

Наблюдение и физическая интерпретация сейсмоэлектрического эффекта на газоконденсатном месторождении в электромагнитных и сейсмических шумах земли

■ Шайдуров Г. Я., Романова Г. Н., Кудинов Д. С., Кохонькова Е. А., Потылицын В. С.;
Сибирский Федеральный университет, г. Красноярск

В статье дана количественная оценка электрического поля залежи углеводородов на поверхности Земли, возникающего под действием сейсмических возмущений. Гипотетически залежь представляется конденсатором, внешние обкладки которого ограничиваются вмещающей породой, а внутренняя часть описывается средой с диэлектрической проницаемостью, отличной от вмещающей горной породы. Под действием вибраций, накопленный от статического электрического поля Земли заряд начинает синхронно изменяться, что и вызывает на поверхности вторичное электрическое поле. Полученный от подобной модели расчетный график профилирования подтверждается экспериментальными результатами наблюдения сейсмоэлектрического эффекта в 2016 г. на Быстринской площади Минусинского газоконденсатного месторождения.

Первые публикации по сейсмоэлектрическому эффекту (СЭЭ) были сделаны в СССР в 1940 г. А. Г. Ивановым [9, 10]. В последующие годы в России был опубликован целый ряд научных статей с изложением теоретических моделей явления в горных породах, содержащих углеводороды, и некоторых результатов лабораторных и полевых наблюдений [1, 2, 3, 6, 7, 11, 12, 14, 16, 15, 20].

Патентом Берга (США) [19] зарегистрирован «Способ поиска углеводородов путем возбуждения геологического разреза искусственными электрическими и сейсмическими возмущениями от специальных источников» [4, 8, 13] с совместной обработкой вторичных электрических и сейсмических сигналов с соответствующих датчиков.

Этот способ в достаточно большом объеме был проверен в морском варианте на месторождениях Мексиканского залива и арктических морей Российского шельфа [4].

По оценкам авторов этих публикаций новый метод позволяет поднять эффективность разведочного бурения в 4 раза по сравнению с использованием традици-

онной сейсморазведки, что указывает на привлечение нового признака распознавания углеводородов – электрического поля, генерируемого месторождением под действием сейсмического возмущения.

Авторами настоящей статьи в период 2014÷2016 гг. на Минусинском газоконденсатном месторождении (республика Хакасия, Россия) были проведены опытные работы по наблюдению сейсмоэлектрического эффекта в пассивных электрических и сейсмических шумах Земли в диапазоне частот 0,1÷20 Гц с помощью специально разработанного для этой цели двухканального прибора «Шум 6-СЕ». В приборе производится цифровая обработка сигналов и вычисление коэффициента взаимной корреляции (КВК) между ними по алгоритму [17, 18]:

$$R_{ES}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T \bar{E}(t) \cdot \bar{S}(t - \tau) dt, \quad (1)$$

где $\bar{E}(t)$ и $\bar{S}(t)$ – электрический и сейсмический шумовые сигналы, нормированные по дисперсии; τ – временной сдвиг, для $R_{ES}(0)$ $\tau = 0$; T – интервал наблюдения.



Рис. 1. Геологическая карта Быстринской газовой площади.

На рис. 1 приведена геологическая карта Быстринской площади с залежью газового месторождения на глубине 2000 м, где отмечены разведочные скважины и профиль наблюдения KBK $R_{ES}(0)$.

Временные формы функции взаимной корреляции ФВК $R_{ES}(\tau)$ над центром месторождения и его периферии приведены, соответственно, на рис. 2а и 2б. В

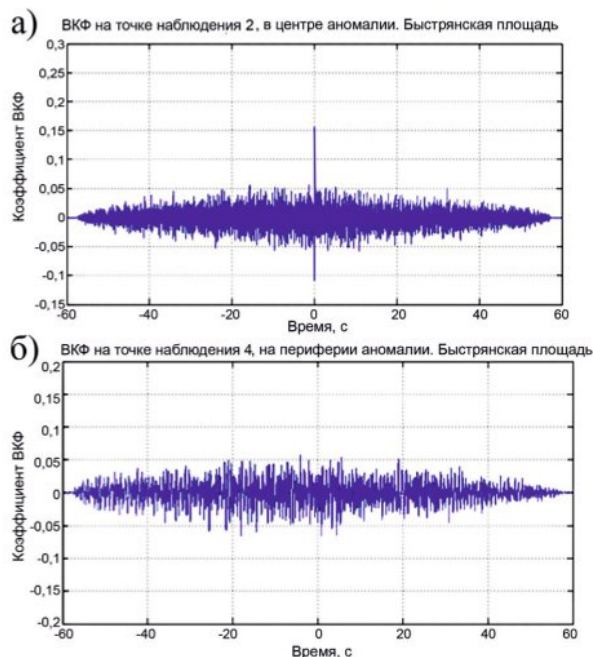


Рис. 2. Временная реализация функции взаимной корреляции: а – в центре месторождения; б – на периферии месторождения.

качестве приемных датчиков сейсмического сигнала использовался стандартный сейсмоприемник, а электрического – заземленная по концам линия длиной 200 м.

На рис. 3 изображены результаты профилирования методом СЭЭ на пяти точках профиля наблюдений. Как видим, аномальная зона отмечена KBK $R_{ES}(0)$ в 3÷5 раз превышающих этот показатель нормальной зоны, причем этот результат качественно повторялся в течение трех лет за исключением некоторого разброса по амплитуде.

На основании этих опытов и с учетом результатов наблюдений эффекта СЭЭ с использованием искусственных источни-

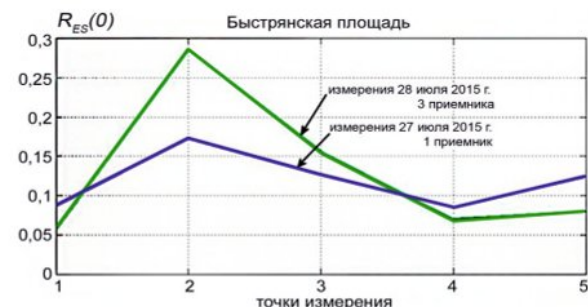
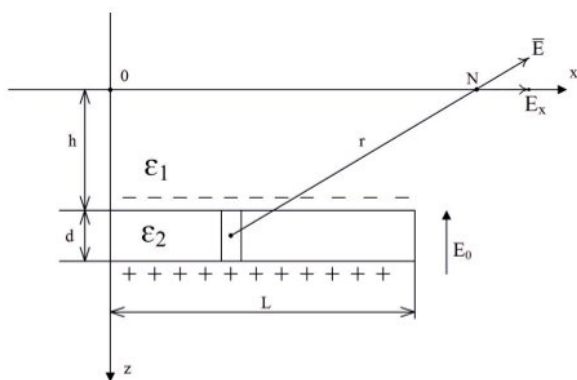


Рис. 3. Профильные характеристики коэффициентов взаимной корреляции, полученные на Быстринской площади.

ков, проведенных другими авторами, можно сделать заключение о возможности использования описанного эффекта для прямых поисков углеводородов.

Безусловным преимуществом пассивного метода относительно активного метода является несравнимая простота аппаратной реализации и его стоимость.

Далее сделаем попытку физической интерпретации наблюдаемого эффекта путем решения обратной задачи – оценки электрического момента некоторого источника, помещенного в центр пласта углеводородов. При этом месторождение моделируется в виде конденсатора эквивалентной площади, заряженного электрическим полем Земли E_0 . Под воздействием сейсмических возмущений пластины «конденсатора» колеблются и во вмещающей среде появляются токи, электрическое поле которых можно зарегистрировать на поверхности Земли.



▲ Рис. 4. Гипотетическая схема углеводородной залежи.

На рис. 4 изображена гипотетическая схема этой физической модели, на которой продуктивный пласт углеводородов с линейными размерами $L \otimes L$, мощностью d , диэлектрической проницаемостью ε_2 и электропроводностью $\sigma_2 = 0$, расположен на глубине h в статическом электрическом поле Земли E_0 .

Дадим оценку напряженности электрического поля E_x на поверхности Земли при

колебаниях пластин «конденсатора» под действием сейсмических возмущений продольной волны ортогональной поверхности пласта.

Емкость подобного «конденсатора»:

$$C = \frac{\varepsilon_2 S}{d}, \quad (2)$$

где $S = L \cdot L$ – площадь «пластины».

Под действием статического поля E_0 на конденсаторе создается заряд:

$$q = \varepsilon_2 \cdot S \cdot E_0 = \frac{\varepsilon_2 \cdot S \cdot U}{d} = C \cdot E_0 \cdot d = C \cdot U, \quad (3)$$

где U – напряжение внутри «конденсатора».

Под действием упругих сейсмических колебаний этот заряд будет колебаться на величину

$$\Delta q = C \cdot U \left(\frac{\Delta \varepsilon_2}{\varepsilon_2} - \frac{\Delta d}{d} \right). \quad (4)$$

Поскольку зависимость ε_2 от давления слабая, в (4) можно опустить первый член и тогда имеем:

$$\Delta q = C \cdot E_0 \cdot \Delta d. \quad (5)$$

Считая, что смещение границы пласта под действием упругих колебаний описывается классическим уравнением:

$$F = m \cdot \frac{d^2 z}{dt^2}, \quad (6)$$

где $F = \Delta P \cdot S$ – действующая сила упругих колебаний; m – масса пласта; ΔP – давление, создаваемое упругими колебаниями.

Из соотношения (6):

$$\Delta d = \frac{S}{m} \int \int_{\tau_1} \Delta P \cdot dt = \frac{S \cdot \Delta P \cdot \tau_1^2}{m}, \quad (7)$$

где τ_1 – время воздействия упругой волны на «конденсатор».

Элемент «конденсатора» ΔS и зарядом

Δq можно рассматривать как электрический диполь с моментом:

$$M = \Delta q \cdot d = \varepsilon_2 \cdot E_0 \cdot d. \quad (8)$$

Приращение момента M под действием сейсмического удара длительностью τ можно записать как:

$$\Delta M = \varepsilon_2 \cdot E_0 \cdot \frac{\Delta P \cdot \tau^2}{\rho \cdot d}, \quad (9)$$

где ρ – плотность среды продуктивного пласта.

Конденсатор с изменяющимся зарядом является источником электрического поля, которое можно оценить, если представить его как сумму полей элементарных электрических диполей.

$$E_x = \frac{h \cdot \Delta M}{4\pi \cdot \varepsilon_1} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{(x - x_i) dx dy}{[(x - x_i)^2 + y_i^2 + h^2]^{\frac{5}{2}}}, \quad (11)$$

где n – количество диполей:

$$dx = dy = \frac{L}{n}.$$

Координаты диполей $x_i = idx$;

$y_i = (i-1)dy$.

С учетом (9), получим:

$$E_x = \frac{\varepsilon_2 \tau_1^2 E_0 \Delta P}{4\pi \varepsilon_2 \rho} \cdot \Phi, \quad (12)$$

где Φ – геометрический коэффициент:

$$\Phi = \frac{h dx dy}{d} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{(x - idx)}{[(x - x_i)^2 + ((i-1)dy)^2 + h^2]^{\frac{5}{2}}}. \quad (13)$$

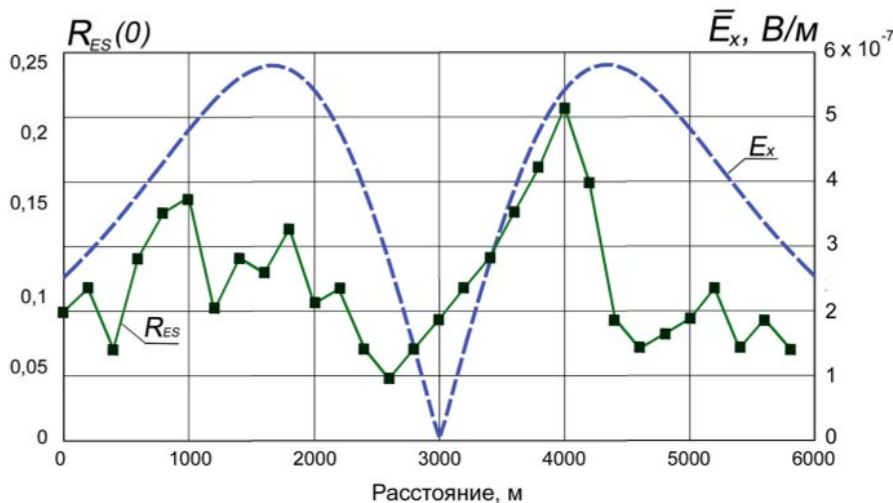


Рис. 5. Экспериментальная профильная характеристика коэффициента взаимной корреляции, полученная на Быстринской площади и расчетная зависимость электрического поля залежи по профилю.

Электрический диполь с моментом ΔM создает в точке N (рис. 5) на поверхности Земли электрическое поле:

$$\Delta E_x = \frac{3\Delta M}{4\pi \cdot \varepsilon_1 \cdot r_i^3} \cdot \frac{(x - x_i) \cdot h \cdot S}{r_i^2}, \quad (10)$$

где $r_i = ((x - x_i)^2 + y_i^2 + h^2)^{1/2}$ – расстояние от i -го элементарного диполя до точки наблюдения $(x, 0, 0)$; x_i, y_i – координаты i -го диполя.

Суммируя (10) по всем элементарным диполям, получим напряженность электрического поля на поверхности Земли:

Давление ΔP в области углеводородного пласта можно оценить по экспериментальным данным. Сейсмоприемник GS-20DX имеет коэффициент преобразования $K = 0,28 \text{ В/(см/с)}$. Уровень напряжения, который был замерен на его выходе при натурных испытаниях $U = 5 \cdot 10^{-6} \text{ В}$. В расчетах принималась плотность среды $\rho l = 1,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, скорость упругих колебаний $V = 4000 \text{ м/с}$. Связь между всеми величинами получается следующей [5]:

$$\Delta P = \frac{U \cdot \rho_1 \cdot V}{K} = 1,28 \text{ Па}. \quad (14)$$

На рис. 5 (пунктирная линия) приведены результаты расчетов по формуле (12) с учетом (14) для модуля электрического поля на поверхности Земли в зависимости от расстояния до центра аномалии при размерах пласта и глубине залегания $L=1000\text{ м}$, $h=1000\text{ м}$, $d=100\text{ м}$.

Плотность пласта $\rho=0,86 \cdot 10^3\text{ кг/м}^3$, относительная диэлектрическая проницаемость пласта $\varepsilon_2=2,18$, относительная диэлектрическая проницаемость вмещающей среды $\varepsilon_1=10$.

Амплитуда давления упругих колебаний $\Delta P=1,28\text{ Па}$, при $\tau_i=1\text{ с}$, что соответствует полосе частот 1 Гц.

Из графика видно, что имеется два максимума модуля E_x по краям пласта, соответствующих полю вертикального электрического диполя. Это подтверждается результатами профилирования на Быстрянской площади в июле 2016 г. (рис. 5, сплошная линия) с регистрацией функции взаимной корреляции между электрическими и сейсмическими шумовыми сигналами в диапазоне частот 0,1 ÷ 20 Гц. Прием E_x велся на заземленный по концам электрический диполь длиной 200 м. При этом среднеквадратичный уровень электрического шума равнялся 100 мкВ, что соответствовало напряженности поля 0,5 мкВ/м. Расположение пикетов (точек измерения КВК) определялось при помощи системы GPS.

Для сравнения с расчетным значением E_x (рис. 5) это величины одного порядка, учитывая неопределенность в оценке параметров пласта L , d , ε_2 и характеристики воздействия E_0 , ΔP , τ_i .

Анализ графиков показывает, что наиболее четко проявляются границы пласта, что соответствует экспериментальным данным [14].

Заключение

1. Полученные результаты профилирования коэффициента корреляции $R_{ES}(0)$ электрических и сейсмических шумов

Земли в диапазоне частот 0,1 ÷ 20 Гц над газоконденсатным месторождением удовлетворительно описываются моделью пластовой залежи в виде заряженного конденсатора, создающего на поверхности Земли электрическое поле под действием естественных сейсмических возмущений.

2. Достаточно высокий коэффициент взаимной корреляции $E(t)$ и $S(t)$ свидетельствуют о взаимосвязанности и синхронности этих полей и подтверждает гипотезу о появлении нового признака распознавания углеводородов в виде вторичного электрического поля.

3. Результаты наших наблюдений подтверждают данные, полученные другими авторами активным методом в морских условиях при одновременном воздействии электрических и сейсмических возмущений от специальных источников.

Литература

1. Анциферов М. С. Лабораторное воспроизведение сейсмоэлектрического эффекта второго рода // Докл. АН СССР. 1958. № 5. С. 127.
2. Анциферов М. С. Электросейсмический эффект. Применение сейсмоэлектрических методов в горном деле. М.: Наука. 1964.
3. Бобровников Л. З., Геннадиник Б. И., Мельников В. П. К принципам моделирования сейсмоэлектрического эффекта второго рода // Доклады АН СССР. М.: Наука. № 4. 1989. Т. 309.
4. Берг. А. Э. Технология и опыт применения становления электромагнитного поля под воздействием сейсмического облучения (СПСО) при поисках месторождений углеводородного сырья. [Электронный ресурс] // ООО «Элкин» Санкт-Петербург: [сайт]. URL: [http://phenomenon-in-oilaccumulation.weebly.com/uploads/3/0/7/3/307309/direct-detection\(rus\).pdf](http://phenomenon-in-oilaccumulation.weebly.com/uploads/3/0/7/3/307309/direct-detection(rus).pdf) (дата обращения: 25.10.2016).
5. Л. Бергман. Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: Издательство иностранной литературы. Москва 1957. 726 с.
6. Вишняков-Берг А. Э., Паняев В. П., Яневич М. Ю. и др. Разработка теории и методики прямых поисков залежей нефти и газа. // Фонды ПГО «Севморгео», НИИ Геологии Арктики. 1981. 176 с.
7. Губатенко В. П., Светов Б. С., Московский И. Г. Электромагнитное поле механо-электри-

ческого происхождения в пористых влагонасыщенных горных породах. Расчеты в горизонтально-слоистых средах // Физика Земли. № 2. Т. 2. 2002. С. 34–50.

8. Добрынин С. И., Головин С. В., Бобровников Л. З., Мелаев Д. В. Инновационная технология оценки и мониторинга запасов углеводородов в разрабатываемом нефтегазовом пласте // Инженер-нефтяник. М.: ООО «Ай Ди Эс Дриллинг». 2012. № 2. С. 24–29.

9. Иванов А. Г. Эффект электризации пластов земли при прохождении через них упругих волн // Докл. АН СССР. 1939. № 1. С. 24.

10. Иванов А. Г. Сейсмоэлектрический эффект второго рода // Изв. АН СССР, Геология и геофизика. № 5. 1940.

11. Кондрат В. Ф. К исследованию механоэлектроманнитных процессов в пористых водонасыщенных средах во внешнем электрическом поле // Проблемы динамики взаимодействия деформируемых сред. М.: Ереван. АН Арм. СССР 1987. С. 166–170.

12. Кондрат В. Ф., Лизун С. А., Шпот Ю. А. О влиянии внешнего электрического поля на распространение сейсмических волн в слоистых средах // Сейсмические модели поиска и разведки месторождений полезных ископаемых. Киев. 1991. С. 26–27.

13. Мельников В. П., Лисов В. И., Брюховецкий О. С., Бобровников Л. З. Инновационная геофизика: бинарные технологии прямых поисков месторождений полезных ископаемых. ч. 1 // Инженер-нефтяник. М.: ООО «Ай Ди Эс Дриллинг». 2011. № 1. с. 47–51.

14. Потапов О. А., Лизун С. А., Кондрат В. Ф. Основы сейсморазведки. М.: Недра. 1995. 268 с.

15. Светов Б. С., Губатенко В. П. Электромагнитное поле механоэлектрического происхождения в пористых влагонасыщенных горных породах. Постановка задачи // Физика Земли. 1999, № 10. Т. 1. С. 67–73.

16. Френкель Я. И. К теории сейсмических и сейсмоэлектрических явлений во влажной почве // Изв. АН СССР. - Сер. Географ, и геофизика. 1944. № 4. С. 133–150.

17. Шайдуров Г. Я., Кудинов Д. С., Потылицын В. С., Кохонькова Е. А., Шайдуров Р. Г. Первые результаты наблюдения сейсмоэлектрического эффекта и вызванной поляризации на газоконденсатном месторождении в естественных шумовых полях Земли // Приборы и системы разведочной геофизики. М.: ИнформГеофизСервис. Саратов. 2016. № 1. С. 81–88.

18. Шайдуров Г. Я., Кудинов Д. С., Потылицын В. С. Способ поиска залежей углеводородов. Патент РФ № 2559046, Бюл. № 22. 10.08.2015.

19. A. Berg. Method of Seismo-Electromagnetic Detecting of Hydrocarbon Deposit, US Patent № 7 330 790. October 2005.

20. M. A. Biot. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. J., Acoust. Soc. Am. 28. 1956.

Подробнее об авторах



Шайдуров
Георгий Яковлевич
заслуженный деятель науки
и техники РФ, д. т. н.,
профессор Военно-инженерного
института Сибирского
федерального университета



Романова
Галина Николаевна

старший научный
сотрудник НОЦ
«Иридий»



Кудинов
Данил Сергеевич

к. т. н., доцент Военно-инженерного института
СФУ.



Потылицын
Вадим Сергеевич

аспирант, зав. лабораторией
Военно-инженерного института
СФУ.

Кохонькова
Екатерина Анатольевна

аспирант Военно-инженерного
института СФУ.