

УДК 621.371:550.837.6

СТРУКТУРА ОБНАРУЖИТЕЛЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОЙ ЗАЛЕЖИ

Д.В. ГОЛОЛОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 9 июня 2010

Обосновано возрастание уровня мощности над скоплением углеводородов, обусловленного собственным излучением залежи. Предложена схема обнаружителя естественного электромагнитного излучения углеводородов.

Ключевые слова: углеводородная залежь, естественное излучение, радиотехническая система, решающее устройство, анизотропная среда.

Введение

Месторождения нефти и газа являются источниками естественного электрического поля, связанного с условиями залегания залежей углеводородов [1, 2]. Еще в 1980 году впервые была предложена модель нефтяной залежи в виде активной резонансной излучающей системы [3], в которой объем пород над залежью представлялся индуктивностью, нефть играла роль диэлектрика, а подошва и надзалежная кромка – роль обкладок конденсатора. Таким образом, вся система представлялась как активная резонансная система, способная генерировать колебания, определяемые геометрическими размерами конденсатора и глубиной залегания углеводородной залежи (УВЗ).

На рис. 1 представлен график распределения источников естественного электромагнитного излучения (ЕИ) по глубине [1], большая часть которых находится на глубинах 1,3–1,8 км, соответствующих осадочному чехлу Земли. Значительное число источников, также, располагается на интервале глубин от 2 до 5 км. Ниже этой отметки количество излучающих источников резко уменьшается. Учитывая реальные глубины залегания нефтегазовых залежей, составляющие 1,5–5 км, можно считать, что часть естественного электрического поля связана с процессами, происходящими в местах скопления углеводородов. При этом интенсивность аномалий может достигать сотен милливольт [1].

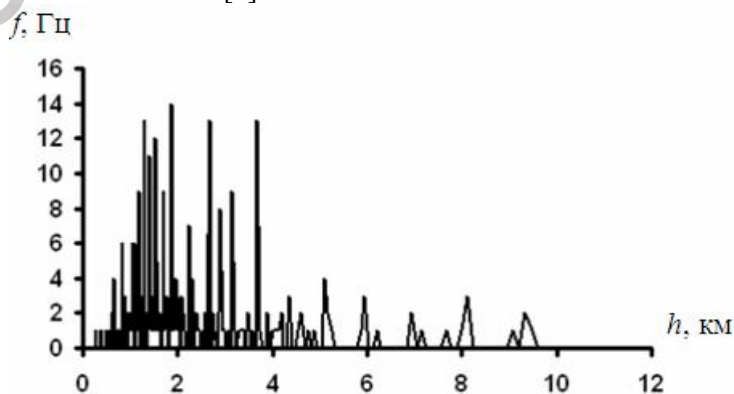


Рис. 1. Излучения ЕИ в зависимости от глубины относительно поверхности земли

Обоснованием возникновения ЕИ являются диффузионно-адсорбционные и фильтрационные процессы в горных породах, насыщенных подземными водами, связанных с различной подвижностью катионов и анионов, обеспечивающих неравномерное распределение зарядов в подземных водах разной концентрации, что и ведет к созданию естественного электрического поля диффузионной природы [2].

Постановка задачи

Учитывая особенности электродинамической модели [4], связанные с существованием градиента электрического поля в условиях нормальной ориентации геомагнитного поля H_0 относительно границы раздела сред, а также анализ электрофизической обстановки в окрестности УВЗ, среда над залежью углеводородов проявляет анизотропные свойства. Обоснованием анизотропных свойств среды над УВЗ являются следующие физико-математические факторы. По известным значениям средней скорости миграции свободных носителей над УВЗ v_i [2] и характерным глубинам залегания нефтегазовых залежей h определяются концентрации частиц в потоке над залежью:

$$N_i = \frac{\sigma_r}{q_i p_i}, \quad (1)$$

где σ_r – проводимость вмещающих пород над УВЗ; q_i – заряды частиц; $p_i = v_i/E$ – дрейфовые подвижности; E – напряженность поля между залежью и границей раздела двух сред. С течением диссипативных процессов в гетерогенной среде над залежью происходят столкновения частиц. Поэтому для наиболее энергоемких столкновений частиц в модели учитываются эффективные частоты столкновений между ионами и электрон-ионные:

$$v_{\text{эффИИ}} = \frac{q_i}{m_i p_i}, \quad (2)$$

$$v_{\text{эффЭИ}} = k_m v_{\text{эффИИ}},$$

где m_i – масса i -ой частицы; $k_m = \sqrt{m_u/m_e}$ – коэффициент соотношения масс иона m_u и электрона m_e . При этом плотность полного тока в надзалежной области определяется суммой плотности тока проводимости $\delta_{\text{пров}}$ и токов конвекции $\delta_{\text{ки}}$:

$$\vec{\delta} = \vec{\delta}_{\text{пров}} + \sum_i \vec{\delta}_{\text{ки}} = j\omega\epsilon_0\epsilon_r \vec{s} + \sum_i q_i N_i v_i, \quad (3)$$

а процесс движения частиц характеризуется уравнением

$$\vec{v}m(j\omega + v_{\text{эфф}}) = q\vec{s} + q\mu_0[\vec{v}\vec{H}_0]. \quad (4)$$

Совместное решение уравнений (3)–(4) позволяет представить свойства среды над УВЗ в случае гармонического воздействия ЭМВ с напряженностью поля $\vec{s} = E_m \exp(\omega t - \vec{k}r)$ тензором диэлектрической проницаемости вида:

$$\dot{\vec{\epsilon}} = \begin{vmatrix} \dot{\epsilon}_1 & -j\dot{\epsilon}_2 & 0 \\ j\dot{\epsilon}_2 & \dot{\epsilon}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\epsilon}_3 \end{vmatrix}, \quad (5)$$

компоненты которого определяются выражениями

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_1 &= \varepsilon_r - j \frac{\sigma_r}{\omega \varepsilon_0} + \sum_{i=1}^2 \omega_{\Pi i}^2 \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_i^2} \left[1 - j \frac{\omega_{\Gamma i}^2 + \omega^2 + v_i^2}{\omega_{\Gamma i}^2 - v_i^2 - \omega^2} \cdot \frac{v_i}{\omega} \right], \\ \dot{\varepsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \frac{\omega_{\Pi i}^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_i^2} \cdot \frac{\omega_{\Gamma i}}{\omega} \left[\omega^2 - v_i^2 - \omega_{\Gamma i}^2 - j2\omega v_i \right], \\ \dot{\varepsilon}_3 &= \varepsilon_r - j \frac{\sigma_r}{\omega \varepsilon_0} - \sum_{i=1}^2 \frac{\omega_{\Pi i}}{v_i^2 + \omega^2} \left[1 + j \frac{v_i}{\omega} \right].\end{aligned}\quad (6)$$

где $\omega_{\Pi i} = q_i \left(\frac{N_i}{m_i \varepsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}$ – плазменная и $\omega_{\Gamma i} = \frac{q_i \mu H_0}{m_i}$ – циклотронная частоты i -ой частицы.

Информация о воздействии среды с анизотропными свойствами на гармоническую ЭМВ заложен в компонентах тензора (8) и уравнениях электромагнитного поля

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{\delta} + j\omega \varepsilon \vec{E}, \quad (7)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H}.$$

Представим наблюдаемый процесс в виде

$$r(t) = \theta y(t) + s(t) + n(t), \quad (8)$$

где $y(t)$ – естественное излучение; $\theta = \{0, 1\}$ – параметр обнаружения; $s(t)$ – сигнал источника подсвета (контролируемое излучение); $n(t)$ – шум, представленный в виде аддитивной смеси внутреннего шума приемника $n_p(t)$ и внешней помехи (фоновые шумы) $n_0(t)$.

Поставленная задача обнаружения естественного излучения на фоне шума реализуется схемой энергетического приемника (рис. 2).

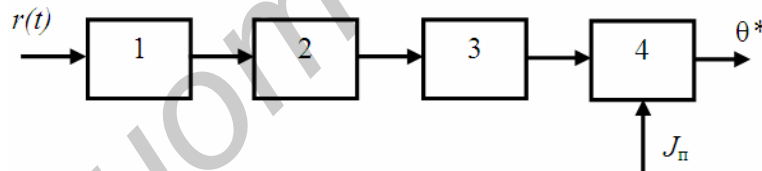


Рис. 2. Структурная схема энергетического приемника: 1 – полосовой фильтр; 2 – квадрат; 3 – интегратор; 4 – пороговое устройство

Полосовой фильтр должен иметь амплитудно-частотную характеристику, обеспечивающую выделение заданной относительной полосы частот $\Delta f/f_0$. При этом Δf совпадает с шириной энергетического спектра естественного излучения $N_{\text{ЕИ}}(f)$, а средняя частота зависит от способа извлечения информации об естественном излучении. На выходе интегратора производится оценка наблюдаемого процесса на некотором интервале времени $[0, T]$

$$J = \int_0^T r^2(t) dt, \quad (9)$$

которая сравнивается с пороговым значением J_n . Принятие решения производится по правилу

$$\theta^* = \begin{cases} 1, & \text{если } J \succ J_n, \\ 0, & \text{если } J \prec J_n. \end{cases} \quad (10)$$

Решение задачи обнаружения естественного излучения

Если время анализа T определяется из условия $T\Delta f \gg 1$, тогда закон распределения случайной величины J может быть описан гауссовой плотностью распределения вероятности

$$W = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left[-\frac{(J - \langle J \rangle)^2}{2\sigma_i^2}\right], \quad (11)$$

где $\langle J \rangle$, σ_i^2 – среднее значение и дисперсия случайной величины J , подстрочный индекс i может принимать значение равное 1, соответствующее наличию ЕИ, или 0 – отсутствие излучения.

Определив среднее значение и дисперсию при наличии ($\theta = 1$) и отсутствии ($\theta = 0$) ЕИ можно вычислить вероятность ложной тревоги $P_{ЛТ}$ и правильного обнаружения $P_{ПО}$

$$P_{ЛТ} = \int_{J_{п}}^{\infty} W(J | \theta = 0) dJ = \Phi\left[\frac{\langle J_0 \rangle - J_{п}}{\sigma_0}\right], \quad (12)$$

$$P_{ПО} = \int_{J_{п}}^{\infty} W(J | \theta = 1) dJ = \Phi\left[\frac{\langle J_1 \rangle - J_{п}}{\sigma_1}\right]. \quad (13)$$

Средние значения и дисперсии при этом могут быть определены при наличии данных об энергетических спектрах ЕИ $N_{ЕИ}(f)$, сигнала подсвета $N(f)$ и шума $N_{Ш}(f)$.

Принимая во внимание данные, приведенные в [1] и рис. 1, можно представить энергетический спектр ЕИ в виде, представленном на рис. 3,а. Энергетический спектр сигнала подсвета $N(f) = N_0$ представляется в виде узкополосного процесса с центральной частотой f_0 , а шумовая составляющая гауссовского шума со средней энергией $N_{Ш}$ (рис. 3,б).

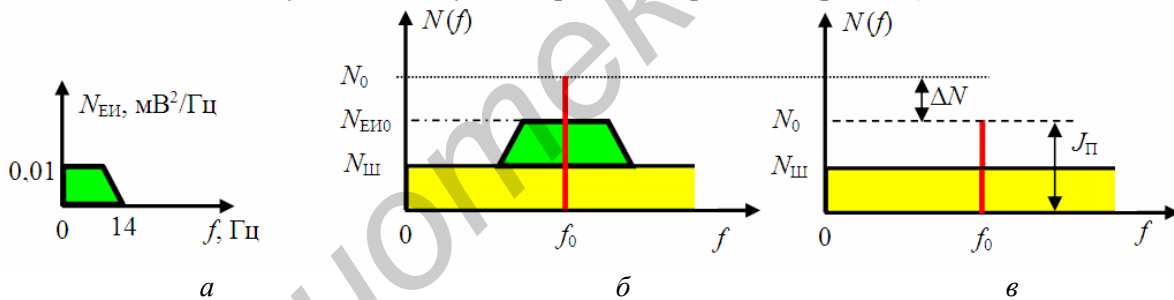


Рис. 3. Энергетические спектры смеси $r(t)$

Рассмотрим случай, когда ЕИ отсутствует ($\theta = 0$), тогда на входе приемного устройства действует сигнал подсвета $r(t) = s(t) + n(t)$. Согласно (2) среднее значение $\langle J_0 \rangle$:

$$\langle J_0 \rangle = \int_0^T r^2(t, \omega) dt = \int_0^T s^2(t) dt + \int_0^T n^2(t) dt + \int_0^T s(t)n(t) dt, \quad (14)$$

здесь последний член есть не что иное, как взаимная корреляционная функция между шумом и сигналом подсвета. Поскольку сигнал подсвета формируется независимо от приемника, то эта функция равна нулю. Принимая во внимание теорему Винера-Хинчина, а также свойства автокорреляционной функции, можно записать

$$\langle J_0 \rangle = N\Delta f T + N_{Ш}\Delta f T = (q_1 + 1)\Delta f T N_{Ш}, \quad (15)$$

$$\sigma_0^2 = (N + N_{Ш})^2 \Delta f T = (q_1 + 1)^2 \Delta f T N_{Ш}^2. \quad (16)$$

Таким образом, среднее значение и дисперсия смеси зависит от соотношения сигнала подсвета и шума.

Рассмотрим ситуацию, когда имеется ЕИ, т.е. $\theta = 1$, тогда

$$\begin{aligned} \langle J_1 \rangle &= \int_0^T r^2(t, n) dt = \int_0^T y^2(t) dt + \int_0^T s^2(t) dt + \int_0^T n^2(t) dt + \int_0^T s(t)n(t) dt + \\ &+ \int_0^T s(t)y(t) dt + \int_0^T y(t)n(t) dt = \langle J_1^y \rangle + \langle J_1^n \rangle + \langle J_1^s \rangle + \langle J_1^{sn} \rangle + \langle J_1^{sy} \rangle + \langle J_1^{yn} \rangle \end{aligned} \quad (17)$$

В силу статистической независимости ЕИ, сигнала подсвета и шумов $\langle J_1^{sn} \rangle = \langle J_1^{sy} \rangle = \langle J_1^{yn} \rangle = 0$, имеем

$$\langle J_1 \rangle = (N_y + N_{ш} + N) \Delta f T = (q_2 + 1 + q_1) \Delta f T N_{ш}, \quad (18)$$

$$\sigma_1^2 = (N_y + N_{ш} + N)^2 \Delta f T = (q_1 + 1 + q_2)^2 \Delta f T N_{ш}^2. \quad (19)$$

Учитывая (15)–(16) и (17)–(18), можно записать

$$P_{\text{ЛП}} = \Phi \left[\frac{(1 + q_1) \Delta f T - J_{\text{П}} / N_{\text{ш}}}{(1 + q_1) \sqrt{\Delta f T}} \right], \quad (20)$$

$$P_{\text{ПО}} = \Phi \left[\frac{(1 + q_1 + q_2) \Delta f T - J_{\text{П}} / N_{\text{ш}}}{(1 + q_1 + q_2) \sqrt{\Delta f T}} \right]. \quad (21)$$

Важным здесь является то, что вероятность правильного обнаружения определяется не только соотношением сигнал/шум, но и отношением уровней естественного излучения и шума. Это накладывает очень жесткие требования к поиску частотного диапазона с минимальными уровнями фоновых шумов и снижению собственных шумов приемника.

Из рис. 3 видно, что пороговое значение определяется амплитудным значением сигнала подсвета, а максимальное его превышение определяет максимальный уровень естественного излучения УВЗ.

Заключение

При представлении УВЗ в виде активной резонансной системы, оптимальный обнаружитель анизотропного проявления должен строиться по схеме энергетического приемника. При этом ввиду статистической независимости компонентов смеси полезного сигнала и помех их взаимные энергии не учитываются, поскольку в среднем они равны нулю.

Вероятность правильного обнаружения определяется не только временем наблюдения процесса в дискретной точке и соотношением сигнал/шум на входе приемника, но и соотношением ЕИ/шум. При аппаратной реализации приемника следует оптимизировать выбор частоты контролируемого источника исходя из существующих рекомендаций ИТУ-R Р.372-9, в которых приведены частотные зависимости уровней атмосферных шумов. Кроме того, необходимо минимизировать собственные шумы тракта обработки сигналов. На всех стадиях обработки низкоэнергетических информационных полей необходимо следить за воздействием помех и естественных излучений на формируемый измерительный радиоканал.

STRUCTURE OF DETECTOR NATURAL ELECTROMAGNETIC FIELDS HYDROCARBON DEPOSITS

D.V. GOLOLOBOV

Abstract

An increase in the level of power over the accumulation of hydrocarbons due to the intrinsic radiation of the reservoir is justified. A scheme detector is the natural electromagnetic radiation of hydrocarbons is proposed.

Литература

1. *Хасанов Д.И.* Введение в электроразведку. Казань, 2009.
2. *Гололобов Д.В.* Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей. Мн., 2009.
3. *Семенцов А.Ф.* // Бюл. изобрет. 1986. №38. С. 192.
4. *Хмелевский В.К., Бондаренко В.М.* Электроразведка. Справочник геофизика. М., 1989.

Библиотека БГУИР