



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-30-37>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.371:550.837.6

## ПРАКТИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ СПОСОБА РЕГИСТРАЦИИ ГРАНИЦ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ СОБСТВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗАЛЕЖЕЙ

В. Ф. ЯНУШКЕВИЧ<sup>1</sup>, Д. В. ДРАЧЁВ<sup>2</sup>, В. М. ГРОМЫКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой  
(г. Новополоцк, Республика Беларусь)

<sup>2</sup>ООО «ПУВА» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 24.06.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

**Аннотация.** Проведены теоретический анализ взаимодействия двухчастотных и модулированных электромагнитных волн с анизотропными средами над углеводородными залежами и компьютерное моделирование. Установлен частотный диапазон изменения электродинамических параметров среды над залежью с проявлением аномалий напряженности электрического поля. Даны рекомендации по применению модулированных сигналов для повышения точности определения границ углеводородов на основе измерения фазовых характеристик поверхностного импеданса среды над углеводородами. Разработан аппаратно-программный комплекс для регистрации напряженности электрического поля в режимах приема зондирующих сигналов и собственного излучения залежей углеводородов. Выполнены экспериментальные исследования на газовых месторождениях Сирии. Показаны способы повышения информативности разработанного способа и аппаратуры при проведении поисковых работ на объектах углеводородов. Результаты исследований могут быть использованы в устройствах выделения залежей нефти и газа в геофизике.

**Ключевые слова:** углеводородная залежь, электромагнитная волна, полевые исследования, двухчастотный сигнал, геологический профиль, модулированный сигнал, частота, скважина, граница залежи, аномалия электрического поля.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Янушкевич, В. Ф. Практическая апробация способа регистрации границ углеводородов на основе измерения собственного излучения залежей / В. Ф. Янушкевич, Д. В. Драчёв, В. М. Громыко // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 4. С. 30–37. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-30-37>.

## PRACTICAL TESTING OF A METHOD FOR RECORDING HYDROCARBON BOUNDARIES BASED ON MEASURING THE DEPOSITS' OWN RADIATION

VIKTOR F. YANUSHKEVICH<sup>1</sup>, DMITRY V. DRACHEV<sup>2</sup>, VALENTIN M. GROMYKO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (Novopolotsk, Republic of Belarus)

<sup>2</sup>LLC "PUVA" (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 24.06.2024

**Abstract.** The article provides a theoretical analysis of the interaction of dual-frequency and modulated electromagnetic waves with anisotropic media above hydrocarbon deposits and computer modeling. The frequency

range of changes in the electrodynamic parameters of the environment above the deposit with the manifestation of anomalies in the electric field strength has been established. Recommendations are given for the use of modulated signals to improve the accuracy of determining the boundaries of hydrocarbons based on measuring the phase characteristics of the surface impedance of the medium above the hydrocarbons. A hardware and software complex has been developed for recording the electric field strength in the modes of receiving probing signals and the natural radiation of hydrocarbon deposits. Experimental studies were carried out in gas fields of Syria. Methods are shown to increase the information content of the developed method and equipment when carrying out prospecting work at hydrocarbon sites. The research results can be used in devices for identifying oil and gas deposits in geophysics.

**Keywords:** hydrocarbon reservoir, electromagnetic wave, field research, dual-frequency signal, geological profile, modulated signal, frequency, well, reservoir boundary, electric field anomaly.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Yanushkevich V. F., Drachev D. V., Gromyko V. M. (2024) Practical Testing of a Method for Recording Hydrocarbon Boundaries Based on Measuring the Deposits' Own Radiation. *Doklady BGUIR*. 22 (4), 30–37. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-30-37> (in Russian).

## Введение

Актуальность рассматриваемых в статье задач заключается в отработке методики полевых исследований углеводородных залежей (УВЗ). Современная геоэлектроразведка основывается на большом опыте проведения поисковых работ, например, на оценке подъема (пучения) поверхности из-за парового гравитационного дренажа на месторождении нефтеносных песков Hangingstone в Альберте (Канада) путем суммирования интерферограмм радара с дифференциальной синтезированной апертурой (SAR) [1]. Звучастотный магнитотеллурический метод с управляемым источником отличается экономической эффективностью и широким применением в геофизическом мониторинге [2]. За последнее десятилетие электромагнитная разведка значительно изменилась, улучшились разрешающая способность и надежность, став, таким образом, незаменимыми при разведке нетрадиционных углеводородов [3]. На основе карт скорости деформаций грунтов района исследований составляются тематические карты зон активного проседания грунтов, способствующие развитию технологий обнаружения полезных ископаемых [4].

Реализация методологии [5] продемонстрирована на примере подземного хранения газа. Сеть тектонических трещин, картированная с помощью данных дистанционного зондирования, может быть использована для объяснения и прогнозирования продуктивности скважин на нефтяных месторождениях [6]. Для дифференциации исследуемых сред при проведении поисковых работ применяются современные методы и алгоритмы обработки космической, геолого-геофизической и геохимической информации [7]. Геоэлектроразведка ориентируется на расширение возможностей электромагнитных методов для поиска нефти и газа [8, 9].

Интерпретация результатов поисковых работ [10] при решении задач геофизики и геоморфологии проводится с помощью модифицированного метода  $S$ -аппроксимаций. Методы решения трехмерных задач применяются для реализации различных способов при поиске нефти и газа с построением электродинамических моделей сред над залежами углеводородов [11, 12].

В статье представлены быстрые и строгие 2.5D-алгоритмы прямого и инверсного измерений для глубинных электромагнитных приложений, которые включают измерения в межскважинных пространствах и с контролируемым источником [13]. Внедрение электромагнитных методов для поиска углеводородов позволяет осуществлять обнаружение УВЗ по аномальным характеристикам электромагнитных волн (ЭМВ) на основе применения частотно-модулированных и двухчастотных сигналов [14, 15].

## Методология исследований

Для проведения экспериментальных исследований на месторождениях углеводородов проводились теоретический анализ взаимодействия двухчастотных и модулированных ЭМВ с анизотропными средами над УВЗ и компьютерное моделирование. Воздействие гармонических ЭМВ на анизотропную среду над месторождениями нефти и газа рассмотрено в [8].

Исследование характеристик среды при воздействии двухчастотных ЭМВ на исследуемый геологический профиль является актуальным с теоретической и практической точек зрения, по-

сколькo связано с разработкой новых технологий для модернизации действующих электромагнитных методов поиска залежей. Этот подход оправдан, так как залежь углеводородов может быть представлена излучающей резонансной системой, генерирующей тональное колебание. На основе исследований [8] данный сигнал представляется гармоническим, воздействующим на пространственные ЭМВ, распространяющиеся вдоль поверхности раздела сред «воздух–анизотропная среда». Суперпозиция таких волн дает двухчастотные ЭМВ, взаимодействующие с анизотропной средой. Примером подобного взаимодействия является эффект непреднамеренного или умышленного воздействия гармонического сигнала на характеристики исследуемого электромагнитного поля, создаваемого пространственными ЭМВ.

Представляют интерес как отражательные характеристики анизотропной среды над УВЗ при двухчастотном воздействии, так и аномальные изменения напряженности электрического поля двухчастотных ЭМВ на альтернативных частотах, результаты моделирования распространения ЭМВ над анизотропной средой, анализ характеристик режимов двухчастотных сигналов. Исходя из этого, проведем анализ процесса взаимодействия ЭМВ с анизотропной средой над УВЗ с двухчастотным сигналом вида

$$\vec{e}(t) = \vec{e}_1(t) + \vec{e}_2(t) = E_1 \cos \omega_1 t + E_2 \cos \omega_2 t, \quad (1)$$

где  $E_1, E_2, \omega_1, \omega_2$  – амплитуда и частота двух ЭМВ соответственно.

Введем коэффициенты отношения амплитуд двух волн и их частот:

$$\begin{cases} k_E = \frac{E_2}{E_1}; \\ k_\omega = \frac{\omega_1}{\omega_2}. \end{cases} \quad (2)$$

Рассмотрим взаимодействие сложного сигнала (1) с различными соотношениями параметров формируемых ЭМВ с анизотропным наполнителем. Информативность методов поиска УВЗ при воздействии двухчастотных ЭМВ на исследуемый геологический профиль существенно возрастает за счет вариации коэффициентов отношения амплитуд и частот двух волн (2). Координатное распределение напряженности электрического поля ЭМВ позволяет записать компоненты тензора диэлектрической проницаемости  $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2, \dot{\epsilon}_3$  для двухчастичного потока в виде [9]:

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_1 = \epsilon_r \frac{\tilde{\omega}_1}{\omega_2} + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{pi}^2 \tilde{\omega}_1}{\omega_2} \frac{\omega_{ri}^2 - \tilde{\omega}_1^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{ri}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2} - \right. \\ \left. - j \left[ \frac{-\epsilon_r k_E (1 - k_\omega) \sin \alpha t}{1 + k_E \cos \alpha t} + \frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{pi}^2 v_i}{\omega_2} \frac{\tilde{\omega}_1^2 + v_i^2 + \omega_{ri}^2}{(v_i^2 + \omega_{ri}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2} \right] \right\}; \\ \dot{\epsilon}_2 = \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{pi}^2 \omega_{ri}}{\omega_2} \frac{\omega_{ri}^2 - \tilde{\omega}_1^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{ri}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2} - \frac{2j \tilde{\omega}_1 v_i \omega_{pi}^2 \omega_{ri}}{[(v_i^2 + \omega_{ri}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2] \omega_2} \right\}; \\ \dot{\epsilon}_3 = \epsilon_r \frac{\tilde{\omega}_1}{\omega_2} + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{pi}^2 \tilde{\omega}_1}{\omega_2} \frac{1}{v_i^2 + \tilde{\omega}_1^2} - j \left[ \frac{-\epsilon_r k_E (1 - k_\omega) \sin \alpha t}{1 + k_E \cos \alpha t} + \frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{pi}^2 v_i}{\omega_2} \frac{1}{\tilde{\omega}_1^2 + v_i^2} \right] \right\}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\omega_{pi}, \omega_{ri}$  – частота плазменных колебаний и гиротропная частота соответственно;  $v_i$  – частота столкновения частиц;  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость профиля;  $\sigma_r$  – проводимость профиля;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;  $\tilde{\omega}_1 = \omega_2 [k_\omega + k_E^2 + k_E (1 - k_\omega) \cos \alpha t]$ ;  $\alpha = \omega_2 - \omega_1 = \omega_2 (1 - k_\omega)$  – разность частот двух ЭМВ.

Выражения (3) содержат информацию об отклике исследуемой среды. Установлены частоты и амплитуды, при которых наблюдаются изменения электродинамических параметров среды над залежью. Проведенный теоретический анализ показал, что аномалии напряженности электрического поля проявляются в диапазоне частот 1–30 МГц. Если одна из ЭМВ (1) представляет собой модулированный сигнал, то на основе измерения фазовых характеристик поверхностного импеданса среды над УВЗ на несущих частотах 0,1–2,0 ГГц при использовании частоты модуля-

ции  $F = 1-100$  МГц с коэффициентами амплитудной модуляции в диапазоне 0,1–1,0 при индексах частотной модуляции в интервале 1–95 повышается точность определения границ углеводородов.

### Результаты исследований и их обсуждение

Представим разработанный аппаратно-программный комплекс, позволяющий осуществлять регистрацию напряженности электрического поля в режимах приема зондирующих сигналов и собственного излучения залежей углеводородов. Аппаратно-программный комплекс состоит из радиопередающего и радиоприемного устройств, перемещаемых вдоль исследуемого профиля с сохранением фиксированного расстояния 5–12 м, и программного обеспечения. Основные функции специального программного компонента: регистрация напряженности электрического поля; запись сигналов по трем измерительным каналам; адаптивная цифровая обработка; привязка измерительных сигналов к координатам измеряемого профиля с помощью приемника GPS; обработка измерительных сигналов; выделение аномалий напряженности электрического поля; отображение координат границ углеводородов. Использовалась вертикальная поляризация ЭМВ, принимался суммарный сигнал вспомогательного передатчика подсвета и собственного излучения залежи, измерялась величина напряженности электрического поля в точках измерения исследуемого профиля, по аномальным значениям напряженности электрического поля определялась граница залежи углеводородов. Экспериментальные исследования проводились на месторождениях углеводородов в Сирии на объектах Charefa, Deratia, Zumlat al Maharr.

На объекте Charefa (рис. 1) полевые наблюдения выполнялись в 2021 г. в два этапа: 16 и 20 июня с целью тестирования и калибровки оборудования и со 2 по 16 июля – для поиска и регистрации аномалий электромагнитного поля, соответствующих залежам углеводородов. Были отработаны шесть маршрутов R1–R6 общей протяженностью 17,89 км, из них пять – в направлении юг-север и один – запад-восток. На карте рис. 1 обозначены эксплуатируемые скважины CH2, CH5, CH6 и CH104. Отработанные маршруты с цветокодировкой напряженности электрического поля и скважины CH2, CH5, CH6 нанесены на карту, привязанную по предоставленным координатам устья скважины CH104.

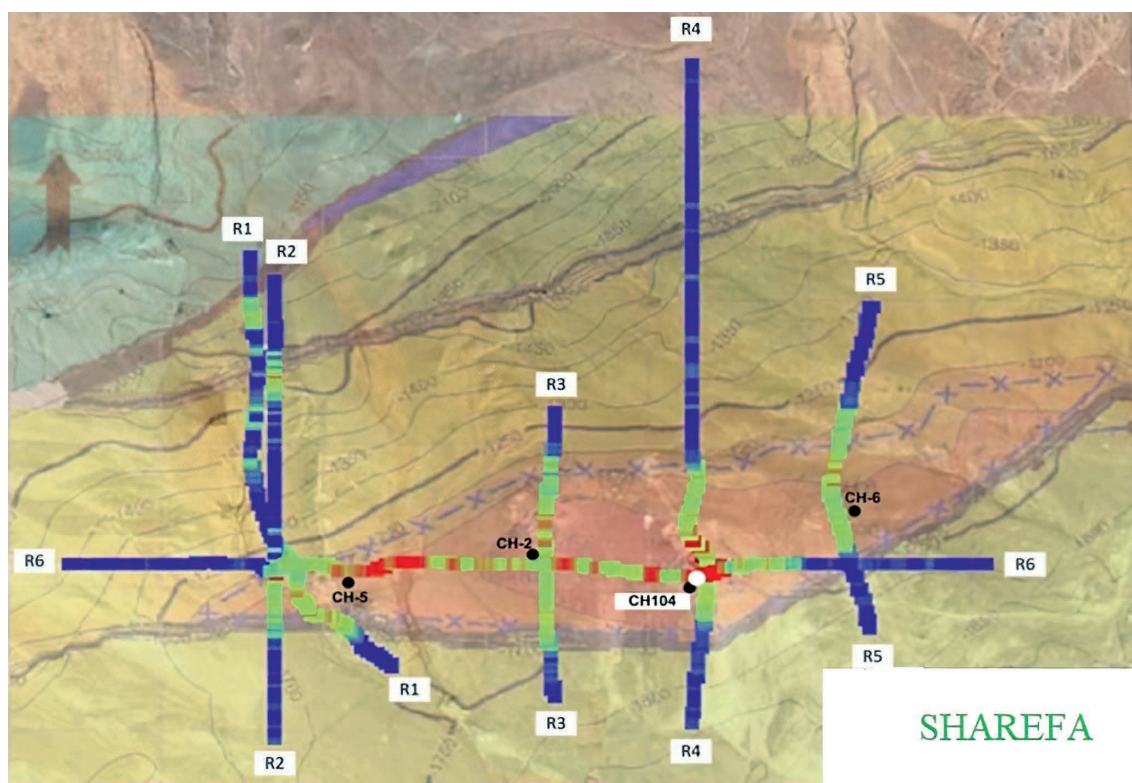


Рис. 1. Экспериментальные исследования на месторождении углеводородов на объекте Charefa  
Fig. 1. Experimental studies on hydrocarbon deposits at the Charefa site

Регистрация напряженности электрического поля на объекте Charefa на маршруте R3 вдоль геологического профиля на участках отсутствия углеводородов (в данном случае газа) показана на рис. 2.

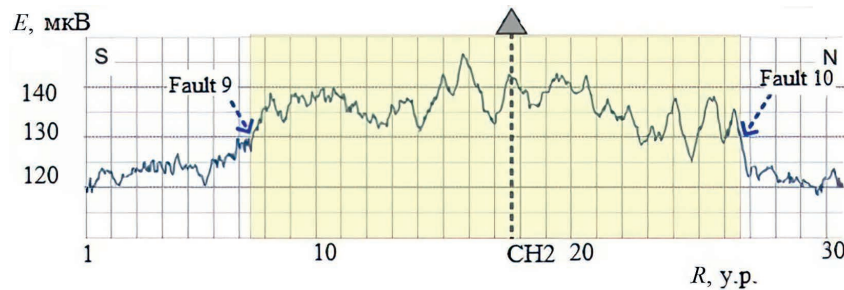


Рис. 2. Регистрация напряженности электрического поля на месторождении углеводородов на объекте Charefa на маршруте R3  
Fig. 2. Recording electric field strength at a hydrocarbon field at the Charefa site on route R3

Точки измерения с расстоянием  $R$  (у.р. – условное расстояние) между участками определялись согласно масштабу карты. Так, границы залежи (реперные точки) соответствовали координатам: Fault 9 –  $34^{\circ}30'56.90''$  с. ш.,  $37^{\circ}28'05.30''$  в. д.; Fault 10 –  $34^{\circ}31'33.56''$  с. ш.,  $37^{\circ}28'05.98''$  в. д. В точках аномалий электромагнитного поля, соответствующих залежам углеводородов, напряженность электрического поля изменялась от 130 (на границах залежи) до 145 мкВ (максимальное значение). В пределах изучаемого участка на всех маршрутах уверенно выделялись границы месторождения. При сопоставлении их с геологической картой по целевому горизонту отмечалось хорошее совпадение выделенных реперных точек с границами залежи. Все добывающие на данной залежи скважины находятся в пределах установленных аномалий напряженности электрического поля.

На объекте Deratia полевые наблюдения были выполнены 14–15 июля 2021 г. в объеме 15,1 км. Четыре маршрута имели направление юг-север, а два отрабатывались в направлениях юго-запад – северо-восток. На рассматриваемой залежи к настоящему времени пробурено пять скважин (DA1, DA2, DA3, DA4, DA5), четыре из которых эксплуатируются (DA1, DA2, DA4, DA5), а в одной (DA3), по имеющимся данным, притока газа не было. Еще одна скважина на этом объекте – проектная (DA6). На данном месторождении на маршрутах надежно выделяются разрывные нарушения, которые ограничивают эту газовую залежь с юга, запада и севера. Максимальные значения параметра отмечаются в центральной части объекта в районе скважины DA2, в которой самый высокий на сегодняшний день текущий дебит – 153 тыс. м<sup>3</sup>. Отмечается тенденция уменьшения в пределах участка значений аномалии обобщенного параметра в северном и восточном направлениях в районе расположения скважин DA4 и DA5, что соответствует текущим дебитам скважин (34 и 40 тыс. м<sup>3</sup> соответственно). Полученные данные позволяют предположить наличие газа в проектной скважине DA6 и в районе вскрытия целевого горизонта субгоризонтальным стволом скважины DA3.

Регистрация напряженности электрического поля на объекте Deratia на маршруте R6 вдоль геологического профиля на участках отсутствия газа показана на рис. 3.

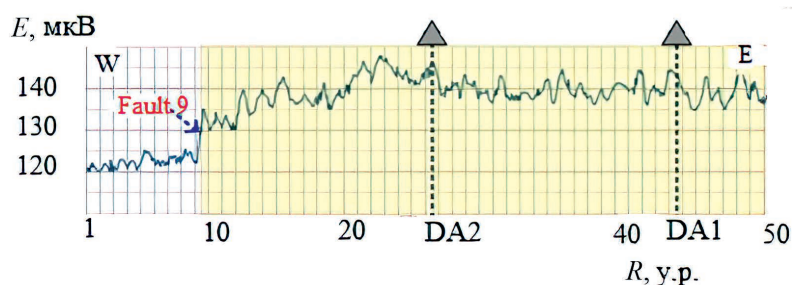


Рис. 3. Регистрация напряженности электрического поля на месторождении углеводородов на объекте Deratia на маршруте R6  
Fig. 3. Recording electric field strength at a hydrocarbon field at the Deratia site on route R6

Аномалии напряженности электрического поля над углеводородами лежат в пределах от 130 (на границах залежи) до 148 мкВ (максимальное значение). На данном маршруте границам залежи соответствовали координаты реперной точки Fault 9 –  $34^{\circ}05'28.89''$  с. ш.,  $36^{\circ}40'57.62''$  в. д.

Полевые работы на объекте Zumlat al Maharr проводились в период с 13 июня по 4 июля 2021 г. Всего было отработано 20 профилей общей протяженностью 63,6 км. Съёмки проводились в пешем и автомобильном вариантах. Шесть маршрутов имели направление запад-восток, восемь – с юга на север. Еще шесть дополнительных маршрутов проходили по диагонали демонстрационного участка – три с юго-востока на северо-запад, а три – с юго-запада на северо-восток.

Регистрация напряженности электрического поля на объекте Zumlat al Maharr на маршруте R2 вдоль геологического профиля на участках отсутствия газа показана на рис. 4. Аномалии напряженности электрического поля над углеводородами лежат в пределах от 140 (на границах залежи) до 160 мкВ (максимальное значение). На данном маршруте границам залежи соответствовали координаты реперных точек: R2-1:  $34^{\circ}45'50.93''$  с. ш.,  $37^{\circ}36'26.52''$  в. д.; R2-2:  $34^{\circ}45'50.33''$  с. ш.,  $37^{\circ}36'45.25''$  в. д.; R2-3:  $34^{\circ}45'50.35''$  с. ш.,  $37^{\circ}36'59.03''$  в. д.; R2-4:  $34^{\circ}45'50.36''$  с. ш.,  $37^{\circ}37'48.58''$  в. д.

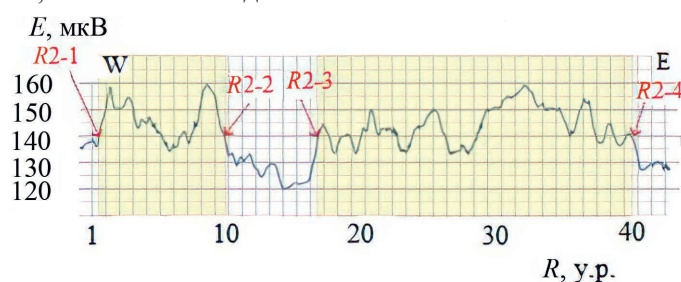


Рис. 4. Регистрация напряженности электрического поля на месторождении углеводородов на объекте Zumlat al Maharr на маршруте R2

Fig. 4. Recording electric field strength at a hydrocarbon field at the Zumlat al Maharr site on route R2

Результаты проведенных на объекте Zumlat al Maharr работ позволили выявить в центральной части участка аномальную зону повышенных значений напряженности электрического поля, перспективную с точки зрения наличия углеводородов. В результате бурения газ в этой скважине был получен.

### Заключение

Теоретический анализ взаимодействия двухчастотных и модулированных электромагнитных волн с анизотропными средами над углеводородными залежами и экспериментальные исследования на месторождениях углеводородов в Сирии показали, что:

- существует частотный диапазон 1–30 МГц изменения электродинамических параметров среды над залежью, в котором проявляются аномалии напряженности электрического поля;
- применение модулированных сигналов повышает точность определения границ углеводородов при измерении фазовых характеристик поверхностного импеданса среды над углеводородными залежами на несущих частотах 0,1–2,0 ГГц с частотой модуляции  $F = 1–100$  МГц при коэффициентах амплитудной модуляции в диапазоне 0,1–1,0 и индексах частотной модуляции в интервале 1–95;
- результаты экспериментальных исследований подтвердили 100-процентное наличие углеводородов;
- над залежью наблюдается рост собственного излучения, которое может быть зафиксировано за счет применения вспомогательного передатчика подсвета в диапазоне 1–30 МГц;
- применение нескольких частот подсвета может повысить информативность методов поиска и точность определения границ углеводородов.

### Список литературы

1. Khakim, M. Y. N. Detection of Localized Surface Uplift by Differential SAR Interferometry at the Hangingstone Oil Sand Field, Alberta, Canada / M. Y. N. Khakim, T. Takeshi, M. Toshifumi // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2013. Vol. PP, Is. 99. P. 1–11.

2. Research on 3D Time-Lapse Electric Field Inversion Algorithm for Controlled Source Audio-Frequency Magnetotelluric Method / Q. Sun [et al.] // *Appl. Sci.* 2024. No 14. <https://doi.org/10.3390/app14041560>.
3. Yan, L. Advancements in Controlled Source Electromagnetic Methods for Prospecting Unconventional Hydrocarbon Resources in China / L. Yan // *Surv Geophys.* 2024. No 45. P. 239–276. <https://doi.org/10.1007/s10712-023-09808-6>.
4. Analysis of Active Ground Subsidence Zones in Guangzhou City Using ASAR Persistent Scatterer Interferometry / Qing Zhao [et al.] // *Urban Remote Sensing Event.* 2009. P. 1–5.
5. Karger, M. The Early Detection of Semi-Permeable Filtration Barriers by Using SAR Interferometry / M. Karger // *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS).* 2014. P. 250–253.
6. Shuvaeva, M. Structural Model of Oil Field Limestone Reservoir in Denisov Depression Based on Alos Palsar Images and Seismic Exploration Data / M. Shuvaeva, D. Trofimov, A. Zakharov // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.* 2012. P. 2726–2728.
7. Трофимов, Д. М. Современные методы и алгоритмы обработки космической, геолого-геофизической и геохимической информации / Д. М. Трофимов, В. Н. Евдокимова, М. К. Шуваева. М.: Физматлит, 2012.
8. Гололобов, Д. В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д. В. Гололобов. Минск: Бестпринт, 2009.
9. Янушкевич, В. Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей / В. Ф. Янушкевич. Новополоцк: Полоцк. гос. ун-т, 2017.
10. Степанова, И. Э. Об интерпретации больших объемов данных гравимагниторазведки с помощью модифицированного метода  $S$ -аппроксимаций / И. Э. Степанова, Д. Н. Раевский, А. В. Щепетиллов // *Физика Земли.* 2017. № 1. С. 123–137.
11. Решение трехмерных нестационарных задач импульсной электроразведки / М. И. Иванов [и др.] // *Автоматрия.* 2007. Т. 43, № 2. С. 33–44.
12. Сравнение методов решения трехмерных задач становления поля с использованием аппроксимаций в частотной и временной областях / М. Г. Персова [и др.] // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации.* 2013. № 2. С. 127–138.
13. 2.5D Forward and Inverse Modelling for Interpreting Low-Frequency Electromagnetic Measurement / A. Abubakar [et al.] // *Geophysics.* 2008. Vol. 73, No 4. P. 1JA–Z66.
14. Взаимодействие ЧМ-сигналов с анизотропной средой / Д. В. Гололобов [и др.] // *Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: сб. матер. 2-й Междунар. науч.-техн. конф., 15–17 мая 2002 г. Новополоцк, 2002.* С. 300–303.
15. Interaction of Two-Frequency Electromagnetic Waves with Anisotropic Media Over Hydrocarbon Accumulation / V. F. Yanushkevich [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series.* 2022.

## References

1. Khakim M. Y. N., Takeshi T., Toshifumi M. (2013) Detection of Localized Surface Uplift by Differential SAR Interferometry at the Hangingstone Oil Sand Field, Alberta, Canada. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* PP (99), 1–11.
2. Sun Q., Tan H., Wan W., Hu Q. (2024) Research on 3D Time-Lapse Electric Field Inversion Algorithm for Controlled Source Audio-Frequency Magnetotelluric Method. *Appl. Sci.* (14). <https://doi.org/10.3390/app14041560>.
3. Yan L. (2024) Advancements in Controlled Source Electromagnetic Methods for Prospecting Unconventional Hydrocarbon Resources in China. *Surv Geophys.* (45), 239–276. <https://doi.org/10.1007/s10712-023-09808-6>.
4. Qing Zhao, Hui Lin, Yuanzhi Zhang, Liming Jiang, Fulong Chen, Shilai Cheng (2009) Analysis of Active Ground Subsidence Zones in Guangzhou City Using ASAR Persistent Scatterer Interferometry. *In Urban Remote Sensing Event.* 1–5.
5. Karger M. (2014) The Early Detection of Semi-Permeable Filtration Barriers by Using SAR Interferometry. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS).* 250–253.
6. Shuvaeva M., Trofimov D., Zakharov A. (2012) Structural Model of Oil Field Limestone Reservoir in Denisov Depression Based on Alos Palsar Images and Seismic Exploration Data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.* 2726–2728.
7. Trofimov D. M., Evdokimova V. N., Shuvaeva M. K. (2012) *Modern Methods and Algorithms for Processing Space, Geological, Geophysical and Geochemical Information.* Moscow, Fizmatlit Publ. (in Russian).
8. Gololobov D. V. (2009) *Interaction of Electromagnetic Waves and Hydrocarbon Deposits.* Minsk, Bestprint Publ. (in Russian).
9. Janushkevich V. F. (2017) *Electromagnetic Methods for Searching and Identifying Hydrocarbon Deposits.* Novopolock, Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (in Russian).

10. Stepanova I. E., Raevsky D. N., Shchepetilov A. V. (2017) On the Interpretation of Large Volumes of Gravitational Magnetic Survey Data Using the Modified *S*-Approximation Method. *Physics of the Earth*. (1), 123–137 (in Russian).
11. Ivanov M. I., Kateshov V. A., Kremer I. A., Urev M. V. (2007) Solution of Three-Dimensional Non-Stationary Problems of Pulsed Electrical Prospecting. *Autometry*. 43 (2), P. 33–44 (in Russian).
12. Persova M. G., Soloveychik Yu. G., Aleksanova E. D., Blinova M. E., Guseinov R. G., Pugin A. V., et al. (2013) Comparison of Methods for Solving Three-Dimensional Problems of Field Formation Using Approximations in the Frequency and Time Domains. *Reports of the Academy of Sciences of Higher School of the Russian Federation*. (2), 127–138 (in Russian).
13. Abubakar A., Habashy T. M., Druskin V. L., Knizhnerman L., Alumbaugh D. (2008) 2.5D Forward and Inverse Modelling for Interpreting Low-Frequency Electromagnetic Measurement. *Geophysics*. 73 (4), 1JA–Z66.
14. Gololobov D. V., Tsyvis N. V., Kalintsev S. V., Khadyko D. L., Yanushkevich V. F. (2002) Interaction of FM Signals with an Anisotropic Medium. *Problems of Design and Production of Radio-Electronic Equipment. Collection of Mats 2 Int. Scientific-Technical Conferences, May 15–17, Novopolotsk*. 300–303 (in Russian).
15. Yanushkevich V. F., Dauhiala D. A., Adamovich A. L., Abramenska S. N., Kalintsau S. V. (2022) Interaction of Two-Frequency Electromagnetic Waves with Anisotropic Media Over Hydrocarbon Accumulation. *Journal of Physics: Conference Series*.

### Вклад авторов

Янушкевич В. Ф. выполнил теоретическое обоснование, разработал методику проведения испытаний, интерпретировал полученные результаты, подготовил материалы статьи.

Драчёв Д. В. осуществил подготовку оборудования и экспериментальные исследования.

Громько В. М. отвечал за интерпретацию полученных результатов испытаний.

### Authors' contribution

Yanushkevich V. F. performed the theoretical substantiation, developed the test methodology and interpretation of the results obtained, and prepared the materials for the article.

Drachev D. V. carried out equipment preparation and experimental research.

Gromyko V. M. was responsible for the interpretation of the test results.

### Сведения об авторах

**Янушкевич В. Ф.**, канд. техн. наук, доц. каф. энергетики и электроники, Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой

**Драчёв Д. В.**, дир. ООО «ПУВА»

**Громько В. М.**, вед. геолог ООО «ПУВА»

### Адрес для корреспонденции

211501, Республика Беларусь,  
г. Новополоцк, ул. Молодежная, 189, к. 81  
Полоцкий государственный университет  
имени Евфросинии Полоцкой  
Тел.: +375 29 514-20-30  
E-mail: v.yanushkevich@psu.by  
Янушкевич Виктор Францевич

### Information about the authors

**Yanushkevich V. F.**, Cand. of Sci., Associate Professor at the Department of Power Engineering and Electronics, Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk

**Drachev D. V.**, Director of LLC “PUVA”

**Gromyko V. M.**, Leading Geologist of LLC “PUVA”

### Address for correspondence

211501, Republic of Belarus,  
Novopolotsk, Molodezhnaya St., 189, room 81  
Euphrosyne Polotskaya  
State University of Polotsk  
Tel.: +375 29 514-20-30  
E-mail: v.yanushkevich@psu.by  
Yanushkevich Viktor Frantsevich