации при магнитовариационном профилировании // Записки Горного института. 2017. Т. 227. С. 518-522. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.518

Введение. Магнитовариационное профилирование (МВП) традиционно применяется для изучения глубинного строения земной коры наряду с общепризнанным методом магнитотеллурических зондирований (МТЗ).

Основным преимуществом МТЗ в методическом плане является синхронность измерений магнитного и электрического полей. Это дает возможность получать объективные характеристики изучаемой среды путем математических процедур. Метод МТЗ позволяет определить распределение электропроводности в земле до очень больших глубин (порядка 10-50 км). В последнее время МТЗ активно применяется при поисках залежей углеводородов (УВ) в комплексе с сейсморазведкой. Однако знание распределения электропроводности часто является недостаточным для уверенного прогнозирования и оконтуривания залежей УВ.

Необходимость измерения электрического поля довольно сильно осложняет и затягивает процесс измерений. Одной из причин этого является поляризация измерительных электродов. Однако можно предложить компромиссное решение, состоящее в сочетании распространенной методики измерения вызванной поляризации (ВП) в фазовой модификации с глубинными возможностями МВП.

Постановка проблемы. Многими авторами рассматривался вопрос о влиянии ВП на результаты МТЗ/МВП с феноменологической точки зрения, но объективная неясность математической закономерности становления ВП во времени мешает решению вопроса о предпосылках интерпретации этого явления в каком-либо виде (качественном или количественном). Общепринятая в настоящее время формула Cole-Cole [5] не дает однозначного ответа на вопрос о временном законе становления ВП в конкретной природной ситуации, что не позволяет реально использовать ее для решения обратной задачи не только в МТЗ или МВП, но и при традиционных методах измерений ВП с контролируруемыми источниками.

Явление ВП является мешающим фактором для МТЗ [4, 6, 8], а залежи углеводородов в виде плохо проводящих локальных неоднородностей на большой глубине – наиболее неблагоприятные объекты поиска. Напротив, залежь, окруженная ореолом сульфидной вкрапленности, – благоприятный объект для поиска методом ВП.

В отличие от МТЗ метод ВП позволяет гораздо увереннее проводить поиски и разведку залежей полезных ископаемых, но преимущественно малоглубинных (100-300 м) и притом рудного типа [5]. Относительно малая глубинность метода ВП объясняется использованием искусственных источников электромагнитного поля с весьма ограниченной мощностью сигнала, что не позволяет применять достаточно длинные линии измерений для увеличения глубинности.

Методология. В последние два десятилетия были выявлены новые закономерности строения разреза земной коры в нефтеносных районах, позволяющие более уверенно определять нефтеносность структур, выявленных сейсморазведкой. Суть этих исследований состоит в том, что над залежами УВ, как правило, образуются сульфидные «шапки» на глубине, существенно меньшей, чем глубина самой залежи [7]. Их появление является следствием образования сульфидов в процессе восстановления железа вертикальным потоком углеводородов из глубоких залежей на геохимических барьерах непосредственно над ними. Это позволяет применять результаты поисков методом ВП как косвенных (хотя и весьма достоверных) признаков наличия УВ в ловушках различного типа. Сказанное подтверждается каротажами диаграммами ВП на нефтеперспективных участках (рис.1).

Процессы восстановления железа с образованием сульфидной вкрапленности происходят и непосредственно на контакте залежи УВ с вмещающими породами и даже более интенсивно. Классической физико-геологической моделью месторождения углеводородов является модель месторождения, связанного с антиклинальными структурами платформенного плана (рис.2).

Запечатывающий слой образуется в области контактов углеводородов с водой. В этой области происходят процессы растворения минералов, образование кальцита, кварца, пирита и других минералов. Под действием этих процессов уменьшается пористость и увеличивается плотность пород. Все это приводит к образованию слоя, запечатывающего залежь. Мощность такого слоя колеблется от нескольких до сотен метров. При этом, когда сульфидная «шапка» находится на небольшой глубине, аномалии ВП над нефтяными месторождениями достигают 5-10 % [7], что свидетельствует о высокой концентрации сульфидов в ней (а тем более в запечатывающем слое).

Моделирование геоэлектрической обстановки [9], результаты которого приведены на рис.3, свидетельствует о слабой разрешающей способности для выделения нефтяной залежи по кажущемуся удельному сопротивлению, но весьма удовлетворительной по кажущейся поляризуемости. Данные модели следующие: удельное сопротивление вмещающей среды $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, поляризуемость $\eta = 0,1 \%$ (что соответствует условиям залежей в Западной Сибири). Удельное сопротивление запечатывающего слоя $\rho = 5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, поляризуемость $\eta = 30 \%$, удельное сопротивление сульфидной «шапки» $\rho = 5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, поляризуемость $\eta = 15 \%$, глубина верхней кромки 380 м, мощность 70 м. Параметры залежи: $\rho = \infty$, $\eta = 0,1 \%$, размеры – 1600 м по простиранию, высота купола 350 м, глубина подошвы 2800 м.

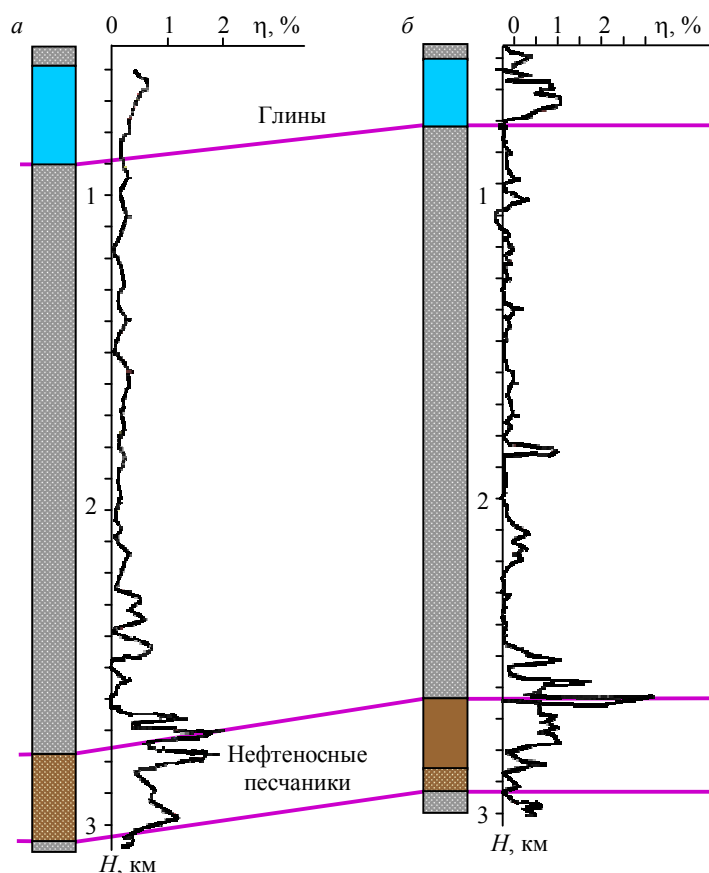


Рис. 1. Каротаж ВП, на непродуктивной (а) и продуктивной (б) скважинах (по В.С.Моисееву [7])

Существенные детали разреза по скважинам выделены: насыщенные нефтеносные песчаники – коричневым цветом, ненасыщенные – коричневым крапом, глины как геохимический барьер – голубым цветом, несущественные детали колонок – серым крапом

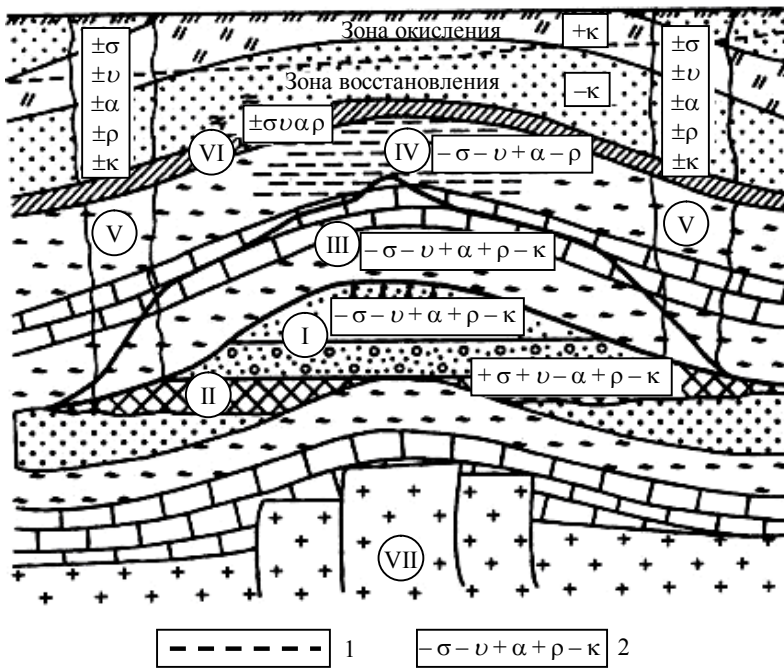


Рис.2. Схема распределения физических свойств пород в пределах нефтегазоносных структур платформенного типа (по В.М. Березкину [1])
 I – залежь нефти и газа; II – запечатывающий слой; III – ореол вторжения; IV – зона разуплотнения пород в зоне структуры; V – субвертикальные зоны неоднородностей (разнонапряженных состояний); VI – опорные границы между породами с различными физическими свойствами; VII – фундамент; 1 – граница между зонами окисления и восстановления; 2 – состояние физических свойств пород относительно пород законтурной части залежи (σ – плотность; ρ – удельное сопротивление; α – коэффициент поглощения; κ – магнитная восприимчивость; v – скорость распространения ультразвука («+» – избыточная, «-» – недостающая)

следования, прямо пропорционален кажущейся поляризуемости на низких частотах возбуждения поля (до 10 Гц). При этом основным положением является факт независимости сдвига фазы ВП от частоты и прямая пропорциональность сдвига фазы индукции от частоты [3].

В соответствии с общей теорией МТЗ и МВП, изучаемое на поверхности переменное электромагнитное поле вызывается ионосферными токами, возникающими вследствие воздействия солнечного ветра (индукционное возбуждение), или грозowymi разрядами (гальваническое возбуждение) [3, 6].

Важным здесь является большая удаленность источника, чтобы можно было считать приходящие сигналы синфазными в точках, отстоящих друг от друга на 1-2 км. При индукционном возбуждении это очевидно, так как высота ионосферных токов 300-400 км, а при гальваническом – грозовой фронт должен быть достаточно удаленным.

Наиболее технологичным при проведении МВП является измерение *вертикальной составляющей* [6] магнитного поля, что позволяет быстро, без сложностей измерения электрических составляющих получать практически значимые результаты.

Случайный переменный во времени сигнал $S(t)$ при достаточно большом интервале измерений T может быть представлен рядом по тригонометрическим функциям:

$$S(t) \approx \sum_{k=0}^{\infty} A_k e^{i\left(k \frac{2\pi}{T} t + \varphi_k\right)},$$

где t – время, φ_k – фаза k -й гармоники.

Отклик среды $R(t)$ на это воздействие состоит в изменении амплитуд слагаемых и сдвиге их фазы:

$$R(t) \approx \sum_{k=0}^{\infty} a_k e^{i\left(k \frac{2\pi}{T} t + \varphi_k + \varphi_k^{in} + \varphi_k^{ip}\right)},$$

Поляризующее поле – горизонтальное однородное электрическое, т.е. глубинность – принципиально бесконечна. Очевидно, что выделение залежи по сопротивлению проблематично, а по поляризуемости, даже при отсутствии сульфидной «шапки», – перспективно. Глубинность метода с искусственными источниками ВП недостаточна для прямого поиска объектов на глубине 3-4 км. Такая ситуация возможна, когда сульфидная «шапка» еще не успела сформироваться или нет геохимического барьера для ее образования.

Для выхода на большие глубины можно применить методику фазового метода ВП измерений магнитного поля при МВП, что позволяет использовать естественный источник поля, гораздо более мощный, чем любая генераторная установка. Фазовый метод измерения ВП состоит в следующем: измеряется сдвиг фазы между первой и третьей гармониками сигнала генератора в форме меандра, который, как показали многочисленные исследования,

где φ_k^{in} – индукционный фазовый сдвиг k -й гармоники, который, согласно сказанному выше, прямо пропорционален частоте, т.е. $\varphi_k^{in} = k\mu$; φ_k^{ip} – сдвиг фазы ВП, не зависящий от частоты $\varphi_k^{ip} = \nu$; μ – индукционный параметр.

Таким образом,

$$R(t) \approx \sum_{k=0}^{\infty} a_k e^{i\left(\frac{2\pi}{T}kt + \varphi_k + k\mu + \nu\right)}$$

Рассмотрим сдвиг фазы отклика среды $R(t)$ в двух точках (1 и 2) – $R_1(t)$, $R_2(t)$, отстоящих недалеко друг от друга (порядка 300-500 м), для некоторой гармоники n . При синхронных измерениях [6, 10], ввиду синфазности, φ_n -фаза n -й гармоники одинакова. Тогда разность сдвига фазы между точками 1 и 2

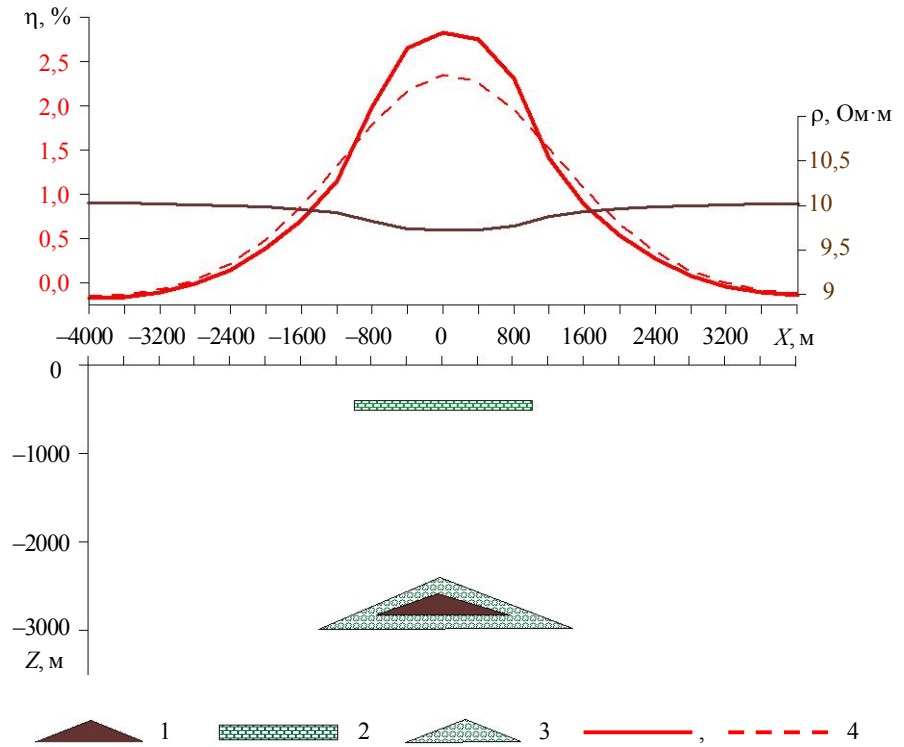


Рис.3. Кажущаяся поляризуемость и сопротивление над залежью УВ
1 – залежь; 2 – сульфидная «шапка»; 3 – запечатывающий слой; 4 – красная кривая – кажущаяся поляризуемость, сплошная линия – при наличии залежи с «шапкой», пунктир – без сульфидной «шапки»

$$\Delta\varphi_n^{12} = n(\mu_2 - \mu_1) + (\nu_2 - \nu_1).$$

Мы получили линейную функцию частоты (номера гармоники) с постоянной составляющей $\nu_2 - \nu_1$ и линейным коэффициентом $\mu_2 - \mu_1$. Построив кривую $\nu_{i+1} - \nu_i$ (где $i = 0 \dots N$) по линии измерений и проинтегрировав ее, получим

$$\nu_k = \sum_{j=0}^k (\nu_{j+1} - \nu_j) + C_\nu,$$

т.е. кривую кажущейся поляризуемости η_k по профилю с точностью до неизвестного слагаемого C_ν , так как $\eta_k(\%) \approx -2,5\nu(\text{grad})$ [5]. Фоновая составляющая C_ν особой роли не играет и может быть выбрана произвольно как средняя по исследуемой площади. Аналогично вычисляется кривая индукционного параметра.

Таким образом, мы получаем представление о поведении η_k по профилю и дополнительно информацию об изменении индукционного параметра. В частности, слабая изменчивость индукционного параметра при измерении вертикальной составляющей магнитного поля – свидетельство отсутствия локальных, хорошо проводящих неоднородностей в разрезе, а наличие зон повышения поляризуемости – присутствия сульфидной вкрапленности.

В работе [2] также рассматривается возможность использования фазово-амплитудных характеристик для измерения эффекта ВП, но без синхронизации измерений, что значительно сложнее технически, а также для обработки и интерпретации.

Погрешность измерений фазы должна составлять не более $0,1^\circ$ ($0,25\%$ по η_k), что соответствует параметрам измерительной аппаратуры фазового метода ВП и может быть достигнуто увеличением интервала измерений T и частоты отсчетов.

Обсуждение. Формулы, полученные на основе разработок предшествующих исследователей, позволяют существенно повысить глубинность метода ВП для прямых поисков залежей уг-



леводородов, которая определяется толщиной скин-слоя в соответствии с формулой $d = \sqrt{2\rho/2\pi f\mu_0}$ (где ρ – удельное сопротивление; f – частота; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость вакуума [3]).

Ожидаемая глубинность исследований при использовании частот порядка 0,1 Гц даже в очень низкоомных разрезах ($\rho \approx 4$ Ом·м), составит, как минимум, 3 км, что представляется достаточным для эффективных поисков залежей УВ, в том числе на шельфе, при глубине моря порядка 100-200 м.

Выводы

1. Синхронные фазовые измерения ВП при проведении работ МВП переводят явление ВП из разряда мешающих факторов в самостоятельный метод прямого поиска залежей углеводородов.

2. Использование в качестве источников поля теллурических токов сверхнизкой частоты (с периодом 10-600 с) обеспечивает практически неограниченную глубинность поисков [6], что при искусственных источниках невозможно.

3. Высокая технологичность предлагаемого метода позволит существенно повысить производительность поисковых работ на нефть и газ и достоверность результатов геофизических поисково-разведочных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Березкин В.М. Применение геофизических методов разведки для прямых поисков месторождений нефти и газа / В.М.Березкин, М.А.Киричек, А.А.Кунарев. М.: Недра, 1978. 223 с.
2. Ермохин К.М. Методика комплексной интерпретации данных метода ВП и сопротивлений на примере Маднеульского медноколчеданного месторождения // Методы разведочной геофизики: Сб. научн. трудов. Л.: НПО «Рудгеофизика», 1990. С. 31-37.
3. Жданов М.С. Электроразведка. М.: Недра, 1986. 316 с.
4. Каменецкий Ф.М. Какая часть Геофизики важнее: Гео или Физика / Ф.М.Каменецкий, Г.М.Тригубович, А.В.Чернышев // Геофизика. 2015. № 2. С. 69-76.
5. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. Л.: Недра, 1980. 391 с.
6. Копытенко Ю.А. Исследование геоэлектрической структуры земной коры методом фазово-градиентного зондирования / Ю.А.Копытенко, В.С.Исмагилов, М.С.Петрицев // Доклады Академии наук. 2015. Т. 462. С. 352-355.
7. Моисеев В.С. Методы вызванной поляризации и наземно-скважинной электроразведки при поисках и оконтуривании залежей углеводородов Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Новосибирск: СНИИГГИМС, 2002. 40 с.
8. Московская Л.Ф. Вызванная поляризация в измерениях теллурических полей // Геофизика. 2006. № 6. С. 29-38.
9. Применение амплитудных и фазовых кривых индукционного зондирования с естественными источниками для целей картографирования / А.И.Ингерев, И.А.Ингерев, А.Л.Лозовой, Я.В.Мендри // Научный вестник Национального горного университета. Днепропетровск, 2012. № 2. С. 5-10.
10. Результаты синхронных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований в районе Ладожской аномалии электропроводности / Е.Ю.Соколова, Н.С.Голубцова, А.А.Ковтун, В.А.Куликов, И.Н.Лозовский, П.Ю.Пушкарев, И.И.Рокитянский, Я.В.Таран, А.Г.Яковлев // Геофизика. 2016. № 1. С. 48-61.

Автор К.М.Ермохин, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, k_m_e@list.ru (Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН (СПбФ ИЗМИРАН), Санкт-Петербург, Россия).

Статья принята к публикации 06.06.2017.