

РАДИОВОЛНОВЫЕ ЗОНДИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ:
ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ, СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВА

© В.Н. Шуман, С.П. Левашов, Н.А. Якимчук, И.Н. Корчагин, 2008

*Институт геофизики им. Субботина НАН Украины, Киев, Украина
Центр менеджмента и маркетинга в области наук о Земле ИГН НАН Украины, Киев, Украина*

This article takes into account the possibility to synthesize classical and neo-classical physical-mathematical models of the medium, for example, the interaction between a multi-phase heterogeneous system, characterized by a wide spectrum of differences in kind, and an electromagnetic field. The analysis deals with both low-frequency, and high-frequency regimes of electromagnetic sounding systems jointly with special features of their discrimination. The issues of georadar sounding are brought forward for discussion, particularly determining velocities of electromagnetic impulses propagation and observation data visualization. Theoretical postulates, expounded in the given report, are concerned about resonance interaction among radio wave spectrum of radiation and electronic and ionic flows ascending above hydrocarbon deposits. Specific geological objects are exemplified in accordance with experimentally obtained results of observation.

Введение. За последние десятилетия теория электромагнитных зондирующих систем с контролируемым и естественным возбуждением поля, представленных чрезвычайно широким спектром конфигураций, достигла определенного совершенства. Теоретической основой служит классическая электродинамика сплошных сред, в которой электромагнитные явления описываются системой линейных уравнений Максвелла с коэффициентами, характеризующими макроскопические осредненные феноменологические параметры среды: электропроводность σ , диэлектрическая ϵ и магнитная μ проницаемости. Многие ее разделы развиты с достаточной полнотой, создан математический аппарат для решения прямых и обратных задач, существенно расширен класс физических моделей и уравнений, используемых для описания распространения электромагнитных возмущений в земной коре и вдоль границы раздела земля–воздух. Однако отдавая должное этой высокоформализованной теории и обширному эксперименту, важно обратить внимание на то, что некоторые ее положения сформулированы недостаточно полно, в ней все еще существуют заметные пробелы и нерешенные проблемы. В частности, в отношении важных и актуальных с прикладной точки зрения вопросов нет полной ясности даже в самой формулировке задач, в понимании существа геологических моделей искомым объектов, их особенностей и степени соответствия реальной геоэлектрической обстановке. Это прежде всего исследование механизмов возбуждения геологической среды различными типами источников электромагнитного поля, учета ее гетерогенности; изучение ранней и сверхранней стадий становления поля, механизмов доставки электромагнитного отклика к точкам его ре-

гистрации и др., а также факт экспериментального обнаружения на кривых зондирований становления поля относительно высокочастотных осложнений или осцилляций, не находящих объяснения с позиции квазистационарного процесса [1–5].

Есть еще один экспериментальный «сюрприз», связанный с установлением тесной корреляции локальных электрических характеристик приземного слоя атмосферы (в частности, объемного заряда) с локальной геологией и геодинамикой среды в окрестности пунктов наблюдений [6]. Напомним, что приземный слой – это тонкая пограничная область между Землей и атмосферой мощностью 1,5–2,0 м, в которой действует вертикальное электрическое поле глобальной электрической цепи и формируются положительные и отрицательные заряды [6–8].

Трудности теоретического анализа упомянутых проблем, очевидно, в первую очередь связаны с тем обстоятельством, что, как правило, мы имеем дело не с чистыми каноническими уравнениями, а со сложной реальной системой. И здесь не всегда удается избежать различного рода идеализаций, часто субъективных, не отвечающих условиям проведения полевого эксперимента.

В качестве примера можно указать на неадекватность существующих теоретических систем реальным условиям выполнения наблюдений. В частности, трудно согласиться с утверждением, что строгое решение задачи об изменении интенсивности и формы электромагнитных возмущений в процессе их распространения в реальных средах «принципиально невозможно», но с практической точки зрения отсутствие соответствующей теории несущественно, так как распространение возмущений в геологической среде

происходит с конечной скоростью, которую можно определить экспериментально [9]. Парадоксальность такой точки зрения очевидна: в таком случае было бы слишком оптимистично надеяться на эффективное развитие георадарного метода геофизических исследований.

Заметим, что высокая скорость затухания электрических полей в проводящих средах обуславливает ориентацию большинства методов современной геоэлектрики на низкие частоты (в диапазоне «низкочастотного окна» Габийяра [10, 11]). Например, при поисках углеводородов (УВ) с контролируемым или естественным возбуждением поля полоса частот обычно составляет от 500 до 0,002 Гц. Тем не менее в последние годы центр тяжести в области геоэлектромагнитных исследований заметно смещается в область более высоких (до 10^6 Гц) частот, т. е. в область «высокочастотного окна» [12].

Как известно, использование высокочастотных электромагнитных полей содержит очевидные преимущества, такие как экономия электрических затрат, направленность изучения, повышенная точность и разрешающая способность, пониженная стоимость работ, технологические разработки. Тем не менее все еще остается неясным вопрос: в каких геологических условиях и до каких глубин исследования можно эффективно применять высокочастотные зондирующие системы. К примеру, классическая теория указывает, что с одним и тем же георадаром отражающая поверхность может быть обнаружена на глубине около 4 км (чистый лед) и не более 4 м (влажные глинистые образования) [9]. Попыткам анализа некоторых аспектов этого круга проблем и посвящено дальнейшее изложение. Нами сделана попытка рассмотреть их как с феноменологической, так и с эвристической точки зрения, что может способствовать их пониманию.

Синтез классических и новых физико-математических моделей геосреды — гетерогенной многофазной системы с широким спектром неоднородностей — и ее взаимодействие с электромагнитным полем, анализ результатов натурного моделирования и полевого эксперимента над нефтегазовыми объектами и составляет предмет рассуждений.

В разд. 1 статьи на простейших, ставших уже классическими моделями электромагнитной волны у границы раздела двух полупространств и дипольного излучателя в однородной среде анализируются высокочастотные и низкочастотные режимы зондирования, а также особенности их реализации в реальной геологической среде. Разд. 2 посвящен некоторым актуальным, с нашей точки зрения, вопросам георадарного зондирования, в частности, способам определения скорости распространения электромагнитного

импульса в геосреде и визуализации данных наблюдений. В разд. 3 изложены элементы теории резонансного взаимодействия излучения радиоволнового диапазона с восходящими над глубокозалегающими залежами УВ электронными и ионными потоками. Обсуждается новая базовая (фундаментальная) модель геосреды для описания процесса этого взаимодействия. В разд. 4 представлены некоторые примеры и результаты экспериментальных наблюдений на конкретных геоэлектрических объектах.

Авторы надеются, что изложение соответствующего материала окажется полезным и оправданным.

1. Высокочастотные и низкочастотные режимы электромагнитных зондирующих систем

Как известно, исследование зависимости напряженности электромагнитного поля \mathbf{E} , \mathbf{H} от типа источника, его направленности, силы тока, питаемого источник, его частоты, электромагнитных характеристик среды σ , ϵ , μ , глубины зондирования и времени становления во всем допустимом диапазоне изменения этих параметров представляет довольно сложную проблему [13]. Ввиду ее сложности в дальнейшем ограничимся рассмотрением двух простейших случаев: плоской электромагнитной волны у границы раздела двух полупространств (границы раздела земля—воздух) и дипольного излучателя, помещенного в однородную безграничную среду.

1.1. Однородное полупространство с параметрами σ , ϵ , μ , возбуждаемое плоской волной. Введем декартову систему координат x , z , y и примем, что вдоль оси $0z$ (направленной вниз) распространяется плоская гармоническая волна, представленная компонентами $E_x(z, \omega)$, $H_y(z, \omega)$. Параметры сред ϵ_0 , μ_0 (воздух), где $\epsilon_0 = 10^{-9} / 36\pi$ (Ф/м), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м), электрическое поле $E(z, \omega)$ (В/м), магнитное $H(z, \omega)$ (А/м), и, $\epsilon_1 \mu_1$, σ_1 (земля), где σ_1 — удельная электропроводность (См).

Простейший способ решения этой задачи — решение уравнений Гельмгольца:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 E_x^0(z, \omega)}{\partial z^2} &= k_0^2 E_x^0(z, \omega); & z < 0, \\ \frac{\partial^2 E_x^1(z, \omega)}{\partial z^2} &= k_1^2 E_x^1(z, \omega); & z > 0, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где k_0 и k_1 — волновое число соответственно верхнего и нижнего полупространств.

При выполнении условий сопряжения для тангенциальных компонент электромагнитного поля на границе раздела земля—воздух при $z=0$:

$$\begin{aligned} E_x^0(0, \omega) &= E_x^1(0, \omega); \\ H_x^0(0, \omega) &= H_x^1(0, \omega). \end{aligned} \quad (1.1a)$$

При этом влияние среды на структуру электромагнитного поля описывается квадратом волнового числа k :

$$k^2 = -i\omega\sigma\mu = -\omega^2\mu\varepsilon\left(1 + i\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right). \quad (1.2)$$

Приняв во внимание, что магнитное поле \vec{H} может быть определено на основании второго уравнения Максвелла, т. е.

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{E} &= i\omega\mu\vec{H}, \\ H_y(z, \omega) &= -\frac{i}{\omega\mu} \frac{\partial E_x(z, \omega)}{\partial z}, \end{aligned} \quad (1.3)$$

и то обстоятельство, что в верхнем полупространстве $z < 0$ (воздухе) имеет место как падающая, так и отраженная волна, а в нижнем (земле) — только проходящая, решение уравнений (1.1) представим в виде

$$\begin{aligned} E_x^0(z, \omega) &= A_0 e^{-k_0 z} + B_0 e^{+k_0 z}, \\ E_x^1(z, \omega) &= A_1 e^{-k_1 z}, \end{aligned} \quad (1.4)$$

где A_0, B_0, A_1 — амплитуды падающей, отраженной и проходящей волн. В соответствии с уравнением (1.3) запишем

$$\begin{aligned} H_x^0(z, \omega) &= \left(\frac{ik_0}{\omega\mu_0}\right) (A_0 e^{-k_0 z} + B_0 e^{+k_0 z}); \quad z < 0, \\ H_x^1(z, \omega) &= \left(\frac{ik_1}{\omega\mu_1}\right) A_1 e^{-k_1 z}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

С учетом условий сопряжения (1.1а) при $z = 0$ получаем

$$\begin{aligned} A_0 + B_0 &= A_1; \\ \frac{k_0}{\mu_0} (A_0 + B_0) &= \frac{k_1}{\mu_1} A_1. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Полагая амплитуду падающей волны A_0 известной, находим

$$B_0 = \frac{\mu_1 k_0 - \mu_0 k_1}{\mu_1 k_0 + \mu_0 k_1} A_0 = D A_0; \quad (1.7)$$

$$A_1 = \frac{2\mu_1 k_0}{\mu_1 k_0 + \mu_0 k_1} A_0 = (1 + D) A_0, \quad (1.8)$$

где

$$D = \frac{\mu_1 k_0 - \mu_0 k_1}{\mu_1 k_0 + \mu_0 k_1} \text{ — коэффициент отражения.} \quad (1.9)$$

Таким образом, для прошедшей в нижнее проводящее полупространство волны при $z > 0$ можем записать

$$\begin{aligned} E_x(z, \omega) &= A_0 (1 + D) e^{-k_1 z}, \\ H_y(z, \omega) &= \frac{ik_1}{\omega\mu_1} (1 + D) A_0 e^{-k_1 z} = \frac{ik_0}{\omega\mu_0} A_0 (1 - D) e^{-k_1 z}. \end{aligned} \quad (1.10)$$

При этом учтено то обстоятельство, что

$$\frac{k_1}{\mu_1} (1 + D) = \frac{k_0}{\mu_0} (1 - D).$$

Следовательно, как отражение электромагнитных волн на границе раздела при $z = 0$, так и затухание их в среде при $z > 0$ зависит и от электромагнитных свойств нижнего полупространства $\varepsilon_1, \mu_1, \sigma_1$, и от частоты ω .

Первый шаг в исследовании этого круга явлений состоит в рассмотрении характеристик волнового числа k_1 . В соответствии с формулой (1.2), можем записать

$$k_1 = b_1 - ia_1 = \sqrt{-\omega^2 \mu_1 \tilde{\varepsilon}_1},$$

где $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_1 + \frac{i\sigma_1}{\omega}$ — комплексная диэлектрическая проницаемость нижнего полупространства.

Выпишем мнимую и вещественную части k_1 :

$$\begin{aligned} a_1 &= \omega \sqrt{\mu_1 \varepsilon_1} \sqrt{\frac{1}{2} (\sqrt{p_1^2 + 1} + 1)}; \\ b_1 &= \omega \sqrt{\mu_1 \varepsilon_1} \sqrt{\frac{1}{2} (\sqrt{p_1^2 + 1} - 1)}; \end{aligned} \quad (1.11)$$

где

$$p_1 = \sigma_1 / \omega \varepsilon_1,$$

и отношение электрической компоненты поля $E_x(z, \omega)$ на произвольной глубине $z = d$ к полю на поверхности при $z = 0$:

$$E_x(d, \omega) / E_x(0, \omega) = e^{-k_1 d} = e^{-b_1 d} e^{ia_1 d}. \quad (1.12)$$

Видно, что вещественная часть b_1 волнового числа k_1 определяет степень экспоненциального затухания комплексной амплитуды поля в зависимости от расстояния d , а мнимая часть a_1 — сдвиг по фазе. Затухание поля характеризуется расстоянием $d = 1/b_1$, на котором напряженность поля уменьшается в e раз (до 37% от его значения на поверхности). При этом фаза изменяется на один радиан. Расстояние d и называют толщиной (мощностью) скин-слоя или глубиной проникновения поля. Количественная характеристика данного явления и лежит в основе теории электромагнитных зондирований: на каждой частоте информация о разрезе поступает не из всего нижнего полупространства, а из некоторого пласта, ограниченного мощностью скин-слоя.

Свойства коэффициентов a_1, b_1 удобно рассмотреть в двух асимптотических областях спектра — низкочастотном и высокочастотном, где могут быть сделаны полезные упрощения с использованием критерия $p_1 = \sigma_1 / \omega \varepsilon_1$ относительно проводника ($p_1 \gg 1$) либо диэлектрика ($p_1 \ll 1$).

Низкочастотный диапазон задается неравенствами [13, 14]

$p_1 \gg 1$ (практически $p_1 \geq 5$, или $p_1^2 \geq 25$), (1.13)
что эквивалентно неравенству

$$\omega \leq 0,2\sigma_1 / \epsilon_1,$$

или

$$f \leq f_{\text{н}} = 3600(\sigma_1 / \epsilon_{\text{ср}}) \text{ МГц}, \quad (1.14)$$

где $f_{\text{н}}$ — верхняя граница низкочастотного диапазона, для которого можно положить

$$k_1 = \sqrt{-i\omega\mu_1\sigma_1}, \quad a_1 = b_1 \approx \left(\frac{\omega\mu_1\sigma_1}{2}\right)^{1/2}, \quad (1.15)$$

$$\omega = 2\pi f; \quad v = \frac{\omega}{a} = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu_1\sigma_1}}.$$

Здесь $\epsilon_{\text{ср}}$ — относительная вещественная проницаемость ($\epsilon_{\text{ср}} = \epsilon_0\epsilon$). В данном случае ϵ среды на поле практически не влияет.

Как уже упоминалось, большинство методов современной геоэлектрики ориентировано на использование именно этого частотного диапазона. Свойства электромагнитных полей естественного (МТ- и АМТ-методы) и контролируемого (дипольные источники, петля, линия конечной длины) в этом приближении относительно хорошо изучены и широко используются на практике. Разработаны вопросы глубинности и разрешающей способности электромагнитных методов в указанном частотном диапазоне. Эти исследования стали уже классическими [15]

Высокочастотный диапазон определяется неравенствами [13, 14]

$$p_1 \ll 1 \text{ (практически } p_1 \leq 0,2 \text{)}. \quad (1.16)$$

Это эквивалентно $\omega \geq 5\sigma_1 / \epsilon_1$, или $f \geq f_{\text{в}} = 9 \cdot 10^4 (\sigma_1 / \epsilon_{\text{ср}}) \text{ МГц}$, где $f_{\text{в}}$ представляет собой нижнюю границу высокочастотного диапазона. Токи смещения в таком случае преобладают. Для рассматриваемого диапазона можно записать

$$a_1 \approx \omega\sqrt{\mu_1\epsilon_1} = \frac{\omega}{3 \cdot 10^8} \sqrt{\epsilon_{\text{ср}}\mu_{\text{отн}}},$$

$$b_1 \approx \frac{\sigma_1}{2} \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}} = 60\pi\sigma_1 \sqrt{\frac{\mu_{\text{отн}}}{\epsilon_{\text{ср}}}}, \quad (1.17)$$

$$v_{\phi} = \frac{\omega}{\alpha_1} = \frac{1}{\sqrt{\mu_1\epsilon_1}}.$$

Здесь важно отметить, что при преобладании токов смещения коэффициент затухания b_1 не зависит от частоты ω , а фазовая постоянная α_2 — от проводимости σ_1 , линейно изменяясь с частотой. Мощность скин-слоя d в этом приближении определяется формулой

$$d = \frac{1}{b_1} = \frac{2}{\sigma_1} \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} = \frac{1}{60\pi\sigma_1} \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{ср}}}{\mu_{\text{отн}}}}. \quad (1.18)$$

Напомним, что величину затухания волны Γ определяют как натуральный логарифм или 20 десятичных логарифмов отношения $E_x(0, \omega) / E_x(z, \omega)$: в первом случае Γ измеряется в неперх [Нп], во втором — в децибелах [дБ]:

$$\Gamma = b_1 z \text{ [Нп]},$$

$$\Gamma = 20 \lg e^{-b_1 z} \approx 8,69 b_1 z \text{ [дБ]}.$$

Затухание поля в e раз соответствует ослаблению в 1 Нп (8,69 дБ).

В качестве простого примера рассмотрим влажную почву с параметрами $\sigma_1 = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ См/м}$; $\epsilon_{\text{ср}} = 15$. Легко установить, что в этом случае, согласно формулам (1.14), (1.16), верхняя граница низкочастотного «окна»

$$f_{\text{н}} = 3600 (\sigma_1 / \epsilon_{\text{ср}}) \approx 2,88 \text{ МГц},$$

а нижняя граница высокочастотного «окна»

$$f_{\text{в}} = 9 \cdot 10^4 (\sigma_1 / \epsilon_{\text{ср}}) \approx 72 \text{ МГц}.$$

Заметим, что в низкочастотном «окне» ($\omega \epsilon_1 / \sigma_1 < 0,2$) амплитуда и фаза поля определяются только электропроводностью σ_1 и магнитной проницаемостью μ_1 среды. С повышением частоты величины α_1 и b_1 (1.11), а следовательно, фаза и амплитуда поля все более заметно зависят от диэлектрической проницаемости среды ϵ_1 . Однако степень влияния σ_1 и ϵ_1 на амплитуду и фазу существенно различны: значение фазы определяется фазовым коэффициентом α_1 , который, согласно (1.17), на достаточно высокой частоте ω обуславливается только диэлектрической проницаемостью среды. В результате фаза электромагнитного поля также перестает зависеть от проводимости среды. Таким образом, в принципе, с помощью соответствующего повышения частоты можно исключить влияние проводимости на фазу поля.

В отличие от фазы, амплитуда поля испытывает влияние проводимости даже на предельно высоких частотах. Очевидно, поскольку значение коэффициента поглощения b_1 при $\omega \epsilon_1 / \sigma_1 \geq 1,1$ не зависит от частоты и определяется только величинами σ_1 , μ_1 и ϵ_1 , избавиться от влияния проводимости на амплитуду поля с помощью повышения частоты не представляется возможным.

В заключение отметим, что, как вытекает из формул (1.10), в однородной среде электрическое и магнитное поля убывают с глубиной по одному и тому же экспоненциальному закону и тем быстрее, чем выше частота ω . Сохранится ли такая простая зависимость в случае слоистой структуры? Как показывают выполненные расчеты [4], нет. В слоистых средах закономерности скин-эффекта существенно изменяются, а само понятие «глубина проникновения» становится противоречивым: магнитное и электрическое поля $E_x(z, \omega)$ и $H_y(z, \omega)$ затухают в e раз на различных глубинах. Противоречиво и понятие «длина вол-

ны», так как фазы $E_x(z, \omega)$ и $H_z(z, \omega)$ меняются на 2π на различных расстояниях.

Самый простой способ сохранения этих удобных понятий – заменить на каждой частоте ω слоистую среду эквивалентной однородной с тем же входным импедансом Z . В итоге можно определить кажущуюся глубину проникновения d_k и кажущуюся длину волны λ_k (квазистационарное приближение) [4]:

$$d_k = \frac{\sqrt{2}}{\omega\mu_0} |Z|, \quad \lambda_k = \frac{2\mu\sqrt{2}}{\omega\mu_0} |Z|,$$

где Z – входной импеданс структуры на заданной частоте ω .

1.2. Электрический дипольный источник в однородной безграничной среде с произвольными потерями. Электрический дипольный источник реализуется прямолинейным отрезком провода, на который подается переменный ток:

$$I(\omega) = I_0 e^{-i\omega t}.$$

Длина этого отрезка достаточно мала по сравнению с длиной электромагнитной волны в среде с параметрами ϵ , μ , σ , так что ток можно считать постоянным по всей длине l отрезка провода.

Решение задачи достаточно элементарно и хорошо известно в теории электромагнитных зондирований [15]. В сферической системе координат r , θ , φ такая элементарная антенная система создает в однородной вмещающей среде под углом φ к элементу провода на расстоянии r электромагнитное поле, определяющееся поперечной H_φ и продольной E_r составляющими электрического поля и поперечной составляющей магнитного поля H_θ (в плоскости, перпендикулярной к элементу провода длины l), которые описываются формулами

$$\begin{aligned} E_\theta(\omega) &= -\frac{I(\omega)l \sin\theta}{4\pi\omega\tilde{\epsilon}} \frac{\sin\theta}{r^3} (1+kr+k^2r^2) e^{-kr}, \\ E_r(\omega) &= -\frac{I(\omega)l \cos\theta}{4\pi\omega\tilde{\epsilon}} \frac{\cos\theta}{r^3} (1+kr) e^{-kr}, \\ H_\varphi(\omega) &= -\frac{I(\omega)l \sin\theta}{4\pi} \frac{\sin\theta}{r^2} (1+kr) e^{-kr}, \end{aligned} \quad (1.19)$$

где $\tilde{\epsilon} = \epsilon + i\sigma/\omega$ – комплексная диэлектрическая проницаемость среды.

Определим зависимость компонент поля от частоты при распространении сферической волны в среде с параметрами ϵ , μ , σ . Поскольку нас интересует влияние рассматриваемой среды на поведение поля и не столь важны его абсолютные значения, следуя [10], целесообразно упростить выражения (1.19), выразив компоненты поля $E_\theta(\omega)$, $E_r(\omega)$ и $H_\varphi(\omega)$ в относительных единицах – долях стационарного поля электрического дипольного источника в данной среде E_θ^0 , E_r^0 и H_φ^0 при

$I(\omega) = I_0 = \text{const}$. Взяв для краткости изложения только компоненту $E_\theta(\omega)$, запишем

$$K_\theta(\omega) = -\frac{E_\theta(\omega)}{\frac{I_0 l \sin\theta}{2\pi\omega} \frac{\sin\theta}{r^3}} = \frac{1}{1 + \frac{i\omega\epsilon}{\sigma}} (1+kr+k^2r^2) e^{-kr}, \quad (1.20)$$

где $k = b - ia$, и проанализируем зависимость величины $k_0(\omega)$ от частоты в общем случае, не ограничиваясь асимптотическими приближениями. С этой целью представим волновое число $k_1 = \sqrt{-\omega^2\mu\tilde{\epsilon}}$ в следующем виде ($\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м)):

$$k = \frac{1}{L_x} 2\sqrt{i\nu(1+i\nu)},$$

где

$$L_x = \frac{2}{\sigma} \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_{cr}}{\mu_0}}, \quad \nu = \frac{\omega \epsilon_0 \epsilon_{cr}}{\sigma}. \quad (1.21)$$

Здесь величина L_x имеет размерность длины и может быть названа характеристической длиной среды; параметр ν равен отношению тока смещения к току проводимости.

Согласно (1.18), в случае $P_1 = \sigma/\omega\epsilon_1 \ll 1$ (высокочастотное приближение) величина L_x совпадает с мощностью скин-слоя $d = 1/b_1$. Как следует из равенств (1.20), (1.21), отношение $K_\theta(\omega)$ определяется параметрами $\frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_{cr}}}$ и $\frac{\omega \epsilon_0 \epsilon_{cr}}{\sigma}$.

Если считать ϵ , μ_0 и σ фиксированными, то изменение параметра $\nu = \omega \epsilon_0 \epsilon_{cr} / \sigma$ будет соответствовать изменению частоты поля, а изменение величины $\frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_{cr}}} r$ – будет иллюстрировать влияние частоты на разных удалениях r от электрического диполя.

Модуль выражения (1.20) для различных значений отношения разности r к характеристической длине L_x позволил Р. Габийяру, Г. Декоку и Дж.Р. Уэйту [10, 11] выделить низко- и высокочастотные режимы или «окна», соответствующие значениям $|K_\theta(\nu)| \geq 1$, показанные на рис. 1 для разных значений величины

$$\frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_{cr}}} r \quad (\text{шифр кривых})$$

Легко видеть, что в низкочастотном «окне» $\nu = \omega \epsilon_0 \epsilon_{cr} / \sigma < 1$, а в высокочастотном – $\nu > 1$. Согласно рис. 1, модуль $K_\theta(\nu)$ быстро уменьшается с ростом частоты вследствие интенсивного поглощения поля, тем более интенсивное, чем больше расстояние r от дипольного источника. Минимальные значения поля наблюдаются при отношениях $\omega \epsilon_0 \epsilon_{cr} / \sigma$, близких к единице. При дальнейшем увеличении частоты происходит линейное возрастание модуля $K_\theta(\nu)$. Такой характер пове-

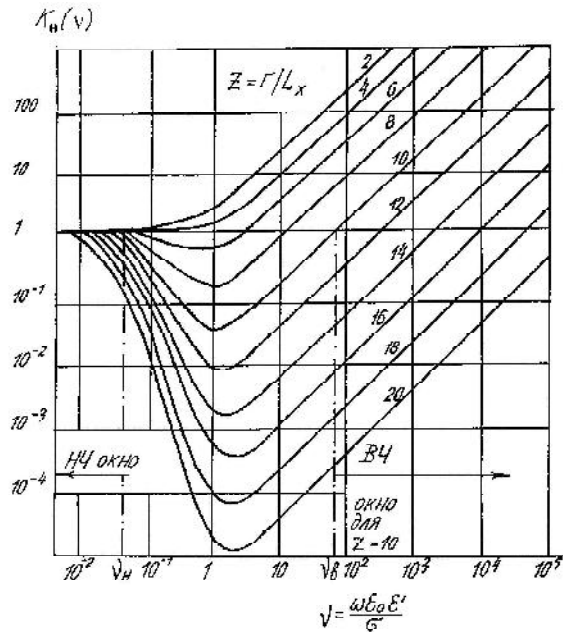


Рис. 1. Низко- и высокочастотные режимы дипольного излучателя в однородной безграничной среде с параметрами σ , ϵ_1 , μ_1 (по Р. Габийру, Г. Декоку и Дж.Р. Уэйту [10])

дения модуля отношения $K_0(v)$ вполне объясним: вначале с ростом частоты ω быстро увеличивается коэффициент поглощения b_1 (1.11) и, соответственно, в формуле (1.20) доминирует экспоненциальный множитель e^{-br} . Примерно со значений $\omega\epsilon_0\epsilon_{cr}/\sigma=1$ увеличение коэффициента b с частотой прекращается, и дальнейшее возрастание частоты не изменяет его значения, но ведет к линейному повышению коэффициента a , так как в этом частотном диапазоне, согласно (1.17), $a \approx \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0\epsilon_{cr}}$. В итоге линейно растут значение ar и, соответственно, модуль отношения $K_0(v)$.

Следуя [10], оценим положение верхней границы низкочастотного «окна» f_n . Согласно (1.11), для низкочастотного диапазона можно записать

$$d=1/b \approx \left(\frac{2}{\omega\mu_0\sigma} \right)^{1/2}.$$

Численный анализ функции $|K_0(r/d)|$ в данном приближении показывает, что ее значение увеличивается от 1 (при $r/d=0$) до 1,45, а затем уменьшается до 0,707 при $r/d=3,85$. С учетом этого обстоятельства можно записать

$$\frac{r}{d} = \frac{r}{\left(\frac{2}{\mu_0\sigma 2\pi f_n} \right)^{1/2}} = 3,85,$$

откуда

$$f_n \approx \frac{3,76 \cdot 10^6}{r^2 \sigma}, \quad (1.22)$$

т. е. значение верхней границы низкочастотного «окна», на которой амплитуда электрического поля

$E_0(\omega)$ меньше своего значения на нулевой частоте на 3 дБ.

Возможно, используемый авторами [10] термин «низкочастотное окно», вообще говоря, не очень удачен, однако он просто означает, что в излучениях электрического дипольного источника в ближней зоне ($kr \ll 1$) не учитывается коэффициент потерь e^{-br} . Неожиданный результат здесь состоит в том, что на частоте f_n глубина проникновения d (т. е. расстояние, на котором амплитуда поля уменьшается в e раз), оказывается в данном случае в 3,85 раза больше глубины проникновения для плоской электромагнитной волны.

Характерно, что на низких частотах $f < f_n$, как это видно на рис. 1, амплитуда электрического поля слабо зависит от проводимости среды σ , которая изменяет лишь ширину низкочастотного «окна».

Разумеется, теоретическое обнаружение «окон прозрачности» в идеализированной безграничной среде с параметрами σ , μ , ϵ не гарантирует их автоматической реализуемости в исследуемой геологической среде. Однако данное обстоятельство позволяет надеяться на то, что в реальных средах могут существовать «частотные окна», т. е. такие (ω, r) -режимы, при которых поглощение электромагнитного поля заметно ослаблено. Несомненно, решение вопроса их существования и обнаружения лежит в плоскости экспериментальных исследований [11].

Как уже отмечалось, разнообразие масштабов неоднородностей геологической среды, ее гетерогенность и электрическая активность являются возможной причиной частотной дисперсии электромагнитных параметров ϵ и σ . По этой причине при определении границ высокочастотного и низкочастотного режимов в общем случае необходимо учитывать их зависимость от частоты, в связи с тем что изменяется как характеристическая длина среды L_x , так и параметр $v = \omega\epsilon_0\epsilon_{cr}/\sigma$. В частности, может реализовываться так называемое высокочастотное «окно», нижняя граница которого перемещается в более высокочастотную область при уменьшении расстояния r [16].

Можно предположить, что в случае частотной дисперсии параметров среды ϵ и σ вероятность появления «высокочастотного окна» может заметно возрасти. Значение и смысл данного обстоятельства очевидны и не требуют комментариев.

2. Георадарное зондирование

Георадарное зондирование (называемое также радиолокационным зондированием или радиолокационным методом подповерхностного зондирования) основано на посылке в землю коротких (от 1 нс до 1 мкс) радио- или видеоимпульсов и изучении отраженных от протяженных границ раздела сред с разными электромагнитными ха-

раактеристиками, а также локальных объектов естественного или техногенного происхождения. Физической основой георадарных зондирующих систем служит теория распространения электромагнитных импульсов (радио-, видеоимпульсов или монохроматических волн) в средах с поглощением [15,16].

Обычно радиолокаторы для зондирования земли работают в диапазоне 10 МГц – 3 ГГц, т.е. преимущественно в диапазоне высокочастотного «окна». Основанием для выбора такого диапазона служат компромиссные соображения: по мере возрастания частоты, с одной стороны, отмечаются рост затухания электромагнитных волн в поглощающей среде и уменьшение диапазона зондирования по глубине, а с другой – увеличиваются разрешающая способность и точность измерений.

Как свидетельствует эксперимент, сегодня георадары обеспечивают зондирование разреза до глубины 10–50 м с выявлением основных характеристик зондируемой среды, которые вызваны локальными изменениями геоэлектрических параметров: диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостей и электропроводности σ . Другие методы дистанционных геофизических исследований в пределах указанного диапазона глубин в силу некоторых физических и технических ограничений уступают георадарам,

Результаты зондирований с помощью георадаров имеют большое сходство с данными, получаемыми при сейсмической разведке методом отраженных волн. В основе этого сходства результатов сейсмического и радиолокационного зондирований лежит кинематическая аналогия процессов распространения сейсмических волн в твердом теле и электромагнитных волн в материальной среде с небольшим поглощением (высокоомные разрезы). Отмеченная кинематическая аналогия позволяет частично использовать известные методы обработки сигналов в сейсмическом методе разведки применительно к данным наблюдений радиолокационного подповерхностного зондирования. Однако есть и существенные различия. В частности, в средах с потерями зависимость затухания электромагнитного импульса от частоты в георадарных системах имеет существенно большее значение, чем в сейсмических. Ввиду актуальности вопроса остановимся на нем более подробно [17].

Как известно, распространение электромагнитных возмущений в однородной изотропной среде с параметрами ϵ , μ , σ , не зависящими от частоты, в одномерном приближении описывается уравнением в частных производных гиперболического типа (волновым уравнением с затуханием):

$$\frac{\partial^2 U(x,t)}{\partial t^2} + \frac{\sigma}{\epsilon} \frac{\partial U(x,t)}{\partial t} - \frac{1}{\epsilon\mu} \frac{\partial^2 U(x,t)}{\partial x^2} = 0, \quad (2.1)$$

где $U(x, t)$ – любая из компонент электромагнитного поля.

Отличительное свойство гиперболических уравнений – существование особых поверхностей в пространстве–времени (x, t) , которые в физических приложениях проявляют себя как распространяющиеся с конечной скоростью (в данном случае $v = 1/\sqrt{\epsilon\mu}$ – скорость распространения фронта импульса) волны.

Путем подстановки $U(x,t) = y(x,t)e^{-\frac{\sigma}{2\epsilon}t}$ уравнение (2.1) приводится к виду

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + \left(\frac{\sigma}{2\epsilon}\right)^2 y(x,t) - \frac{1}{\epsilon\mu} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = 0, \quad (2.2)$$

из которого сразу же следует действительное дисперсионное соотношение

$$\omega^2 = \frac{1}{\epsilon\mu} k^2 - \left(\frac{\sigma}{2\epsilon}\right)^2, \quad (2.3)$$

связывающее круговую частоту ω (число колебаний во временном интервале 2π) и действительное волновое число k (число колебаний на пространственном расстоянии 2π).

Дисперсионное соотношение (2.3) указывает на характерные особенности. Так, если

$$\frac{k}{\sqrt{\epsilon\mu}} \gg \frac{\sigma}{2\epsilon}, \quad (2.4)$$

то диссипативные эффекты проявляются слабо и свойства распространяющейся волны, по сути, идентичны соответствующие не диссипативной системе

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} - \frac{1}{\epsilon\mu} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = 0, \quad (2.5)$$

за исключением экспоненциального затухания (фактора) $\exp\left(-\frac{\sigma}{\epsilon}t\right)$ для переменной $U(x, t)$ и множителя $\exp\left(-\frac{\sigma}{\epsilon}t\right)$ для энергии.

Положив, что в геологической среде $\sqrt{\mu_0\epsilon} \approx 2 \cdot 10^2$, запишем условие (2.4) в виде

$$k \gg 10^2 \epsilon. \quad (2.6)$$

Если же

$$\frac{k}{\sqrt{\epsilon\mu}} < \frac{\sigma}{2\epsilon} \quad \text{или} \quad k < \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}, \quad (2.7)$$

то решение не осциллирует во времени и бегущие периодические волны вида $y(x,t) = Ae^{i(kx - \omega t)}$ не распространяются.

2.1. Технические средства георадарных исследований. Радиолокатор, предназначенный для подповерхностных исследований, в общем случае состоит из следующих основных устройств: источника энергии, приемно-передающей антенной системы, блока управления и устройства для обработки сигнала (компьютера с соответствующим программным обеспечением).

Блок управления формирует управляющие временные последовательности для согласования во времени работы всех компонент георадара. Передатчик георадара формирует и излучает в исследуемую среду через соответствующую антенну зондирующие импульсы (радиоимпульсы длительностью τ с несущей частотой f_n либо видеоимпульсы длительностью τ , когда несущая частота отсутствует). Эти импульсы распространяются в исследуемой среде, и при достижении аномального объекта либо границы раздела сред с различными параметрами ϵ , μ , σ формируется отраженный сигнал. Часть его энергии достигает антенны приемника, и он регистрируется последним. Данные с приемника через блок управления поступают в вычислительное устройство (компьютер).

Как известно, короткий импульс может излучаться только электрически короткой антенной, так как увеличение ее длины приводит к временному растяжению сигналов в ней [18]. В качестве таких обычно используются укороченные рупорные антенны или полуволновые вибраторы, настроенные на центральную рабочую частоту f_0 (в частности, используемый в георадарах частотный диапазон эффективно перекрывается набором сменных микроволновых блоков, настроенных на рабочие частоты f_0 , равные 50, 100, 250, 500 и 900 МГц) [18].

Компьютер в составе геолокатора выполняет основные функции: формирование команд управления режимами работы георадара; запись данных на магнитный носитель (диск); обработку данных и их визуализацию на дисплее.

Как известно [15], в радиоимпульсе длительностью τ с несущей частотой f_n большая часть энергии сосредоточена и переносится радиоволнами в достаточно узком диапазоне частот: $f_n \pm \Delta f$, где $\Delta f = 1/\tau \ll f_n$.

В высокочастотном видеоимпульсе длительностью 1 нс – 1 мкс набор слагаемых его гармонических колебаний очень высок – от очень низких до очень высоких. Следовательно, если отвлекаться от значительных технических сложностей формирования, излучения, приема и регистрации видеоимпульсов по сравнению с радиоимпульсами, то видеоимпульсы обладают заметным преимуществом – меньшим затуханием, так как их энергия переносится с помощью гармонических компонент более низкого спектра, включая и

диапазон низкочастотного «окна». В то же время благодаря более узкому частотному спектру радиоимпульсы при распространении подвержены более слабому искажению их формы в силу частотной дисперсии по сравнению с видеоимпульсными сигналами с очень широким спектральным составом.

Несущие частоты в радиоимпульсных геолокаторах обычно изменяются от 30 до 3000 МГц (длина волны в воздухе 10 – 0,3 м) с длительностями соответственно от 10 мкс до 10 нс. В видеоимпульсных геолокаторах длительность импульса меняется в пределах 1–10 нс. При этом их мощность изменяется от единиц до сотен ватт.

2.2. Скорость распространения импульса и визуализации данных радиолокационного зондирования. В основе метода лежит главный принцип радиолокации, заключающийся в том, что расстояние до отражающего объекта определяется по времени запаздывания отраженного сигнала относительно момента излучения зондирующего. Интенсивность отраженного сигнала зависит от степени поглощения радиоволн в исследуемом разрезе и коэффициента отражения на контакте сред. Для описания явления используются законы геометрической оптики. В частности, глубина залегания отражающей границы раздела сред определяется с помощью равенств

$$h = \sqrt{(vt)^2 - d^2} / 2 \text{ или } h = \frac{vt}{2} \text{ (при } d=0), \quad (2.8)$$

где v – скорость распространения сигналов в покрывающем слое; t – время прихода сигнала после окончания зондирующего импульса; d – расстояние между передающей и приемной антеннами.

Из формул (2.8) видно, что для обнаружения отраженного сигнала после окончания зондирующего импульса минимальное время прихода отраженного сигнала t_{\min} должно превышать длительность посылаемого в среду импульса τ . Иначе говоря, амплитуда излученного импульса должна спадать до нуля раньше прихода энергии, рассеиваемой объектами исследований в направлении приемной антенны. Отсюда очевидны преимущества работ с приподнятыми антеннами, включая аэрокосмические радиолокационные съемки, когда так называемая мертвая зона $h = \tau v/2$ входит в высоту подъема станции над земной поверхностью.

Таким образом, короткие по длительности зондирующие импульсы необходимы как для реализации минимальной «мертвой зоны», так и для максимальной разрешающей способности радиолокационной установки подповерхностного зондирования.

Как вытекает из формул (2.8), для определения глубин отражающих горизонтов, т. е. перевода временных разрезов в глубинные, в методе ра-

диолокационного зондирования необходимо располагать значениями скорости распространения электромагнитных возмущений (модулированных волн или видеоимпульсов) в исследуемой геоэлектрической структуре. Согласно [15,16], они определяются: посредством дистанционного зондирования (аналогично методу общей глубинной точки в сейсморазведке); с помощью параметрических наблюдений на скважинах или сейсмических профилях; путем расчетов по известным значениям электромагнитных параметров среды.

Первые два способа наиболее надежны, хотя и требуют для своей реализации дополнительных экспериментальных наблюдений. Теоретическая оценка скоростных параметров значительно сложнее.

Как известно, распределение электрического тока в проводящей среде с параметрами ϵ , μ , σ обусловлено как волновым характером распространения электромагнитной энергии, так и диффузией электромагнитного поля. При пренебрежении действительной частью комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon(\omega) = \epsilon + i\sigma/\omega$ (квазистационарное приближение) остается лишь диффузионное распространение и электромагнитные волны полностью исключаются из основной системы уравнений (уравнений Максвелла). Отсюда следуют трудности в определении параметров распространения электромагнитных возмущений: имеются в виду два наложенных друг на друга процесса — диффузионный и волновой. Очевидно, упрощение проблемы может быть достигнуто при существенном преобладании одного из них.

Рассмотрению вопросов распространения волновых пакетов (модулированных волн) и видеоимпульсов посвящено большое количество работ (см. [19] и цитируемую там литературу). Напомним, что волновой пакет — это квазимонохроматический сигнал с узким частотным спектром. Выделив некоторую среднюю частоту ω , можно записать высокочастотный импульс в виде

$$U_0(t) = A_0(t)e^{-i\omega t},$$

где $A_0(t)$ — комплексная, медленно изменяющаяся функция: $|\partial A_0(t)/\partial t| \ll \omega_0 |A_0|$.

Решение задачи распространения такого импульса в материальной среде содержится в классических работах Зоммерфельда и Бриллюэна, относящихся еще к 1914 г., а затем развито и конкретизировано в [19]. Исследования в первую очередь касались волнового пакета — цуга колебаний, начинающихся в определенный момент времени t . На основании этих работ можно сделать следующие выводы:

- передний фронт импульса (возможно, нулевой амплитуды) в материальной среде с параметрами ϵ , μ , σ всегда распространяется со скоростью

$c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$, равной скорости света в вакууме; это почти очевидно из физических соображений: при $\omega \rightarrow \infty$, т. е. при достаточно быстром изменении поля во времени, процессы поляризации вещества, определяющие отличие электрической индукции D от $\epsilon_0 E$, где E — напряженность электрического поля, просто не успевают произойти;

- до момента времени $t < r/c$, где r — расстояние до точки наблюдения, сигнала нет, даже если его фазовая скорость

$$v_\phi = \omega/k = c/\text{Re}\sqrt{\epsilon\mu} \quad (2.9)$$

больше $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$;

- при $t = r/c$ приходит первый предвестник, однако его амплитуда незначительна; в итоге при распространении электромагнитной волны с фазовой скоростью v_ϕ , определяемой диэлектрической и магнитной проницаемостями среды, ее фронту предшествует предвестник, распространяющийся со скоростью электромагнитных волн в вакууме;
- прибытие основной, или главной, части возмущения характеризуется ростом амплитуды, причем эта часть распространяется с некоторой скоростью v_c (скоростью сигнала), однако простое выражение для нее не может быть получено и определение скорости сигнала во многом произвольно, что связано со способом ее вычисления, хотя физический смысл очевиден — это та часть возмущения, прибытие которой может зарегистрировать прибор, по мере увеличения чувствительности которого скорость, полученная из измерений, будет приближаться к $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ [19].

Актуальная задача — учет явлений, происходящих в диспергирующих средах, электромагнитные параметры которых зависят от частоты. Для сред с дисперсией понятие скорости распространения электромагнитных возмущений становится более сложным и требует дополнительных определений. В таком случае оказывается необходимым вводить понятия фазовой скорости v_ϕ (2.9), скорости сигнала v_c , скорости фронта $v = 1/\sqrt{\epsilon\mu}$, групповой скорости

$$v_{гп} = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(kv_\phi)}{dk} = v_\phi + k \frac{dv_\phi}{dk}. \quad (2.10)$$

Здесь, как и в выражении (2.9), k — волновое число, и скорость распространения энергии $v_s = \frac{\mathbf{F}}{W}$, где \mathbf{F} — вектор Пойнтинга, определяющий поток энергии поля; W — объемная плотность энергии.

Заметим, что при малых потерях электромагнитной энергии в среде W и \mathbf{F} вычисляются по макроскопическим характеристикам среды $\epsilon(\omega)$ и $\mu(\omega)$ без принципиальных затруднений. Ситуация

существенно усложняется при наличии потерь, тогда трудно отличить энергию, еще сохраняющую свою электромагнитную природу, от энергии, поглощенной средой.

Согласно (2.10), групповая скорость $v_{гр}$ отличается от фазовой только в диспергирующей среде. Для сред с нормальной дисперсией $v_{гр} < v_{ф}$. В области аномальной дисперсии, сопровождаемой сильным поглощением, формально реализуется случай, когда $v_{гр} > v = 1/\sqrt{\epsilon\mu}$.

Может создаться впечатление, что частотная дисперсия отчетливо проявляется только в реальных гетерогенных многофазных средах. Однако даже в случае однородной изотропной среды «без дисперсии», параметры которой вещественны и не зависят от частоты, ее комплексная диэлектрическая проницаемость $\epsilon(\omega) = \epsilon + i\sigma/\omega$ обладает очевидной частотной дисперсией. В такой проводящей «среде без дисперсии» групповая скорость $v_{гр}$ (если она существует) превышает фазовую $v_{ф}$, так как в этом случае производная $\partial v_{ф}/\partial\omega$ — величина положительная.

С точки зрения физики групповая скорость — более важное понятие, так как $v_{ф}$ — скорость внутреннего движения импульса, фронт которого движется со скоростью v . Это же замечание касается скорости распространения максимума видеоимпульсного возмущения в среде с поглощением. Иначе говоря, определяемая таким образом скорость также является скоростью его внутреннего движения, причем более или менее (в зависимости от величины поглощения) кратковременная.

Очевидно, что групповая скорость $v_{гр}$ имеет физический смысл, когда она является действительной величиной, т. е. когда среда обладает малым поглощением. Наличие диссипации приводит к быстрому пространственному расплыванию (деформации) пакета со временем. В этом случае спектр частот $\omega(\mathbf{k})$, вектор \mathbf{k} , а следовательно, и групповая скорость $v_{гр} = \partial\omega/\partial\mathbf{k}$ становятся комплексными и теряют смысл.

По аналогии со случаем непоглощающей среды можно попытаться определить групповую скорость $v_{гр}$ в поглощающей среде, как это предлагается в некоторых работах, согласно формуле

$$v_{гр} = \frac{\partial\omega}{d(\text{Re}\mathbf{k})}. \quad (2.11)$$

Однако хотя равенство (2.11) и переходит в соответствующую формулу при отсутствии поглощения, данному условию удовлетворяет также выражение

$$v_{гр} = \text{Re} \frac{d\omega}{d\mathbf{k}}.$$

К сожалению, подобные определения групповой скорости распространения электромагнитных возмущений, содержащиеся в работах по электро-

динамике и геоэлектрике, не только не обоснованы, но и явно ограничены и ошибочны: их значения могут превосходить скорость распространения света c в вакууме. Аналогичные соображения касаются и вопроса определения энергетической скорости v_s . При произвольной дисперсии электромагнитных параметров среды вопрос об энергетических соотношениях в макроскопической электродинамике не так то прост: в данной ситуации оказывается невозможным какое-либо разумное определение электромагнитной энергии как термодинамической величины. В этом случае, как уже отмечалось, для вычисления плотности энергии W недостаточно знать макроскопические характеристики среды, например, комплексные проницаемости: $\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) - i\epsilon''(\omega)$, $\mu(\omega) = \mu'(\omega) - i\mu''(\omega)$. Последнее утверждение с физической точки зрения почти очевидно: в частности, проницаемость $\epsilon(\omega)$ определяет линейный «отклик» среды — индукцию \mathbf{D} , возникающую под влиянием поля \mathbf{E} . И в целом нет оснований ожидать, чтобы для произвольной поглощающей среды с комплексной проницаемостью $\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) - i\epsilon''(\omega)$ этот «отклик» однозначно обуславливал бы также квадратичную по полю величину — плотность энергии [19]. Так, встречающиеся в литературе попытки определения средней плотности энергии в поглощающей среде,

согласно равенству $W_E = \frac{d(\omega\epsilon'(\omega))}{d\omega} \frac{|E|^2}{2}$, безоснова-

тельны. Более того, плотность W_E и потери $Q = \sigma E^2$ в общем случае вообще не выражаются через проницаемость $\epsilon(\omega)$ [20].

Следовательно, электродинамические аспекты определения скоростных характеристик электромагнитных импульсных возмущений, важных с точки зрения приложений в георадарных исследованиях, все еще остаются недостаточно ясными и нуждаются в более подробном и конкретном рассмотрении, а многие рекомендации, относящиеся к данному вопросу, проблематичны, ограничены и требуют пересмотра [17].

3. О резонансном взаимодействии радиоизлучения с восходящими электронно-ионными потоками в геосреде

Как вытекает из изложенного выше, классические представления о взаимодействии электромагнитного излучения в диапазоне «высокочастотного» окна Габийяра с геологической средой указывают на существенные ограничения, налагаемые потерями на глубинность электромагнитных зондирующих систем. В частности, классическая теория распространения электромагнитных возмущений этого частотного диапазона, как видно из формул (1.11), (1.12), не допускает возможности регистрации отражений от глубокозалегающих объектов из-за интенсивного поглощения

энергии осадочными породами. Однако экспериментально установлен феномен взаимодействия радиоволнового излучения относительно высоких частот (более 1 МГц) с глубокозалегающими залежами УВ [12, 21–25].

Очевидно, становится критически важным вопрос физической трактовки доставки электромагнитного отклика от глубокозалегающей залежи к земной поверхности. В некоторых случаях глубина ее залегания превышает характеристическую длину (глубину проникновения) – в десятки, а то и сотни раз [21–25].

С целью непротиворечивого объяснения наличия аномалий электромагнитных полей отмеченного частотного диапазона над глубокозалегающими залежами УВ были предложены гипотезы постседиментационного изменения пород, перекрывающих залежь, под влиянием УВ, просачивающихся из них, наличия ореолов рассеивания УВ над залежами и др. Однако хотя просачивание, очевидно, имеет место, надежность обнаружения залежей (как правило, базирующаяся на изучении распределения по разрезу удельного кажущегося электрического сопротивления, особенности аномального распределения которого одинаково присущи как вмещающей геологической среде, так и залежам УВ), оставалась весьма низкой. Более того, экспериментально обнаружено отсутствие «столбов» измененных над залежами пород повышенного или пониженного сопротивления [26].

Бесспорно, что интерпретация данных наблюдений на основе классической теории просачивания вихревых токов не всегда согласуется с геологическими данными [21, 26], а природа выявленных аномалий остается дискуссионной. Для повышения эффективности поисковых работ была предложена модель тонкого продуктивного поляризованного пласта высокого сопротивления в относительно проводящем разрезе [26]. Эта модель взаимодействия электромагнитного поля с вмещающей средой, содержащей поляризующуюся залежь УВ, основанная на теории цепей, показала относительную эффективность в геологических условиях Западной Сибири [26]. Однако в общем случае она не решает некоторых вопросов взаимодействия электромагнитных волн с глубокозалегающими залежами УВ, в частности нет объяснения «мерцающему» характеру аномалий над ними, проявляющихся только на некоторых частотах [22, 25].

3.1. Электронно-ионные потоки в геосреде и базовая модель геоэлектрики. О существовании свободных носителей заряда над залежами УВ и их перемещении к границе раздела земля–воздух известно относительно давно. Однако наиболее полная схема этого процесса – его электрохимическая модель (модель «топливного элемента»), предло-

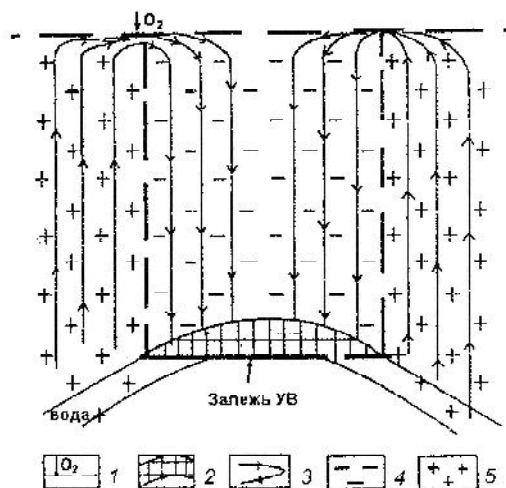


Рис. 2. Схема «топливного элемента» Пирсона (Pirson, 1971): 1 – линия насыщения кислородом (поверхность верхнего водоносного горизонта); 2 – залежь углеводородов (УВ); 3 – токовые линии (стрелкой обозначено направление тока); 4 – область избытка электронов (восстановительная обстановка); 5 – область дефицита электронов (окислительная обстановка)

жена С. Пирсоном [27, 28]. Согласно этой модели, над нефтегазовой залежью создается восстановительная обстановка с избытком электронов, а вокруг нее и под ней – окислительная с дефицитом электронов, в результате чего возникает разность потенциалов и в цепи появляется электрический ток (плотностью до 100 мА на акр, что примерно соответствует 24,7 А/км² (рис. 2).

Ввиду того что исходным фактором образования «топливного элемента» является окисление углеводородной залежи кислородом атмосферы, возникает система залежь углеводородов – атмосфера, электрическое взаимодействие между которыми происходит по вертикали и система приобретает своеобразную «столбообразную» форму. Очевидно, верхней ее границей служит поверхность насыщения кислородом (кровля верхнего водоносного горизонта), а нижней – подошва залежи. При этом анод располагается в подошве, катод – в кровле залежи.

Заметим, что модель электрохимической системы атмосфера–залежь углеводородов, вообще говоря, представляет собой частный случай универсальной системы атмосфера–экранированный окисляющийся объект в литосфере, генерирующий в ней потоки ионов и электронов. По нашему мнению, эта концепция может быть использована в качестве исходной при построении теории взаимодействия электромагнитных волн с глубокозалегающими объектами такого типа.

В данном контексте следует также упомянуть о существовании субвертикальных газовых и водно-газовых систем, приуроченных к зонам повышенной проницаемости горных пород и содержащих надфоновые концентрации радиоактивных

элементов. В частности, экспериментально установлен выскококцентрированный локальный вынос ионизатора над геодинамически активными зонами тектонических нарушений, корни которых уходят в кристаллический фундамент [29]. Повышенные восходящие потоки водорода и радон-торонового компонента характерны и для нефтегазовых структур, осложненных разрывной тектоникой [22].

Суммируя приведенные аргументы, можно наметить следующую конструкцию фундаментальной (базовой) модели геоэлектрики для описания процесса взаимодействия излучения радиоволнового диапазона с реальной геологической средой: вмещающие породы пронизываются неоднородным восходящим электронно-ионным (плазменным) потоком (или потоком водно-газовых систем, сопровождающимся выносом ионизатора в атмосферу) и контактируют сверху с приземным тонким слабоионизированным пограничным атмосферным слоем, в котором действует вертикальное электрическое поле глобальной электрической цепи. При этом фоновая среда, в простейшем случае одномерная кусочно-однородная, характеризуется комплексной эквивалентной диэлектрической проницаемостью i -го слоя:

$$\tilde{\epsilon}_i = \epsilon_{ei} - i\sigma_{ei} / \omega$$

где

$$\begin{aligned} \sigma_{ei} &= \sigma'_i - \omega \epsilon''_i \epsilon_i, \quad \epsilon_{ei} = \epsilon'_i - \sigma''_i / \omega, \\ \epsilon_i &= \epsilon'_i - i\sigma''_i, \quad \sigma = \sigma' - i\sigma'' \end{aligned} \quad (3.1)$$

Вне контура залежи (экранированного окисляющегося объекта в литосфере) вмещающая среда интегрально характеризуется комплексной эквивалентной диэлектрической проницаемостью $\tilde{\epsilon}_e = \epsilon_e - i\sigma_e / \omega$.

При этом комплексные параметры $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$ и $\sigma = \sigma' - i\sigma''$ вводятся в качестве коэффициентов при линейных членах разложений в степенной ряд комплексных функций, выражающих поляризованность и объемную плотность тока свободных зарядов через усредненные электрические и магнитные поля во вмещающей среде [3, 4, 13].

3.2. Электромагнитный отклик системы на периодическое во времени и пространстве электромагнитное возбуждение. Рассмотрим электромагнитный отклик системы фоновой среды, пронизываемой электронно-ионным потоком над экранированным окисляющимся объектом, на пространственно-периодическое электромагнитное возбуждение в виде монохроматической плоской волны $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i\mathbf{k}\mathbf{r} + i\omega t}$, распространяющейся вдоль границы раздела земля-воздух. Так как вмещающая проводящая среда обладает значительной по сравнению со свободным простран-

ством оптической плотностью, распространение электромагнитной волны ниже границы раздела будет происходить по нормали к ней, т. е. квазипродольно к подмагничивающему полю Земли B_z^0 . При ограничении рамками квазигеодинамического приближения, когда не происходит упругое рассеивание заряженных частиц, а взаимодействие между ними может быть учтено феноменологически, учет влияния подмагничивающего поля B_z^0 , ориентированного вдоль оси OZ, производится добавлением силы Лоренца в уравнение движения частиц [13, 21, 25]. В этом приближении значение плотности полного тока в рассматриваемой среде с плазменным компонентом может быть определено в виде суммы плотности тока во вмещающей (фоновой) среде с комплексной эквивалентной диэлектрической проницаемостью $\tilde{\epsilon} = \epsilon_e - i\sigma_e / \omega$ и объемной плотности тока свободных зарядов (тока конвекции) в многочастичной «жидкости» с известными значениями заряда q_i и концентрации n_i :

$$\mathbf{I}_n(\mathbf{r}) = i\omega \tilde{\epsilon} \mathbf{E}(\mathbf{r}) + \sum_i q_i n_i \mathbf{v}_i(\mathbf{r}), \quad (3.2)$$

где $\mathbf{v}_i(\mathbf{r})$ – средние скорости перемещения частиц i -го сорта (отрицательных и положительных зарядов) [13, 21].

При этом интерполяционные объемные плотности тока свободных зарядов равны:

- для отрицательных носителей

$$\mathbf{I}_e(\mathbf{r}) = -e z_e n_e(\mathbf{r}) \mathbf{v}_e(\mathbf{r}), \quad (3.3)$$

- для положительных ионов

$$\mathbf{I}_u(\mathbf{r}) = e z_u n_u(\mathbf{r}) \mathbf{v}_u(\mathbf{r}), \quad (3.4)$$

где z_e и z_u – числа электронных зарядов на отрицательных и положительных носителях соответственно. Для электронов $z_e=1$, $e=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Соответственно, полную интерполяционную объемную плотность тока свободных зарядов запишем в виде

$$\mathbf{I}_n(\mathbf{r}) = -e z_e n_e(\mathbf{r}) \mathbf{v}_e(\mathbf{r}) + e z_u n_u(\mathbf{r}) \mathbf{v}_u(\mathbf{r}). \quad (3.5)$$

Для сред, в которых отрицательными носителями являются электроны с $z_e=1$, вклад тяжелых, относительно слабоподвижных положительных ионов в силу полного тока свободных зарядов пренебрежимо мал по сравнению с вкладом подвижных электронов. В таких средах или областях пространства, где существует только электронный ток, объемная плотность тока свободных зарядов приближенно будет иметь следующий вид [13, 21]:

$$\mathbf{I}_e(\mathbf{r}) = -e n_e(\mathbf{r}) \mathbf{v}_e(\mathbf{r}). \quad (3.6)$$

Сила, с которой усредненное макроскопическое электрическое поле $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ и подмагничивающее

геомагнитное поле $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ действует на носитель заряда q_i , равна

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = q_i[\mathbf{E}(\mathbf{r}) + \mathbf{v}_i(\mathbf{r}) \times \mathbf{B}(\mathbf{r})]. \quad (3.7)$$

Эта сила ускоряет заряженные частицы и увеличивает их средние упорядоченные скорости. Полагая далее, что на заряженную частицу i -го сорта действует возникающая при столкновениях сила трения, пропорциональная средней скорости упорядоченного движения $\mathbf{v}_i(\mathbf{r})$, результирующую механическую силу на ускоряемую частицу массы m_i , можно выразить равенством [13, 21]

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = m_i \left[\frac{\partial \mathbf{v}_i(\mathbf{r})}{\partial t} + P_{ci} \mathbf{v}_i(\mathbf{r}) \right], \quad (3.8)$$

где первое слагаемое справа в скобках – сила инерции при ускорении; второе – тормозящая сила трения; P_{ci} – эффективная частота столкновений носителей заряда i -го сорта.

На основании равенств (3.7), (3.8) можно записать уравнение движения носителей заряда i -го сорта с гармоникой скорости $\mathbf{v}_{oi}(\mathbf{r}) \exp(-i\omega t)$:

$$m_i [-i\omega \mathbf{v}_{oi}(\mathbf{r}) + P_{ci} \mathbf{v}_{oi}(\mathbf{r})] = q_i [\mathbf{E}(\mathbf{r}) + \mathbf{v}_{oi}(\mathbf{r}) \times \mathbf{B}(\mathbf{r})]. \quad (3.9)$$

Введя обозначения $\beta = q_i / m_i$, $\alpha = -i\omega + P_{ci}$, представим уравнение в следующем простом виде:

$$\alpha \mathbf{v}_{oi} = \beta \mathbf{E}(\mathbf{r}) + \beta (\mathbf{v}_{oi} \times \mathbf{B}(\mathbf{r})). \quad (3.10)$$

Из векторного уравнения (3.10) находим скорость перемещения частиц i -го сорта \mathbf{v}_{oi} :

$$\mathbf{v}_{oi}(\mathbf{r}) = \frac{\alpha \mathbf{E}(\mathbf{r}) + \beta [\mathbf{E}(\mathbf{r}) \times \mathbf{B}(\mathbf{r})] + \frac{\beta^2}{\alpha} \mathbf{E}(\mathbf{r}) \mathbf{B}^2(\mathbf{r})}{\alpha^2 + \beta \mathbf{B}^2(\mathbf{r})}. \quad (3.11)$$

Определив $\mathbf{v}_{oi}(\mathbf{r})$, легко вычислить плотность полного тока в фоновой среде с плазменным компонентом:

$$\mathbf{I}_n(\mathbf{r}) = i\omega \tilde{\epsilon}(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}) + \sum_i \frac{q_i^2 n_i}{m_i} \frac{\{\alpha^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) + \alpha \beta [\mathbf{E}(\mathbf{r}) \times \mathbf{B}(\mathbf{r}) + \omega_i \mathbf{E}(\mathbf{r})]\}}{\alpha(\alpha^2 + \omega_i^2)}, \quad (3.12)$$

где $\omega_i^2 = q_i \mathbf{B}(\mathbf{r}) / m_i$ – частота процессии частицы i -го сорта (циклотронная частота).

Полагая далее, что подмагничивающее поле $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ направлено вертикально вдоль оси прямоугольной системы координат $\mathbf{B}(\mathbf{r}) = B_z^0 \mathbf{k}$, перепишем это равенство в следующем виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_n(\mathbf{r}) &= i\omega \tilde{\epsilon}_0 \tilde{\epsilon}(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}) + \\ &+ i\omega \epsilon_0 \sum_i \Omega_i^2 \frac{\alpha^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) + \alpha \beta [E_y(\mathbf{r}) B_z^0 \mathbf{i} - E_x(\mathbf{r}) B_z^0 \mathbf{j}] + \omega_i^2 \mathbf{E}(\mathbf{r})}{i\omega \alpha (\alpha^2 + \omega_i^2)} = \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$= i\omega \tilde{\epsilon}_0 \tilde{\epsilon}(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}),$$

где $\Omega_i = \left(\frac{q_i n_i}{m_i}\right)^{1/2}$ – плазменная частота частицы i -го сорта; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная вакуума.

Легко видеть, что комплексная величина $\tilde{\epsilon}$ (тензор диэлектрической проницаемости фоновой среды с плазменным компонентом) в этом случае имеет тензорный характер, как известно, отражающий анизотропию ее свойств. При выборе оси OZ декартовой системы координат в направлении подмагничивающего поля B_z^0 величина $\tilde{\epsilon}$ представляется в форме [21, 25]

$$\tilde{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_1 & -i\epsilon_2 & 0 \\ i\epsilon_2 & \epsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

или по аффинорной форме записи матрицы (3.14)

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon_1 \mathbf{I}_1 + i\epsilon_2 \mathbf{k} \times \mathbf{I}_1 + \epsilon_z \mathbf{k} \cdot \mathbf{k},$$

где \mathbf{I}_1 – поперечный единичный аффинор; \mathbf{k} – единичный вектор вдоль оси OZ .

Как вытекает из формулы (3.13), компоненты тензора диэлектрической проницаемости $\tilde{\epsilon}$ сложным образом зависят от частоты зондирующего импульса, параметров вмещающей (фоновой) среды и характеристик пронизывающего ее электронно-ионного потока. Физически это соответствует резкому изменению свойств входного импеданса над залежью УВ, приобретающего в таком случае анизотропный характер (в приближении большого типичного размера неоднородности рассматриваемого типа по сравнению с длиной волны зондирующего импульса) и отображает частотно-избирательные свойства среды над нею. При исключении из приведенных выше формул подмагничивающего поля B_z^0 анизотропный характер входного импеданса теряется.

Зависимость компонент тензора диэлектрической проницаемости $\tilde{\epsilon}$ (3.14) от частоты указывает на принципиальную возможность существования резонансных частот и соответственно «окон прозрачности» для электромагнитных волн на этих частотах. Отметим, что значительное увеличение отклика системы (геосреды) на внешнее воздействие электромагнитной волной возможно только на основе использования явления резонанса.

Оценки резонансных частот применительно к геоэлектрическим условиям Припятской впадины (т.е. для характерных параметров вмещающей (фоновой) среды и электронно-ионной фракции) приведены в статье [21]: ионно-циклотронный резонанс – 30–50 Гц; нижнегибридный – 15–20 кГц; электронный циклотронный – 1,5–2,0 МГц; ионный плазменный – 3–5 МГц; электронный плазменный – 0,9–1,0 ГГц.

Несмотря на оценочный характер расчетов, наличие резонансных частот имеет определяющее значение, так как, в принципе, объясняет и аномальные глубины проникновения радиоволн в диапазоне «высокочастотного окна» и «мерцающий», по терминологии [21, 22], характер радио-

волновых аномалий над глубокозалегающими залежами УВ, появляющихся только на некоторых частотах, тогда как на других частотах, согласно экспериментальным измерениям, они практически отсутствуют.

Таким образом, теория резонансного взаимодействия электромагнитного излучения контролируемого источника с плазменным (электронно-ионным) потоком над глубокозалегающими залежами УВ в диапазоне частот «высокочастотного окна», несмотря на ее модельный характер, не встречает логических противоречий и подтверждается как численными оценками, так и полевыми наблюдениями [21, 25]. При этом наиболее существенная и принципиальная сторона данного вопроса — появление «окон прозрачности», обусловленных наличием восходящих электронно-ионных потоков.

Заметим также, что их наличие над глубокозалегающими залежами УВ объясняет и существование отрицательных магнитных аномалий небольшой (до нескольких десятков нанотесла) интенсивности [21, 22].

Кажется очевидным и то обстоятельство, что восходящие электронно-ионные потоки оказывают влияние и на распределение объемного заряда в приземном воздушном слое. Однако вопрос о влиянии эндогенных процессов на формирование и перераспределение зарядов в приземном воздушном слое практически не анализировался или, по крайней мере, не переводился в практическую плоскость. И лишь относительно недавно полевыми наблюдениями установлено наличие значительных локальных аномалий электростатического поля [30]. Как оказалось, напряженность вертикального электрического поля E_z в центральной части структур, аккумулирующих УВ, на 50–150 В/м выше по сравнению с его значениями вне контура залежи [30]. В итоге может быть реализован следующий комплекс геоэлектрических методов поиска и оконтуривания нефтегазовых залежей, объединенный единым механизмом формирования электромагнитного отклика, который включает в себя радиоволновые зондирующие системы с контролируемым источником, работающим в частотном или переходном режиме, в совокупности с регистрацией электростатического поля E_z в приземном атмосферном слое [25]. Видны и трудности решения задачи: обнаружение и оконтуривание залежи в общем случае связано с определением частот возбуждения «открытого» полого резонатора с анизотропным заполнением с учетом коллективных явлений в плазме твердого тела [21] и оценкой глубины залегания объекта.

К сожалению, ее решение в столь общей постановке затруднительно, однако мы все же попытаемся воспользоваться некоторой простой идеализацией модели, которая, возможно, окажется

полезной. Предположим, что в полости, ограниченной сверху слабоионизированным слоем воздуха, а снизу — верхней границей продуктивного высокоомного поляризованного пласта (залежи УВ) физически реализуются условия возбуждения поперечных резонансов в диапазоне «высокочастотного окна». Частоты поперечных резонансов применительно к данной модели, как известно, могут быть оценены из условия, что по вертикали между поверхностью раздела земля–воздух и поляризованным пластом на глубине h укладывается целое число полуволн, т.е.

$$\frac{h}{\lambda/2} = \frac{h}{vT/2} = N, \quad (3.15)$$

где λ — длина волны в среде, м; $v = c/\sqrt{\epsilon_{\text{отн}}}$ — скорость распространения волны в ней, м/с; c — скорость света в вакууме; $\epsilon_{\text{отн}}$ — относительная диэлектрическая проницаемость среды (действительное число); $T = 2\pi/\omega$ — период колебаний, с.

С учетом (3.15) можно записать

$$f_n \approx \frac{Nc}{2h\sqrt{\epsilon_{\text{отн}}}}, \quad (3.16)$$

где f_n — частота поперечного резонанса, Гц; N — номер резонанса.

Следовательно, если частоты поперечного резонанса определенного номера лежат в диапазоне «окна прозрачности» и могут быть измерены, появляется возможность оценки глубины залегания объекта.

3.3. Пространственно-временная структура естественного электромагнитного поля в приземном слое и электромагнитные зондирования. На основе идеи об активной роли геологической среды в процессах формирования электромагнитной информационной структуры на поверхности Земли рассмотрим некоторые методические вопросы геоэлектромагнитных исследований. Как уже упоминалось, субвертикальные электронно-ионные потоки, формирующиеся в энергоактивных зонах геосреды, над экранированными окисляющимися объектами, электромагнитное излучение, обусловленное механоэлектромагнитными трансформациями различной физической природы, поля естественной поляризации неоднородностей в геосреде и другие факторы активно взаимодействуют с электрическими зарядами на нижней обкладке конденсатора Земля–магнитопауза, создавая на ней сложную пространственно-временную структуру естественного электромагнитного поля. Разность потенциалов в таком гигантском конденсаторе составляет порядка 300–400 кВ, что обуславливает в нижних слоях атмосферы напряженность вертикальной компоненты электрического поля при ясной погоде в среднем 100–150 В/м, которая имеет вариации суточного характера и изменяется в связи с метеорологическими факто-

рами, солнечной активностью, загрязненностью воздуха.

Электрическое состояние приземного слоя атмосферы – тонкого пограничного участка Земля–атмосфера мощностью 1,5–2,0 м, формируется ионами разных знаков, образованными вследствие как ионизации атмосферы космическими лучами, так и естественной радиоактивности Земли. В нем регистрируются дополнительные экстремумы, повторяемость которых задается по местному времени. Эти максимумы и минимумы получили название локальных и находят удовлетворительное объяснение локальными изменениями режима поступления в атмосферу радона-222 с субвертикальными потоками почвенных газов [31]. В итоге плотности потоков летучих компонентов из земных недр, а также объемного электрического заряда в рассматриваемом слое оказываются резко дифференцированными по площади, а большая часть суточной вариации атмосферного электрического поля (унитарной вариации) определяется локальной геологией и геодинамикой среды в окрестности пункта наблюдения.

Важным элементом динамики приземного слоя, наряду с упомянутыми выше факторами, являются также аэроэлектрические структуры, перемещающиеся вдоль земной поверхности, природа которых тесно связана с атмосферной турбулентностью, что создает определенные трудности при экспериментальном изучении процесса образования и фиксации интересующей нас пространственно-временной информационной структуры поля. Очевидно, эта структура в некоторых случаях может быть восстановлена непосредственными измерениями такого ее параметра, как вертикальная компонента электрического поля E_z [25], либо с помощью зондирующего (опорного) изучения [25] или длинных приемных линий, расположенных на земной поверхности [23, 24].

Заметим, что опорное излучение контролируемого источника (наземного, атмосферного или космического) в данном случае взаимодействует с пространственно-временной (предметной) структурой поля на земной поверхности, а не с конкретным неоднородным объектом, находящимся на некоторой глубине, возможно, значительно превосходящей эффективную глубину проникновения излучаемого импульса в фоновой среде. Существенно, что указанное излучение может поглощаться в самых приповерхностных горизонтах фоновой среды и вообще непосредственно не взаимодействовать с объектом исследования.

Согласно [32], воссоздание структуры предметного (информационного) электромагнитного поля на земной поверхности эффективно может быть реализовано с использованием приемов динамического голографирования на частотах радиоволнового диапазона. При этом трехмерная го-

лограмма однозначно воспроизводит фазу объектовой (предметной) волны. Деформация регистрируемого таким образом поля интерференции происходит в случае изменения фазы или частоты источника облучения (опорной волны) и характеризуется изменением пространственного положения интерференционных полос. При непрерывном изменении частоты опорной волны интерференционная картина также изменяется непрерывно [25, 32].

В результате в последние годы происходит смена идеологии разработки и практического применения аэро- и космогеофизических методов исследования геологической среды и природных ресурсов: традиционный (феноменологический) подход дополняется онтологическим, что ведет к смене процедуры и технологий получения, а также истолкования данных дистанционных электромагнитных зондирующих систем. Поэтому традиционные космогеофизические технологии, основу которых составляет спектрзональное дешифрирование материалов дистанционного зондирования, как правило, ориентированы на косвенный анализ идентификационных признаков объектов исследования [25, 32].

Обычно в качестве информационных моделей изображений выступают спектральные и поляризационные структуры пространственного распределения интенсивностей электромагнитного излучения, включая инфракрасный, тепловой, микроволновой и радиоволновой диапазоны, в то время как при нетрадиционном (онтологическом) подходе исследуется сформированная на нижней обкладке конденсатора Земля–магнитопауза пространственно-временная структура распределения поверхностных и объемных зарядов.

Интуитивно ясно, что формулировка и решение обратной задачи дистанционного зондирования при неклассическом (онтологическом) подходе неизбежно претерпевают существенные и неформальные изменения. Как уже отмечалось, в таком случае регистрируется суммарное электромагнитное поле, формируемое в результате интерференции внешнего зондирующего (опорного) излучения с пространственно-временной структурой поля, обусловленного распределением объемного заряда в приземном слое атмосферы – тонком пограничном слое мощностью 1,5–2,0 м, отражающего строение и динамику исследуемой геосреды. Восстановление этой структуры и является первым этапом в геолого-геофизическом истолковании материалов дистанционного зондирования. Очевидно, что в данном случае обратная задача в точном «нормальном» ее смысле практически неразрешима. В подобных условиях представляется естественным ослабить ее постановку, а именно ограничиться лишь приближенным восстановлением информационной пространственно-

временной структуры поля (объектовой волны) по данным экспериментальных наблюдений в рамках конкретно используемой зондирующей системы (наземной или дистанционной), а вопрос о ее дальнейшей интерпретации перевести в практическую плоскость, так как на указанном этапе все еще невозможно опереться на соответствующий математический инструментарий. Возможно, здесь может оказаться вполне приемлемым путь прямых сопоставлений с данными бурения или других геофизических методов. Однако это обстоятельство представляется не столь драматичным, если принять во внимание тот факт, что неадекватность интерпретационных моделей и процедур присуща, вообще говоря, не только неклассическим, но в некоторых случаях и базовым, фундаментальным моделям и методам современной геоэлектрики [5].

4. Полевые экспериментальные измерения с целью изучения структуры электромагнитных полей — новые возможности создания эффективных технологий геофизических исследований.

4.1. Предварительные замечания. Обширные полевые эксперименты по изучению структуры атмосферного электричества приземного слоя, формируемого ионами разных знаков, аномальных изменений квазистационарного вертикального электрического поля E_z , а также зон поляризации на границах раздела геологических неоднородностей с целью оперативного решения экологических, инженерно-геологических, гидрогеологических и геолого-геофизических задач начали проводиться авторами непосредственно начиная с 2000 г. Основная целевая направленность этих экспериментов была сугубо практической. Они проводились для решения указанных задач. В то же время эксперименты постоянно велись в процессе решения конкретных практических задач такого рода. В принципе, по другому быть и не могло, так как подобные экспериментальные работы не имели бюджетного финансирования и других источников поддержки (например, сервисных геофизических, нефтяных компаний или спонсорских), а осуществлялись, в основном, за счет финансовых поступлений по договорным работам и исключительно на энтузиазме авторов.

Результаты подавляющего большинства полевых экспериментов (решения конкретных практических задач) опубликованы в научных журналах, сборниках статей, материалах научных конференций. Они неоднократно докладывались на национальных и международных конгрессах, симпозиумах, конференциях. Некоторая часть этих публикаций приведена в списке литературы [22–23, 37–59], на них сделаны ссылки при описании результатов экспериментальных измерений. Так как результаты многих эксперименталь-

ных работ были, в некотором роде, «шокирующими» для самих исполнителей, то своими многочисленными публикациями и докладами авторы пытались привлечь внимание непосредственно специалистов-геоэлектриков и геофизиков на объективную необходимость изучения естественного электромагнитного излучения Земли (зон поляризации, структуры приповерхностного слоя заряженных частиц и др.) в силу того, что дальнейшее развитие этого направления может открыть широкие возможности для создания эффективных инновационных технологий геоэлектрических исследований.

Изначально экспериментальные работы были направлены на решение задач приповерхностной геофизики. Однако в процессе проведения конкретных экспериментальных исследований оказалось, что в рамках данного направления могут быть созданы эффективные технологии для решения важных задач нефтегазовой геологии. Поэтому большинство конкретных примеров, приведенных ниже, связаны с решением нефтегазопроисловых задач. Однако прежде чем перейти к непосредственному изложению экспериментальных результатов представляется целесообразным остановиться на двух последних публикациях [33, 34].

В статье [33] анализируются итоги геологоразведочных работ и бурения в 1995–2006 гг. на Южном Каспии, которые проводились в море на основе 18 контрактов с иностранными нефтяными компаниями (НК). Почти все контрактные блоки и площади были подготовлены под глубокое бурение *двумерной и трехмерной сейсморазведкой*, результаты которой позволяют с учетом специфики разреза бассейна достаточно надежно моделировать природные резервуары-ловушки и, соответственно, закладывать первые поисковые и разведочные скважины на участках локальных поднятий, оптимальных с точки зрения возможности выявления скоплений УВ.

В указанный период в азербайджанской части акватории бурение проведено на 15 площадях. Только на одной из них разведочная скважина выявила крупное месторождение газа и конденсата. На остальных площадях пробурено 16 скважин на глубину 3840–7087 м. По результатам разбуривания семи скважин операторы проектов, несмотря на получение притоков УВ, признали коммерчески неэффективными опробованные объекты... При тестировании девяти скважин в них вообще не было установлено УВ. Результаты геологоразведочных работ 1995–2006 гг. не подтвердили предполагавшиеся ресурсы УВ в объеме 4,33 млрд т в нефтяном эквиваленте, в том числе ожидаемые 930 млн т нефти и 3,4 трлн м³ газа. Общие затраты компаний-операторов составили около 1 млрд дол. США: примерно 110 млн на геофизические работы и 830 млн — на бурение (55 тыс. пог. м) [33].

Разочаровывающие результаты! Именно активное освоение нефтегазовых ресурсов шельфов и глубоководных акваторий морей и океанов и такого рода итоги при использовании традиционных методик геолого-геофизических исследований вынудили ведущие нефтяные компании мира привлекать дополнительные геофизические методы для повышения успешности бурения, а также вкладывать средства в разработку подобных методов. В связи с этим появился уникальный шанс занять сформировавшуюся нишу в комплексе нефтегазопроисследовательских методов так называемым прямым методом поисков и разведки скоплений УВ, в том числе геоэлектрическим (электромагнитным). И этим шансом сообщество геофизиков-геоэлектриков попыталось воспользоваться сполна, на чем мы остановимся ниже. До этого момента многочисленные попытки разработчиков геоэлектрических (электромагнитных) методов найти признание нефтегазовых компаний не увенчались успехом. Достаточно содержательный и исчерпывающий обзор такого рода попыток на начало 1999-х годов приведен в работе [35].

Публикации за последние годы свидетельствуют об активном использовании в геологоразведочном процессе геоэлектрических (электромагнитных) технологий в настоящее время. Особо продвинулись в данном направлении западные компании EMGS с технологией Sea Bed Logging (SBL) [www.emgs.com] и MTEM с технологией MTEM (multi-transient electromagnetic) [www.mtem.com] [34]. Эти технологии признаны ведущими нефтегазовыми компаниями мира, а сами компании выполняют электромагнитные исследования по многомиллионным контрактам на суше и в морских акваториях во всех нефтегазоносных регионах земного шара. По количеству и объему контрактов лидерство держит сервисная компания EMGS.

В подтверждение изложенного выше приведем несколько цифр. Так, потенциальный рынок для технологии MTEM оценивается экспертами в 500 млн фунтов стерлингов в год (First Break, volume 24, January 2006, p. 25). Известная сервисная компания Petroleum Geo-Services (PGS) в 2007 г. полностью выкупила все акции MTEM за 275 млн дол. США (First Break, September 2007, v. 25). Компания EMGS (г. Тронхейм, Норвегия) в 2007 г. выполнила два крупных контракта на сумму 37,5 млн дол. США и 70 млн норвежских крон (First Break, volume 25, May 2007, p. 18–19), а в 2008 г. получила контракт на работы в Мексиканском заливе стоимостью 10 млн дол. США (First Break, Feb. 2008, v. 26). Чтобы получить возможность проведения работ на небольших глубинах (меньше 300 м) EMGS совместно с компанией Reservoir Exploration Technology (RXT) выкупили в 2008 г. акции компании KLM

Technologies за 34 млн дол. США (First Break, January 2008, v. 26), а компания Fugro приобрела 60 % акций частной российской фирмы EMMET (Electro Magnetic Marine Exploration Technologies) за 10 млн евро (First Break, April 2008, v. 26). Следует добавить к этому, что некоторые известные норвежские нефтяные компании (StatoilHydro, например; First Break, March 2008, v. 26, p. 16) оказывают EMGS финансовую поддержку для проведения опытных исследований на нефтегазовых объектах в Северном море. В марте 2008 г. общество Norwegian Petroleum Society за высококачественную и профессиональную работу в нефтяной геофизике присудило 17 ежегодную Геофизическую премию основателям компании EMGS (First Break, April 2008, v. 26).

Приведенные цифры говорят сами за себя – в настоящее время ведущие нефтегазовые компании мира целенаправленно вкладывают средства в разработку и совершенствование геоэлектрических (электромагнитных) технологий и начинают их активно применять в комплексе с сейсморазведкой и другими геолого-геофизическими методами; известные крупные сервисные геофизические компании стремятся заполучить такого рода технологии и не жалеют денег на их приобретение, а фирмы, выполняющие геоэлектрические (электромагнитные) исследования с нефтегазопроисследовательскими целями, ведут жесткую борьбу за лидерство в бурно прогрессирующем секторе геоэлектрических услуг для мирового нефтегазового комплекса.

Подтверждение жесткой конкуренции новых геоэлектрических (электромагнитных) технологий можно найти в публикации [34], где детально описываются особенности и возможности технологии MTEM, а также отмечаются ее преимущества по сравнению с технологией SBL компании EMGS. В выводах статьи [34] особенности технологии MTEM характеризуются авторами следующим образом.

MTEM – испытанный метод дистанционных исследований для прямого обнаружения и оконтуривания скоплений УВ. Для построения вертикальных разрезов распределений сопротивления оперативно осуществляются наблюдения вдоль профилей, которые пространственно увязываются со структурной информацией, полученной по сейсмическим данным. Углеводородные флюиды и газ могут быть выделены по положению в пространстве и по насыщению до принятия любого решения по бурению. Метод может применяться на суше, в переходной зоне и в морских акваториях, он более глубокий и имеет более высокую разрешающую способность, чем другие EM методы. Зондирующий импульс метода MTEM имеет более широкий частотный спектр, чем импульс CSEM, и для метода не существует проблемы воз-

душной (поверхностной, прямой) волны. Методология в целом исключительно близка к сейсмическому методу – расстановка приемников вдоль профиля от источника для получения информации с различной глубины. Расширенный набор применения технологии включает разведку, разработку и добычу, а также 4D мониторинг процесса добычи.

В дополнение отметим также следующие основные особенности и преимущества технологии МТЕМ.

1. Конечным результатом применения обеих технологий являются вертикальные геоэлектрические разрезы распределения сопротивления пород геологических неоднородностей, которые строятся по результатам решения обратной задачи или же моделирования в режиме решения прямой задачи. Как известно [34], сопротивление – один из наиболее чувствительных геофизических индикаторов УВ, вариации его значений охватывают практически три порядка в насыщенных флюидами коллекторах, тогда как изменения акустического импеданса составляют $\pm 30\%$. В статье [34] также акцентируется внимание на том, что все залежи УВ характеризуются высокими сопротивлениями, однако не все объекты с высокими сопротивлениями являются залежами УВ. Достаточно высокими значениями сопротивления характеризуются отложения соли, непроницаемых карбонатов, углей, интрузивных и вулканических пород.
2. Одной и другой технологиями регистрируются прямые электромагнитные отклики от залежей УВ, что можно считать уже доказанным фактом. В публикации [35] заявления разработчиков ряда эффективных электромагнитных методов о регистрации прямых отражений от залежей УВ подвергались сомнению (это с учетом имевшихся на то время технических средств и возможностей для практической реализации процесса регистрации).
3. Технология МТЕМ одинаково успешно может применяться на суше, в переходных зонах и в морских акваториях, SBL – только в морских условиях и при этом на глубинах свыше 300 м. Для выполнения работ на небольших глубинах компания EMGS выкупила технологию фирмы KLM Technologies. Более точные результаты методом МТЕМ получаются на суше.
4. Разрешающая способность МТЕМ по горизонтали составляет половину длины между регистраторами, которая равна 200 м. Существующие методы решения обратных задач позволяют определять верхнюю кромку высокоомных объектов с точностью 10 % глубины их залегания.
5. Для измерений в морских акваториях методом МТЕМ используются два корабля: с одного на кабеле спускается генераторная установка, с

другого – регистраторы сигналов, расстановка которых осуществляется на морском дне с использованием ОВС (ocean bottom cable) технологии.

6. Предварительные разрезы распределения сопротивлений могут быть получены в полевых условиях в течение 24 ч.

В электромагнитных технологиях МТЕМ и SBL, признанных ведущими нефтегазовыми компаниями мира, используется и практически реализован классический принцип геоэлектрических (электромагнитных) зондирований. В этих методах генерируется и посылается в землю мощный электромагнитный импульс, а приемниками, расположенными вдоль профилей, регистрируется сигнал-отклик от резисторов в нижнем полупространстве. Современный технический уровень электронных устройств позволяет реализовать такую систему и эффективно выделять полезный сигнал на фоне достаточно интенсивных помех.

Следует согласиться с образным выражением А.И. Тимурзиева [36]: «западное НК свое не критическое отношение к теории нефтегазообразования покрывают многомиллиардными инвестициями в затратные технологии (сейсморазведка, бурение, компьютерные технологии)» т.е. они посажены транснациональными сервисными компаниями на «технологическую иглу». Совершенствование и усложнение современных методов сейсморазведки 2D и 3D (включая полевые наблюдения и системы обработки и интерпретации) способствуют постоянному повышению стоимости сейсмических работ. В свою очередь, технологии МТЕМ и SBL достаточно близки по идеологии к профильным сейсмическим наблюдениям (это подтверждают и сами создатели [34]), что также делает их довольно дорогостоящими. Приведенные выше суммы контрактов сервисной компании EMGS говорят сами за себя. В связи с этим можно предположить, что ведущие электромагнитные технологии МТЕМ и SBL являются новыми дополнительными компонентами «технологической иглы» для нефтяных компаний с учетом их технологической сложности и дороговизны.

4.2. Общая характеристика результатов экспериментальных исследований. В целом результаты полевых экспериментальных измерений можно охарактеризовать следующими положениями.

1. Экспериментальными наблюдениями над геологическими объектами различной природы установлено наличие в приповерхностном слое атмосферы зон с положительными и отрицательными заряженными частицами, формирование которых обусловлено, скорее всего, как неоднородностями геоэлектрических параметров в отдельных стратиграфических горизонтах, так и тектоническими особенностями строения геологического разреза.

2. Многочисленными экспериментами с различными измерительными схемами регистрации электромагнитных сигналов подобран простой и эффективный метод оперативного обнаружения и картирования таких зон, который получил условное название метода становления короткоимпульсного (электромагнитного) поля (СКИП) [23, 37–38, 43], Съёмка по технологии СКИП в различных модификациях (пешеходная, автомобильная, с борта плавсредства [42, 59] и аэровоздушная, с летательного аппарата [43–44]) предоставляет возможность эффективно и, главное, исключительно оперативно выявлять и картировать неоднородности геологического разреза по площади.
 3. Опытно-экспериментальные измерения значений вертикального естественного электрического поля E_z флюксометром вдоль длинных линий продемонстрировали принципиальную возможность выделения и селекции электромагнитного излучения, регистрируемого в точке измерений и связанного с определенными стратиграфическими горизонтами геологического разреза. На основе экспериментально установленной схемы измерений разработан уникальный метод вертикального электрорезонансного зондирования (ВЭРЗ) для изучения глубинной структуры геологического разреза в отдельной точке [24, 37–38, 53, 58–59].
 4. На базе отдельных методов СКИП, ВЭРЗ и флюксометрической съемки создана инновационная экспресс-технология (технология СКИП–ВЭРЗ) «прямых» поисков и разведки месторождений УВ геоэлектрическими методами (измерительная аппаратура, методика проведения полевых наблюдений, программно-алгоритмическое обеспечение регистрации, обработки и интерпретации данных геоэлектрических измерений, методические и практические принципы интерпретации геоэлектрических данных). Расширенное описание особенностей отдельных методов технологии можно найти в публикациях [23, 37–41].
 5. Многолетнее практическое применение технологии СКИП–ВЭРЗ совместно с методами сейсмоакустического и георадарного зондирования для решения конкретных задач экологического, инженерно-геологического и гидрогеологического характера свидетельствует о создании эффективного технологического комплекса геофизических методов для оперативного решения широкого круга задач приповерхностной геофизики [49–57].
 6. Полевые наблюдения осуществляются с помощью разработанных портативных измерительных аппаратных комплексов GEMA и ВЭРЗ, которые с помощью программного интерфейса соединены с GPS-приемником и полевым компьютером. Непосредственно в полевых условиях, оперативно, осуществляется обработка данных наблюдений, анализируются полученные результаты, корректируется последовательность полевых измерений и проводится предварительная их интерпретация. Аппаратурные комплексы обслуживаются в процессе выполнения измерений одним – тремя операторами [23, 24, 49, 55].
- Применение этих экспериментальных аппаратных и методических разработок в многолетней практической деятельности позволило получить следующие новые результаты.
1. Площадная съемка методом СКИП экспериментально свидетельствует о существовании над известными месторождениями нефти и газа положительных геоэлектрических аномалий (аномалий типа «залежь» (АТЗ)), которые являются важными нефтегазопроисковыми признаками [23, 37, 39–40]. В то же время полевые эксперименты съемкой СКИП показали, что: а) такие аномалии отсутствуют за пределами месторождений УВ; в) структурные ловушки с коллекторами, заполненными водой, фиксируются отрицательными геоэлектрическими аномалиями. На протяжении 2000–2008 гг. аномалии типа «залежь» зафиксированы съемкой СКИП примерно на 50 известных месторождениях УВ [39, 40], включая и такие известные как Тенгизское (Республика Казахстан) и Шелбинское (Украина).
 2. Согласно результатам практических измерений, метод ВЭРЗ дает принципиальную возможность в каждой конкретной точке зондирования разделять геологический разрез на отдельные стратиграфические подразделы и с достаточно высокой точностью определять глубины их залегания и мощности. Более того, экспериментально установлено, что по диаграммам зондирования в разрезе могут уверенно выделяться отдельные аномально поляризованные пласты типа «нефтяной пласт», «газовый пласт», «водонасыщенный пласт», «соляной пласт», «глинистый пласт» и др. [24, 37, 38, 41, 45, 47, 50, 52, 53]. Эти особенности метода ВЭРЗ уникальны при поисках и разведке как месторождений УВ, так и водоносных горизонтов.
 3. В сезонных работах 9-й (2004 г.) и 11-й (2006 г.) украинских антарктических экспедиций в районе Антарктического полуострова отработаны методические и практические вопросы проведения геоэлектрических исследований методами СКИП и ВЭРЗ с борта судна в акваториях морей и океанов. Впервые в районе УАС «Академик Вернадский» съемкой СКИП выявлена аномалия типа «залежь», а зондированием ВЭРЗ в ее пределах зафиксированы АПП типа «залежь углеводородов» [42, 59].

Полученные результаты указывают как на принципиальную возможность, так и на целесообразность использования технологии СКИП–ВЭРЗ при геолого-геофизических исследованиях на УВ прежде всего в акваториях Черного и Азовского морей, а также в шельфовых и глубоководных частях океанов и других морей.

4. При выполнении работ на Собинском нефтегазовом месторождении в Красноярском крае (Россия, 2006 г.) отработаны основные методические принципы проведения геоэлектрической съемки методом СКИП с борта самолета [43]. Модификация аэроСКИП дает практическую возможность более широкого применения технологии СКИП–ВЭРЗ при поисковых работах на крупных нефтегазоперспективных площадях в отдаленных и труднодоступных регионах. Результаты измерений с борта самолета показали, что интенсивность аномальных значений поля СКИП на высоте полета 25 м уменьшается примерно в 6 раз по сравнению с интенсивностью аномалий, зарегистрированных на земной поверхности с вездехода.

Окончательно методика применения модификации аэроСКИП для оперативного обследования крупных лицензионных участков отработана на Костанайской нефтегазоперспективной площади (Костанайская обл., Республика Казахстан, 2007 г., 8045 км²) [44]. Измерения в модификации аэроСКИП на различных высотах здесь показали, что интенсивность регистрируемых сигналов на высоте 100 м от поверхности примерно в 3 раза ниже интенсивности сигналов на высоте полета 25 м.

5. Исследования в пределах Коростенского плутона (Украина) продемонстрировали, что технология СКИП–ВЭРЗ может использоваться для выявления и картирования как ненарушенных блоков кристаллических массивов для создания хранилищ геологического типа, так и зон дробления (а следовательно, и ловушек УВ) в кристаллическом фундаменте [58].
6. В комплексе с сейсмоакустическим и георадарным методами съемка СКИП и зондирование ВЭРЗ позволяют эффективно решать широкий комплекс инженерно-геологических задач: а) картирование зон повышенного увлажнения грунтов [49, 50]; б) определение путей миграции подземных водных потоков техногенного происхождения; в) трассировка геодинамических зон; г) обследование строения фундаментов архитектурных сооружений; д) изучение зон провальной и просадочной опасности; е) выявление и картирование подземных пустот и др. [47, 49–57].
7. Методы СКИП и ВЭРЗ дают возможность оперативно и эффективно решать задачи поисков

и картирования водонасыщенных коллекторов на разных глубинах [47, 52].

8. Глубинные зондирования (до 32 000 м) в районе Антарктического полуострова свидетельствуют о возможности использования метода ВЭРЗ для изучения структуры земной коры и верхней мантии [42, 59].

Основные преимущества перечисленных методов инновационной технологии перед существующими аналогами сводятся к следующим пунктам:

- 1) высокая оперативность проведения полевых работ и получения новой информации о геологическом строении исследуемых объектов (экспресс-технология);
- 2) высокая разрешающая способность отдельных методов и, соответственно, высокая ценность (достоверность) получаемой с использованием технологии СКИП–ВЭРЗ новой геофизической информации;
- 3) оптимальное соотношение цены при выполнении работ методами СКИП–ВЭРЗ.

4.3. Экспериментальные геоэлектрические исследования на Шебелинском газоконденсатном месторождении. Одно из главных направлений увеличения объемов добычи нефти и газа в Украине связывается специалистами и научными представителями нефтегазовой отрасли с освоением глубинных нефтегазоперспективных горизонтов в Днепровско-Донецкой впадине (ДДВ).

Поэтому начиная с 2006 г. целенаправленно проводятся полевые эксперименты по изучению возможности использования для поисков глубокозалегающих резервуаров УВ методов СКИП–ВЭРЗ [23, 24]. В частности, в 2006 г. экспериментальные исследования глубинных нефтегазоперспективных горизонтов методами СКИП–ВЭРЗ проведены на Кобзевском газоконденсатном месторождении (ГКМ) [43, 45, 60], а также в пределах площадей в Полтавской обл. [45]. В первой декаде февраля 2008 г. такого же рода эксперименты проведены на крупнейшем в Украине Шебелинском ГКМ [61]. По нашему мнению, результаты исследований в определенной степени неожиданны и могут представлять существенный интерес для дальнейших работ в этом направлении.

В тектоническом отношении Шебелинское ГКМ [61–63] находится в приосевой зоне восточной части ДДВ, в пограничной полосе с северной прибортовой зоной. Поднятие выявлено в 1947 г., поиски и разведка газовых залежей проводились с 1949 по 1956 г. На месторождении впервые в ДДВ выявлена уникальная массивно-пластовая сводчатая залежь высотой 1180 м. На 01.01.1994 г. эксплуатационный фонд насчитывал 561 скважину. Суммарная добыча газа достигла 569,8 млрд м³, т. е. 88,0 % подсчитанных (650 млрд м³) запасов. В настоящее время объем добытого газа превысил прогнозные запасы более

чем в 2 раза, что позволило предположить возможную подпитку разрабатываемой части структуры глубинными флюидными потоками.

Геолого-геофизическими исследованиями [62, 63] в окрестностях Шебелинской структуры выделено несколько отдельных площадей, а также оценены возможные ресурсы газа в их пределах, млрд м³: Западно-Шебелинская – 10; Северно-Шебелинская – 20; Южно-Шебелинская – 60; Восточно-Шебелинская – 17.

В 1998–2002 гг. на Западно-Шебелинской площади проведены сейсморазведочные работы ГПП «Укргеофизика», а в 2004 г. ГП УкрНИИГаз даны рекомендации на бурение в пределах лицензионного участка одной поисковой и шести разведочных скважин. Согласно дополнительным исследованиям общие ресурсы и запасы Западно-Шебелинской площади составляют ~20 млрд м³.

В пределах структуры и ее окрестностях выполнен значительный объем сейсмических работ, по результатам которых «более обоснованно рассмотрены перспективы Шебелинской площади для поисков новых залежей УВ» [62]. В частности, констатируется следующее [62]: 1) пробуренные глубокие поисковые скважины (кроме № 800) располагаются в опущенном тектоническом блоке; 2) характер волнового поля в сводовой части поднятия свидетельствует об интенсивной тектонической нарушенности каменноугольных отложений; 3) сводовая часть поднятия представляется весьма неблагоприятным участком для поиска новых ловушек УВ в карбоне из-за низких изолирующих свойств покровных; 4) более перспективны крыльевые и периклинальные части поднятия, где установлено развитие как тектонически экранированных блоков, так и ловушек неструктурного типа – зон литологического и стратиграфического выклинивания, фациального замещения и т. д.; 5) предпочтительным выглядит северное крыло поднятия, где в разрезе отложений C₂m–C₁s₂ намечается ряд локализованных блоков, слабо затронутых тектонической деятельностью; 6) перспективным объектом следует считать перегиб на уровне московских отложений в пределах западной периклинали; 7) заслуживает внимания зона развития предположительно биогермных образований в нижней перми, выделенная на юге площади в Гусаровском прогибе.

В пределах Шебелинской структуры и в ее окрестностях съемка СКИП рекогносцировочного характера с автомобиля проводилась, в основном, вдоль дорог. Зондирование методом ВЭРЗ выполнено в пределах самой структуры (точка V1) и в северной аномальной зоне, в ее окрестностях (точка V2) (рис. 3). В тезисном изложении результаты исследований сводятся к следующему.

1. В целом геоэлектрическая аномалия типа «залежь» практически полностью совпадает с кон-

туром Шебелинской структуры. В ее пределах фиксируются участки повышенной и пониженной интенсивности поля СКИП, а в восточной части даже два интервала отрицательных значений поля.

2. На маршрутах измерений в пределах Западно-Шебелинской площади, а также в западной части самой Шебелинской структуры аномальные значения поля СКИП не зафиксированы. Это ставит под сомнение прогнозные ресурсы УВ этой площади, а также целесообразность проведения здесь дальнейших геолого-геофизических работ и запланированного бурения в первую очередь.
3. В пределах Северно-Шебелинской площади фиксируется небольшая аномалия, однако ее площадь вряд ли сможет обеспечить прогнозные ресурсы в 20 млрд м³.
4. В центральной части Восточно-Шебелинской площади зафиксирована аномальная зона типа «залежь», на север от нее перспективы обнаружения газоносности отсутствуют, в южном направлении выявлена интенсивная аномалия, которая является как бы продолжением аномалии над Шебелинской структурой, однако полностью она не оконтурена.
5. На Южно-Шебелинской площади маршрутная съемка СКИП не проводилась.
6. Севернее Шебелинской структуры отдельными маршрутами съемки обнаружены две аномальные зоны типа «залежь» (рис. 3). Есть основания предполагать, что после детализационных работ суммарная площадь этих аномальных зон может превысить площадь аномалии типа «залежь» непосредственно в пределах Шебелинского поднятия.
7. В аномальной зоне месторождения зондирование ВЭРЗ в точке V1 выполнено в интервале глубин 1100–6500 м, где установлено три интервала газоносности (1385–1466 м, 3 АПП «газ», H_c=23 м; 1584–1772 м, 3 АПП «газ», H_c=28 м; 1860–2150 м, 22 АПП «газ», H_c=118 м), последний из которых можно классифицировать как интервал интенсивного газонасыщения (рис. 4). В практике проведения зондирований ВЭРЗ на других объектах такие оригинальные случаи не встречались. Массивно-пластовая залежь УВ на Шебелинском месторождении фиксируется 22 АПП на диаграмме зондирования. АПП типа «соль» зафиксирован на глубине 5140 м, прослежен до глубины 6500 м.
8. В северной аномальной зоне (см. рис. 3) зондирование в точке V2 проведено в диапазоне глубин 1000–6600 м (рис. 5). Здесь выделено два интервала нефтегазоносности (2639–3039 м, 3 АПП «газ», H_c=10 м; 5510–6600 м, 8 АПП «газ» и «нефть», H_c=160 м), в нижнем интерва-

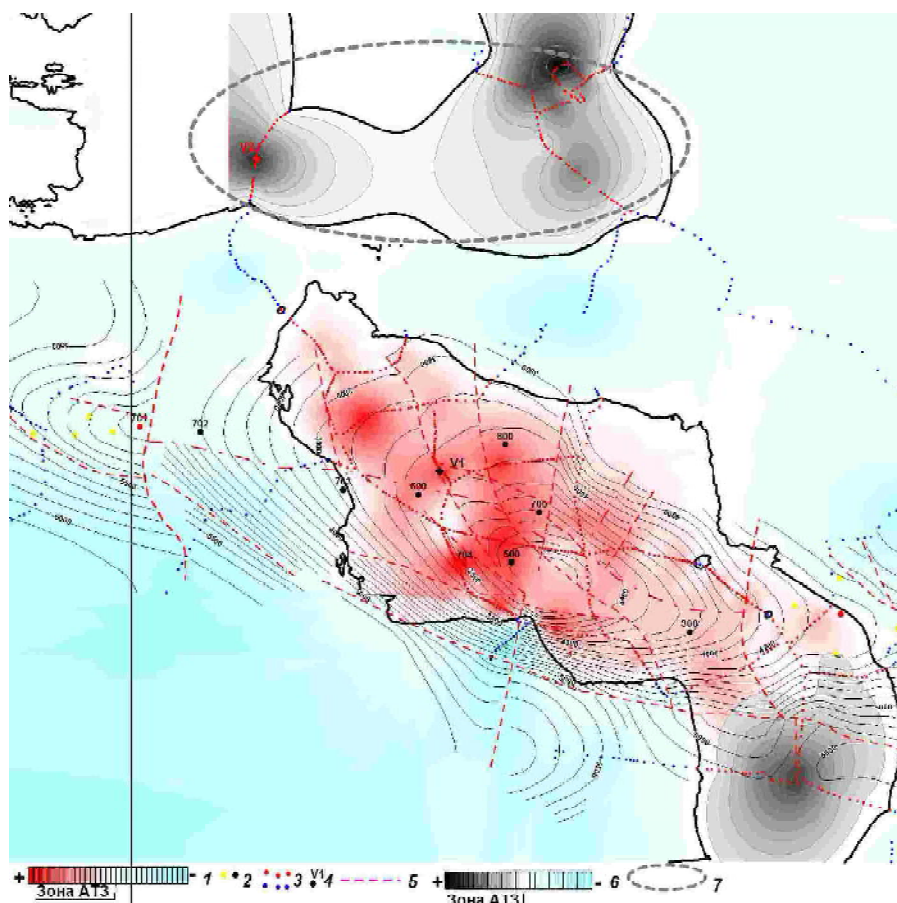


Рис. 3. Карта геоэлектрических аномалий типа «залежь» на структурной карте горизонта V611-n (C_{2m}) Шебелинского ГКМ: 1 – шкала значений поля СКИП (АТЗ типа «газ+конденсат» в пределах Шебелинской структуры непосредственно); 2 – скважины; 3 – точки съемки СКИП (положительные значения – красные, отрицательные – синие); 4 – пункты ВЭРЗ; 5 – тектонические нарушения; 6 – шкала значений поля СКИП (АТЗ типа «газ+нефть» в пределах северной и южной аномальных зон); 7 – вероятный контур северной аномальной зоны

ле для АПП «газ», $H_c=57$ м, для АПП «нефть» $H_c=107$ м. Суммарная мощность всех АПП равна 174 м и практически сопоставима с таковой в точке VI. Интенсивность поля СКИП в аномальных зонах, а также суммарная мощность АПП в разрезе указывают на целесообразность проведения на этих участках детальных исследований методами СКИП–ВЭРЗ, а также других геолого-геофизических работ.

Результаты экспериментальных рекогносцировочных работ указывают на целесообразность проведения в пределах Шебелинской структуры и на прилегающих к ней площадях детальных исследований методами СКИП–ВЭРЗ. Актуальность таких работ не вызывает сомнений, если учесть планируемое проведение в этом районе масштабных геолого-геофизических исследований и бурения с целью оценки перспектив нефтегазности глубинных горизонтов геологического разреза. Методами СКИП–ВЭРЗ непосредственно здесь может быть оперативно выполнен следующий комплекс полевых работ.

1. Площадная съемка методом СКИП по существенно более плотной сети наблюдений. Ма-

териалы такой съемки позволят обосновано выделить наиболее перспективные участки для проведения сейсморазведки 3D, других геофизических работ и бурения в первую очередь. Результаты съемки СКИП дадут возможность принять более взвешенное решение о целесообразности проведения на данном этапе дальнейших геолого-геофизических работ и бурения на Западно-Шебелинской площади и прилегающей к ней с востока части самой Шебелинской структуры.

2. В пределах выявленных и закартированных аномалий типа «залежь» следует выполнить достаточный для предварительной оценки запасов УВ объем зондирований ВЭРЗ. Зондирование до глубин 10–12 км (а при необходимости и глубже) позволит оперативно и обосновано оценить в первом приближении перспектив нефтегазности глубинных горизонтов района.
3. В пределах Шебелинской структуры могут быть проведены в полном объеме экспериментальные работы с целью изучения возможностей применения технологии ВЭРЗ для предварительной оценки запасов УВ.

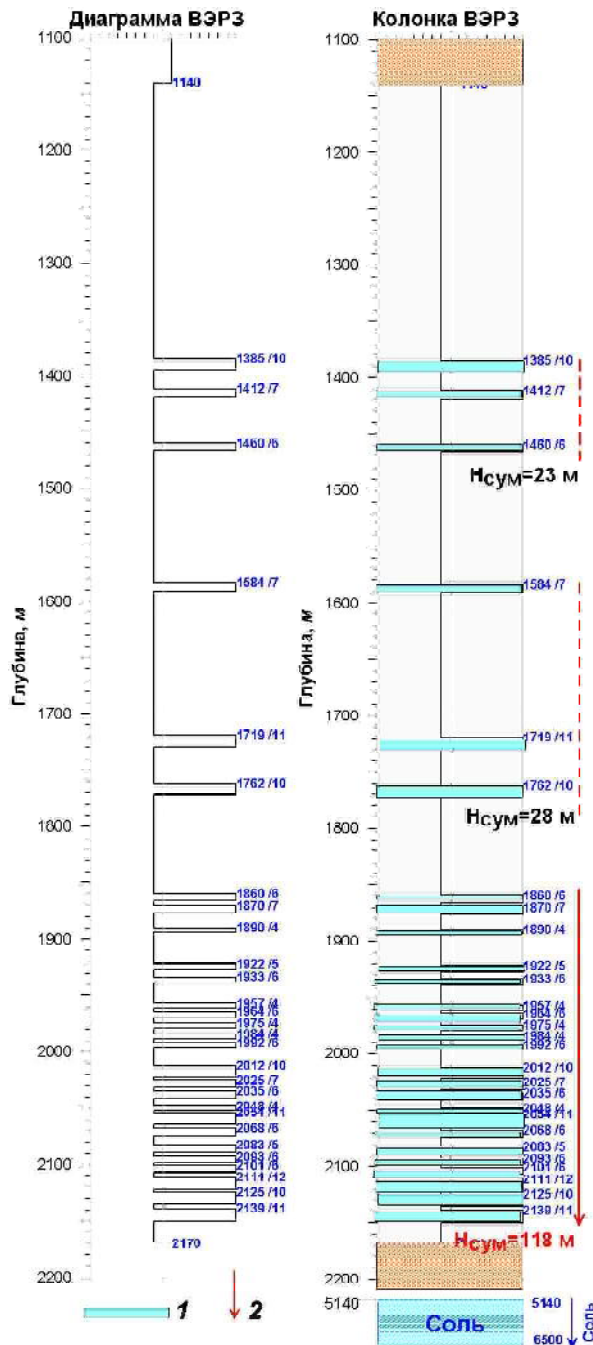


Рис. 4. Результаты ВЭРЗ в аномальной зоне в пределах Шебелинской структуры: 1 – АПП типа «газ»; 2 – интервал интенсивного газонасыщения

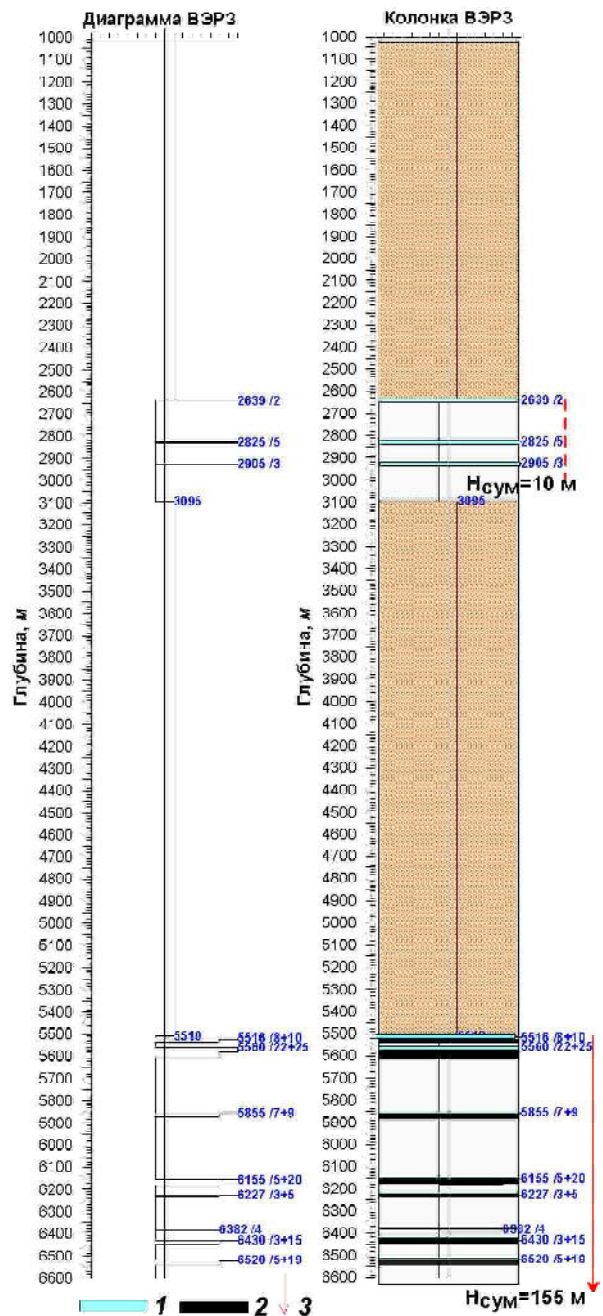


Рис. 5. Результаты ВЭРЗ в аномальной зоне за пределами Шебелинской структуры: 1 – АПП типа «газ»; 2 – АПП типа «нефть» («конденсат»); 3 – интервал интенсивного нефтегазонасыщения

4. Существенный интерес представляет также исследование возможностей применения методов СКИП–ВЭРЗ для обнаружения в разрезе Шебелинского ГКМ пропущенных продуктивных пластов.
5. Зондированием в пределах Шебелинской структуры целесообразно проследить верхнюю и нижнюю границы солевой толщи, а также оценить перспективы газонасыщенности подсолевых отложений. Такие работы могут быть выполнены вдоль отдельных профилей или по площади.

В целом экспериментальные геоэлектрические работы в пределах крупнейшего в Украине газоконденсатного месторождения, по нашему мнению, еще раз показали работоспособность и экономическую эффективность технологии СКИП–ВЭРЗ «прямых» поисков и разведки скоплений УВ. Геоэлектрические исследования на разрабатываемых (крупных и средних) месторождениях, а также в их окрестностях позволяют оперативно обнаружить новые перспективные участки, объекты и горизонты, а также проследить простираение по

площади недостаточно изученных бурением продуктивных пластов. Очевидно, технология СКИП–ВЭРЗ может эффективно использоваться и для оперативной оценки перспектив нефтегазоносности глубинных горизонтов (свыше 6000 м) осадочного чехла.

Результаты геоэлектрических работ в районе Шебелинской структуры дают основание авторам еще раз обратить внимание на важное обстоятельство. Так, в более ранних публикациях неоднократно указывалось на целесообразность использования технологии СКИП–ВЭРЗ для поисков средних и крупных месторождений нефти и газа [39, 40]. Результаты рекогносцировочных работ в феврале 2008 г. вынуждают напомнить о данной проблеме и в этой публикации.

4.4. О целесообразности комплексирования технологии СКИП–ВЭРЗ с сейсмическими работами. Геоэлектрические исследования на известных месторождениях УВ убедительно показали, что практически все аномалии типа «залежь» фиксируются исключительно над структурами (или же их отдельными частями), выделенными по сейсмическим данным. Наличие аномальной геоэлектрической зоны над Шебелинской структурой (см. рис. 3) еще раз подтверждает это. Указанная особенность АТЗ свидетельствует о целесообразности комплексирования технологии СКИП–ВЭРЗ с сейсморазведкой. Ниже приведены примеры, иллюстрирующие объективную целесообразность такого комплексирования с целью оптимизации геологоразведочного процесса на нефть и газ.

Новонезжинская площадь (Костанайская обл., Республика Казахстан, 1260 км²). На площади блока летом 2006 г. выполнена сейсморазведка 2D в объеме 170 пог. км (1 месяц – полевые работы, 3 месяца – обработка и интерпретация данных). Рекогносцировочные и детальные полевые геоэлектрические работы (октябрь, 2006 г.) проведены за 10 дней, еще 2 недели затрачено на окончательную обработку материалов и подготовку отчета. Уже на этапе завершения полевых работ предварительные геоэлектрические данные подтвердили целесообразность бурения разведочных скважин в пределах антиклинальных структур, выделенных по материалам сейсморазведки 2 D, и позволили уточнить их местоположение. Стоимость научно-исследовательских геоэлектрических работ на порядок ниже стоимости сейсмических. Эти результаты свидетельствуют, что в целом при комплексировании технологии СКИП–ВЭРЗ с сейсморазведкой общая стоимость комплексных работ может практически не увеличиться по отношению к стоимости сейсмических, вместе с тем наиболее перспективные участки могут быть обследованы сейсморазведкой более детально в силу оптимального расположения сейсмических профилей.

Западные Радченки (ДДВ, Полтавская обл., Украина). Зондированием по сети профилей на площади установлено, что максимальный эффект суммарной АТЗ (район скв. 203) (рис. 6) связан с АПП типа «газ» под соляным «крылом» (карнизом). Подсолевые АПП типа «газ» выявлены на площади севернее и северо-западнее соляного купола. В верхней части разреза АПП типа «газ» сосредоточены ближе к центру поднятия соли и вытянуты в меридиональном направлении.

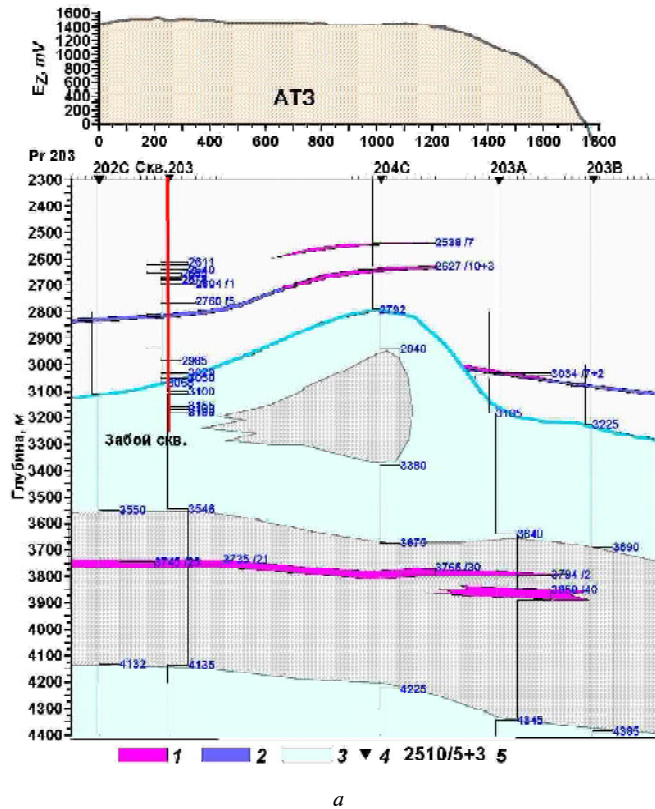
В районе пробуренной скв. 203 зона АТЗ связана с пластами АПП в подсолевом комплексе. Отложения соли по данным ВЭРЗ зафиксированы в интервале 3068–3546 м. Мощность пласта соли $H=478$ м. При бурении скважины соль была вскрыта на глубине 3066 м. Бурением по соли пройдено 200 м. В подсолевом комплексе пласт АПП выделен в интервале глубин 3735–3756 м. Мощность пласта 21 м.

Детальные площадные зондирования ВЭРЗ в пределах площади демонстрируют возможности технологии СКИП–ВЭРЗ в решении задач обнаружения и прослеживания в разрезе продуктивных горизонтов, выяснения причин продуктивности (непродуктивности) пробуренных скважин, уточнения мест заложения запроектированных скважин.

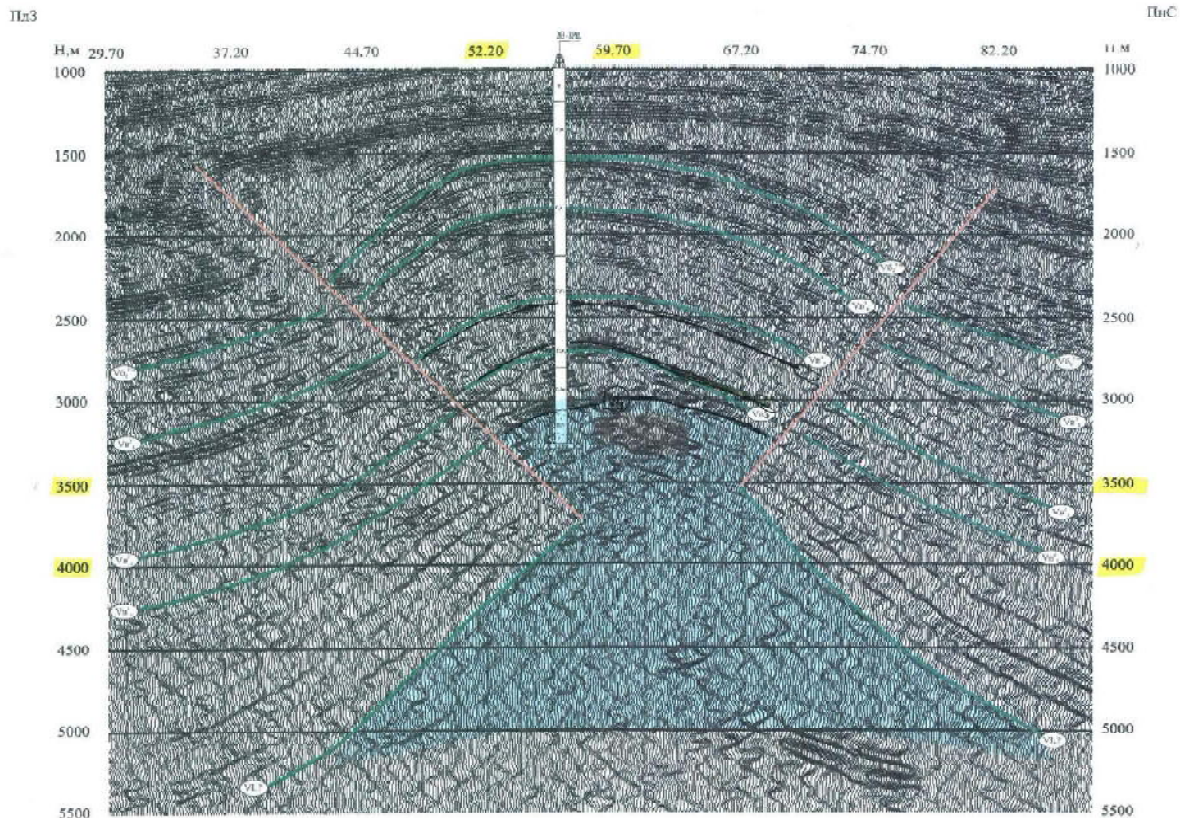
Результаты ВЭРЗ сопоставлены специалистами-сейсмиками с материалами МОГТ (рис. 6). К сожалению, здесь геоэлектрический и сейсмический профили не совпадают как по положению, так и по длине. Тем не менее (и это более всего удивило сейсмиков), неоднородность в соляном штоке выделяется на сейсмическом и геоэлектрическом профилях (рис. 6).

Анализ и сопоставление сейсмических и геоэлектрических материалов на площади позволили специалистам-сейсмикам сделать вывод, что комплексная интерпретация данных сейсморазведки и геоэлектрических исследований СКИП–ВЭРЗ целесообразна и эти методы совместно могут давать более достоверную информацию о строении земной коры и исследуемых геоэлектрических разрезов. Сейсморазведка МОГТ характеризует структурно-тектонические особенности строения изучаемого геологического разреза среды, а геоэлектрические методы – его физико-литологические параметры.

4.5. Решение задач приповерхностной геофизики и мониторинга инженерно-геологических условий. Экспресс-технология геоэлектрических исследований СКИП–ВЭРЗ в комплексе с методами сейсмоакустического и георадарного зондирования широко использовалась и продолжает интенсивно использоваться в настоящее время для оперативного решения разнообразных задач приповерхностной геофизики. В частности, с использованием методов СКИП–ВЭРЗ неоднократно решались



а



б

Рис. 6. Вертикальный геоэлектрический разрез по профилю 203 через аномальную зону типа «залежь» на Западно-Радченковской площади (а) и сейсмический разрез вдоль близкорасположенного профиля (б) (по материалам ВУГРЕ). Тип АПП: 1 – «газ», 2 – «обводненный горизонт», 3 – «солевые отложения»; 4 – пункты ВЭРЗ; 5 – (глубина кровли пласта) / (мощность пласта) + (мощность водного горизонта)

задачи: 1) поиска и картирования водоносных и водонасыщенных горизонтов, залежей минеральных вод [47, 52]; 2) выявления и картирования зон повышенного увлажнения грунтов, подземных водных потоков техногенного и естественного происхождения, утечек из подземных водных коммуникаций [49, 50]; 3) обследования инженерно-геологических и гидрогеологических условий и мониторинга за их изменением на территориях расположения исторических и архитектурных памятников, зданий и заповедников [51, 54, 57]; 4) проведения инженерно-геологических исследований на площадках строительства мостов, линий метро приповерхностного залегания, промышленных сооружений, жилых зданий и объектов социального и культурного назначения [56]; 5) картирования зон загрязнения нефтепродуктами.

4.6. Особенности и возможности технологии СКИП–ВЭРЗ. Из изложенного следует, что методы СКИП–ВЭРЗ основаны на неклассических подходах (принципах) к геоэлектрическим (электромагнитным) зондированиям. Они ориентированы изначально на изучение структуры приземного слоя атмосферы, формируемого ионами разных знаков, зон поляризации на границах раздела геологических неоднородностей разреза и естественного электромагнитного фона Земли. Такой неклассический подход позволил создать: а) компактную малогабаритную измерительную аппаратуру, легкую для транспортировки (два аппаратных комплекса помещаются в одну багажную сумку) и удобную в обслуживании; б) эффективную методику оперативного проведения полевых измерений (в пешем порядке, с автомобиля, с летательного аппарата); в) эффективную технологию решения широкого класса экологических, инженерно-геологических, гидрогеологических и геолого-геофизических задач. В целом технология СКИП–ВЭРЗ является малозатратной как по времени, так и по финансам, для работы в морских акваториях не требует специализированных судов – работы можно выполнять практически на любом плавсредстве, измерения в воздухе можно проводить на простом летательном аппарате. Технология также дает возможность получать предварительные результаты исследований непосредственно в поле, при проведении полевых работ, что позволяет корректировать априори запланированную систему геоэлектрических измерений. Важно обратить внимание на следующие особенности отдельных методов СКИП–ВЭРЗ.

1. На настоящее время геоэлектрические методы СКИП–ВЭРЗ следует считать, в основном, существенно экспериментальными, прошедшими лишь начальную стадию становления. Выполненные с помощью этих методов исследования можно классифицировать как научно-исследовательские, экспериментальные. Тем не менее получен-

ные многочисленные результаты эффективного решения широкого круга задач приповерхностной геофизики и нефтегазопроискового характера свидетельствуют о целесообразности дальнейшего совершенствования и экспериментального опробования методов СКИП–ВЭРЗ с целью последующего их перевода в категорию промышленных технологий.

2. Результаты съемки СКИП используются и интерпретируются на качественном уровне. Естественно, построение формализованной математической модели процесса становления поля с учетом приземного атмосферного слоя позволит существенным образом расширить информативность и разрешающую способность метода. Исключительная особенность метода СКИП – его оперативность. При нефтегазопроисковых работах в каждой конкретной точке оператор мгновенно получает информацию о том, принадлежит эта точка контуру аномалии типа «залежь» или нет. Это обстоятельство в процессе выполнения съемки позволяет оптимизировать априори принятую систему наблюдений – сгущать количество точек (профилей) на участках АТЗ и выполнять измерения только рекогносцировочного характера на участках их отсутствия. При обследовании больших по площади территорий в режиме аэроСКИП с самолета такая особенность метода дает возможность одновременно (параллельно) выполнять съемку рекогносцировочного и детального характера, что позволяет максимальным образом сокращать стоимость и время выполнения полевых измерений.

Опыт проведения съемки СКИП свидетельствует, что интенсивность выделяемых этим методом аномалий тем выше, чем крупнее месторождение УВ. Самые интенсивные значения аномалий СКИП зафиксированы над известными месторождениями Тенгизское (Республика Казахстан), Шебелинское и Кобзевское (ДДВ, Украина). Выявленная особенность метода СКИП позволяет на качественном уровне утверждать, что площадь аномалии АТЗ и ее интенсивность могут в первом приближении служить своеобразным критерием, по которому можно классифицировать прогнозные запасы УВ в районе выявленных и закартированных аномалий АТЗ.

3. Второй уникальной компонентой технологии СКИП–ВЭРЗ является метод ВЭРЗ. Он дает возможность оперативно выделять в разрезе отдельные стратиграфические элементы и с высокой точностью определять глубины их залегания. Особенность метода состоит в том, что выделяемые отдельные аномально поляризованные пласты типа «нефть», «газ», «вода», «соль», «кристаллический фундамент» и др., а

также мощности и глубины их залегания определяются не путем решения обратных задач, как это обычно делается практически во всех геофизических методах, а в процессе измерений непосредственно по экспериментально обоснованной технологической схеме вдоль длинных линий. В итоге применение технологии ВЭРЗ в пределах закартированных методом СКИП аномалий типа «залежь» дает возможность оценивать глубины залегания и мощности АПП типа «нефть», «газ», вода и др. (причем как отдельных АПП, так и суммарные мощности АПП разреза во всех перспективных интервалах). При этом глубины залегания основных перспективных горизонтов определяются непосредственно в поле, в процессе выполнения зондирований.

Выводы. Подводя итог изложенному, выделим основные моменты. Как правило, при теоретическом рассмотрении задач электромагнитных зондирующих систем обычно ограничиваются введением некоторых эффективных параметров среды ($\sigma_{эф}$, $\varepsilon_{эф}$, $\mu_{эф}$), которые лишь в генерализованном виде характеризуют среду распространения волн и происходящие в ней процессы электромагнитного взаимодействия. Однако реальная геологическая среда — это гетерогенная многофазная система, пронизываемая электронно-ионными потоками, которая содержит весь спектр неоднородностей разной природы и находится в подмагничивающем магнитном поле Земли. Это обстоятельство указывает на возможность резонансного взаимодействия электромагнитного излучения с плазменными (электронно-ионными) потоками и, соответственно, появление «окон прозрачности» на резонансных частотах.

Новая область исследований последних лет — изучение пространственно-временной структуры естественного электромагнитного поля в приземном атмосферном слое (т. е. на нижней обкладке конденсатора Земля—магнитопауза). Очевидно, что рассмотрение новых явлений и новых фундаментальных моделей ведет к формированию новых методических приемов и новых возможностей исследования среды, обуславливает появление феноменов, отсутствующих в стандартных моделях геоэлектрики. Претерпевают изменения сами представления о сигнальной и «мешающей» компонентах наблюдаемого электрического отклика.

Меняется и уровень фундаментальных уравнений геоэлектродинамики, так как ни одно из обычно используемых уравнений не дает исчерпывающего описания процесса распространения электромагнитных возмущений в горных породах. Следовательно, реальные алгоритмы интерпретации данных электромагнитных зондирующих систем все еще приходится создавать в ситуации, когда многие элементы теории не раз-

работаны и не вполне ясны. Необходимость более целостного описания электродинамики реальной геологической среды осознается все большим количеством специалистов-геоэлектриков. В связи с этим в новом свете выглядят перспективы развития и возможности электромагнитных зондирующих систем, что, в свою очередь, может привести к глубоким изменениям установившихся представлений.

В целом в статье дано теоретическое обоснование возможности изучения структуры приземного слоя атмосферного электричества и зон поляризации на границах раздела геологических неоднородностей с целью решения конкретных геолого-геофизических и инженерно-геологических задач, а также приведены практические примеры успешного применения базирующихся на изучении структуры этих полей геоэлектрических методов. Авторы продолжают работать над теоретическим обоснованием рассмотренных методов и построением математической модели физических явлений. Существенное внимание в дальнейших исследованиях в этом направлении будет уделяться также полевым экспериментам.

1. *Неклассическая геофизика: Тез. докл. Междунар. конф.* (г. Саратов, 28 авг. — 1 сент. 2000 г.). — Саратов: ИОФЗ им. О. Шмидта АН РФ, Нижневолжский НИИ геологии и геофизики. Саратов. отд-ние Евразийского геофиз. об-ва, 2000. — 79 с.
2. *Шуман В.Н.* Переходные электромагнитные процессы в расширенном временном интервале: физико-математические модели и особенности // *Геофиз. журн.* — 2001. — 23, № 1. — С. 3–21.
3. *Шуман В.Н.* О теоретических основах современной геоэлектрики // Там же. — 2005. — 27, № 2. — С. 218–234.
4. *Шуман В.Н.* Методы и модели электромагнитных зондирующих систем: состояние, ограничение и новые возможности // Там же. — 2006. — 28, № 1. — С. 17–30.
5. *Шуман В.Н.* Прикладная геоэлектродинамика и магнитотеллурический эксперимент // Там же. — 2007. — 29, № 1. — С. 22–44.
6. *Шуман В.Н.* Электродинамика атмосферы и геоэлектрическая разведка // *Геол. журн.* — 2007. — 29, № 4. — С. 21–30.
7. *Пулинец С.А., Хелай В.В., Боярчук К.А., Ломоносов А.М.* Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы // *Успехи физ. наук.* — 1998. — 168, № 5. — С. 582–589.
8. *Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes* / Ed. M. Hayakawa. — Tokyo: Terra Sci. Publ. Company, 2003. — 996 p.
9. *Калинин А.В., Хмелевской В.К., Владов М.Л. и др.* Современная георадиолоция // *Разведка и охрана недр.* — 2001. — № 3. — С. 2–6.
10. *Габийяр Р., Декок Г., Уэйт Дж.Р.* Радиосвязь между подземными и подводными пунктами // *Заруб. радиоэлектроника.* — 1972. — № 12. — С. 16–34.
11. *Шуман В.Н., Прицепий Т.И.* Оптимальные режимы электромагнитных зондирующих систем с контролируемым возбуждением поля в изотропных средах с дисперсией // *Геофиз. журн.* — 2004. — 26, № 4. — С. 55–62.

12. *Некут А.Г., Снус Б.Р.* Использование электромагнитных методов с контролируемым источником при разведке нефтяных месторождений // Тр. Ин-та инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. – 1989. – 77, № 2. – С. 57–85.
13. *Кинг Р., Смит Г.* Антенны в материальных средах: В 2 кн. – М.: Мир, 1984. – 822 с.
14. *Никольский В.В.* Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Наука, 1978. – 543 с.
15. *Электроразведка:* Справочник геофизика: В 2 кн. // Под. ред. В.К. Хмелевского, В.М. Бондаренко. – М.: Недра, 1989. – Кн.1. – 438 с.; Кн. 2. – 378 с.
16. *Подповерхностная радиолокация* / Под. ред. М.Н. Финкельштейна. – М.: Радиосвязь, 1994. – 216 с.
17. *Шуман В.Н.* Скоростные параметры в электромагнитных георадарных и томографических системах // Геофиз. журн. – 1999. – 21, № 3. – С. 18–28.
18. *Борисенко А.А.* Подземное электромагнитное зондирование с помощью георадаров // Там же. – 2000. – 22, № 5. – С. 120–132.
19. *Вайнштейн А.А.* Распространение импульсов // Успехи физ. наук. – 1976. – 118, вып. 2. – С. 339–367.
20. *Бараш Ю.С., Гинзбург В.Л.* О выражениях для плотности энергии и выделяющегося тепла в электродинамике диспергирующей и поглощающей среды. // Там же. – 1976. – 142, вып. 3. – С. 523–531.
21. *Гололобов Д.В., Москвичев В.Н., Стадник Ю.Н.* Аналитическое и экспериментальное исследование взаимодействия электромагнитных волн с углеводородными залежами // Геология нефти и газа. – 1995. – № 3. – С. 26–30.
22. *Стадник Ю.Н., Довгаль Г.Н., Гололобов Д.В.* Радиоволновая геофизика в Беларуси // Литасфера. – 1998. – № 9. – С. 113–120.
23. *Левашов С.П., Якимчук М.А., Корчагин И.М., Таскинбаев К.М.* Технологія прямих пошуків покладів та результати її застосування на нафтогазових родовищах Західного Казахстану // Геінформатика. – 2002. – № 3. – С. 15–25.
24. *Левашов С.П., Якимчук М.А., Корчагин И.М., Пищаний Ю.М.* Метод електрорезонансного зондування та його можливості при проведенні комплексних геолого-геофізичних досліджень // Геінформатика. – 2003. – № 1. – С. 15–20.
25. *Шуман В.Н.* Фундаментальные модели электромагнитных зондирующих систем // Геофиз. журн. – 2004. – 26, № 1. – С. 42–55.
26. *Дмитриев А.Н.* Геолого-геофизические основы поисков электрически поляризованных объектов – нефтяных и рудных залежей (на примере Западной Сибири): Автореф. дис. д-ра геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 2002. – 39 с.
27. *Pirson S.T.* New electric technique can locate gas and oil // World oil. – 1971. – 172, № 5. – P. 69–72.
28. *Pirson S.J.* Prediction of hydrocarbons in place by magnetoelectrotelluric exploration // Oil and gas. J. – 1976. – 74, № 22. – P. 82–86.
29. *Войтов В.И., Гусев А.С., Козлова Н.С. и др.* Эманионные и электрические эффекты над сложнопостроенными тектоническими структурами (на примере Александровской зоны приазломных поднятий, Беларусь) // Докл. РАН. – 2000. – 370, № 1. – С. 105–108.
30. *Разумных V.* Anomalies in electrostatic fields add to seismic analysis // Petroleum Rev. – 2001. – February. – P. 37.
31. *Шулейкин В.Н.* Использование приземного атмосферного электричества при поиске геоэлектрических неоднородностей и контроле геодинамических процессов // Геофизика XXI столетия – 2001: Сб. тр. Третьих геофизических чтений им. В.В. Федьнского (22–24 февр. 2001 г., г. Москва). – М.: Науч. мир, 2001. – С. 281–285.
32. *Афанасьев Н.Ф.* Композиции многоспектральных аэрокосмических изображений Земли как информационные модели структуры геосистемы // Поиск, изучение и освоение открытий в России. – М., 1992. – С. 2–35.
33. *Рачинский М.З.* Южно-Каспийский бассейн: геологические аспекты перспектив, оценка углеводородного потенциала стратегия поисков месторождений нефти и газа / ГЕОФИЗИКА XXI СТОЛЕТИЯ: 2007 год: Сб. тр. Девярых геофизических чтений имени В.В. Федьнского» (1–3 марта 2007 г., Москва). – Тверь: ООО «Изд-во ГЕРС», 2008. – С. 282–304.
34. *Anderson C., Long A., Ziolkowski A., Hobbs B., Wright D.* Multi-transient EM technology in practice // First break. – 2008. – 26, № 3. – P. 93–102.
35. www.zonge.com/PDF_Papers/IP-Petro_9.pdf
36. *Тимурзиев А.И.* К созданию новой парадигмы нефтегазовой геологии на основе глубинно-фильтрационной модели нефтегазообразования и нефтегазоаккумуляции // Геофизика. – 2007. – № 4. – С. 49–60.
37. *Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н., Таскинбаев К.М.* Поиски и разведка скоплений углеводородов геоэлектрическими методами на нефтяных месторождениях Западного Казахстана // Георесурсы. – 2003. – № 1. – С. 31–37.
38. *Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н., Дегтярь Р.В., Божжежа Д.Н.* Обнаружение и картирование геоэлектрическими методами зон повышенного газоносности на угольных шахтах // Геофизика. – 2006. – № 2. – С. 58–63.
39. *Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н.* Экспресс-технология «прямых» поисков и разведки скоплений углеводородов геоэлектрическими методами: результаты практического применения в 2001–2005 гг. // Геоинформатика. – 2006. – № 1. – С. 31–43.
40. *Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н.* Экспресс-технология поисков и разведки залежей углеводородов геоэлектрическими методами: результаты применения / ГЕОФИЗИКА XXI СТОЛЕТИЯ: 2006 год: Сб. тр. Восьмых геофизических чтений имени В.В. Федьнского» (2–4 марта 2006 г., Москва). – Тверь: ООО «Изд-во ГЕРС», 2007. – С. 416–425.
41. *Levashov S.P., Yakymchuk N.A., Korchagin I.N. et al.* Over-salt and sub-salt gas-bearing layers mapping by geoelectric methods within the salt dome region in Dniper-Donetsk Depression // 69nd EAGE conf. and techn. Exhibition. London, United Kingdom, 11–14 June 2007 // CD-ROM Abstracts volume. P 167, 4 pages.
42. *Levashov S.P., Yakymchuk N.A., Korchagin I.N. et al.* (2007), Drake Passage and Bransfield Strait – new geophysical data and modelling of the crustal structure, in Antarctica: A Keystone in a Changing World – Online Proceed. of the 10th ISAES X / Ed. by A.K. Cooper, C.R. Raymond et al., USGS Open-File Report 2007–1047, Extended Abstract 028, 4 p.
43. *Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н., Червоный Н.П.* Экспресс-технология прямых поисков и разведки скоплений углеводородов геоэлектрическими методами: новые возможности ускорения геологоразведочного процесса на нефть и газ // Нефт. хоз-во. – 2008. – № 2. – С. 112–117.

44. Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н. и др. Рекогносцировочные воздушные и детализационные наземные геоэлектрические исследования на Костанайской нефтегазоперспективной площади // Геоинформатика. – 2008. – № 1. – С. 18–27.
45. Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н., Пищаный Ю.М. Возможности геоэлектрических методов при изучении перспектив нефтегазоносности глубинных горизонтов Днепровско-Донецкой впадины // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – К., 2008. – С. 25–32.
46. Самсонов А.И., Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н. Перспективы нефтегазоносности в Причерноморском регионе по данным геоэлектрических исследований // Геодинамика, тектоника и флюидодинамика нефтегазоносных регионов Украины: Тез. докл. VII Междунар. конф. «Крым-2007» (АР Крым, Симферополь, с. Николаевка, 10–16 сент. 2007 г.). – Симферополь, 2007. – С. 109–111.
47. Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н., Пищаный Ю.М. Применение геоэлектрических методов для изучения площадей распространения минеральных вод // Нові геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища. Матеріали наук. конф., присвяч. пам'яті фундаторів Карпатського відня Ін-ту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України Тараса Зіновійовича Вербицького і Ярослава Станіславовича Сапужака. – Львів: Сполом, 2007. – С. 57–59.
48. Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н. и др. Детальные геоэлектрические исследования нефтегазоперспективных участков при выборе мест заложения скважин // Георесурсы. – 2007. – № 4(23). – С. 24–27.
49. Vokovoy V.P., Levashov S.P., Yakymchuk M.A. et al. Mudslide area and moistening zones mapping with geophysical methods on the slope of the Dniپر river in Kyiv // 65nd EAGE conf. and techn. Exhibition. Stavanger, Norway, 2–5 June 2003. – Poster presentations. Absr. P208, 4 pages. CD-ROM Abstracts vol.
50. Levashov S.P., Yakymchuk M.A., Korchagin I.N. et al. Increased water containing rocks zones searching and mapping by geoelectric methods // Near Surface 2004 – 10th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Utrecht, The Netherlands, 6–9 Sept. 2004. – Extended Abstr. Book & CD-ROM Abstracts vol. P055, 4 p.
51. Levashov S.P., Yakymchuk M.A., Korchagin I.N. et al. Geophysical investigations on the Sophia Kyivska cathedral territory in Kyiv // Near Surface 2004 – 10th European Meet. of Environmental and Engineering Geophysics, Utrecht, The Netherlands, 6–9 Sept. 2004. – CD-ROM Abstracts volume. P033, 4 pages.
52. Levashov S.P., Yakymchuk N.A., Korchagin I.N. et al. The searching and mapping the water-saturated rock by geoelectric methods // 67nd EAGE Conf. and Techn. Exhibition. Madrid, Spain, 13–16 June 2005. – CD-ROM Abstracts vol.
53. Levashov S.P., Yakymchuk N.A., Korchagin I.N. et al. Galindez island ice cap thickness determination by the vertical electric-resonance sounding method // 67nd EAGE conf. and techn. Exhibition. Madrid, Spain, 13–16 June 2005. – CD-ROM Abstracts vol.
54. Levashov S.P., Yakymchuk M.A., Korchagin I.N. et al. Geophysical investigations on the Zvirynets' caves territory in Kyiv // Near Surface 2005 – 11th Europ. Meet. of Environmental and Engineering Geophysics, Palermo, Italy, 5–8 Sept. 2005. – CD-ROM Abstracts vol. P069, 4 p.
55. Levashov S.P., Yakymchuk M.A., Korchagin I.N., Pyschaniy Ju.M. Express-technology of geoelectric and seismic-acoustic investigations in ecology, geophysics and civil engineering // Near Surface 2005 – 11th Europ. Meet. of Environmental and Engineering Geophysics, Palermo, Italy, 5–8 Sept. 2005. – CD-ROM Abstracts volume. P046, 4 p.
56. Levashov S.P., Yakymchuk M.A., Korchagin I.N. et al. Geophysical Investigations of Soil Stabilization Quality on the Metro Unit underground Construction in Kyiv // Near Surface 2005 – 11th Europ. Meet. of Environmental and Engineering Geophysics, Palermo, Italy, 5–8 Sept. 2005. – CD-ROM Abstracts volume. P016, 4 p.
57. Levashov S.P., Yakymchuk N.A., Korchagin I.N. et al. Geophysical investigations within the cave field of the Kyiv-Pechersk Lavra // 68nd EAGE Conf. and Techn. Exhibition. Vienna, Austria, 12–15 June 2006. – CD-ROM Abstracts volume. P223, 4 p.
58. Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н., Пищаный Ю.М. Изучение строения кристаллического массива геоэлектрическими методами в восточной части Коростенского плутона // Геоинформатика. – 2005. – № 4. – С. 20–23.
59. Левашов С.П., Бахмутов В.Г., Корчагин И.Н. и др. Геоэлектрические исследования во время проведения сезонных работ 11-ой Украинской антарктической экспедиции // Геоинформатика. – 2006. – № 2. – С. 24–33.
60. Бенько В.М., Дячук В.В., Мачужак М.И. и др. Кобзевское месторождение – основной объект поисково-разведочных работ и увеличения добычи газа ДК «Укр-газвдобування» // Матеріали Междунар. науч.-техн. конф. «Геопетроль-2006» (Закопане, 18–21 сент. 2006 г.). – Краков, 2006. – С. 855–858.
61. Атлас месторождений нефти и газа Украины. – В 6 т.: Т. 3. Восточный нефтегазоносный регион. – Львов, 1999. – С. 1031–1038.
62. Гладченко Ю.А. Изучение Шебелинской структуры сейсморазведкой МОВ–ОГТ // Науч. вестн. НГУ. – 2007. – № 11. – С. 38–44.
63. Малиновский А.К. Результаты моделирования соляного штока в ядре Шебелинской структуры по данным гравиразведки // Там же – С. 45–49.

Поступила в редакцию 15.04.2008 г.