



3(375).2023

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Геология, Геофизика

**и разработка
нефтяных и газовых
месторождений**

**Geology,
geophysics
and development
of oil and gas fields**

THE STRUCTURE OF THE EARTH'S CRUST AND PROSPECTS FOR OIL AND GAS POTENTIAL OF THE TERRITORY OF THE SYRIAN ARAB REPUBLIC ACCORDING TO THERMOVISION SOUNDING DATA

K.M. Karimov, A. Al Ali, M.A. Lonshakov

Kazan (Volga region) Federal University

Karimov Kamil Midkhatovich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor of the Department of Geophysics and Geoinformation Technologies, Kazan (Volga Region) Federal University, kamil1955@inbox.ru

Al Ali Ahmad, PhD student, Department of Geophysics and Geoinformation Technologies, Kazan (Volga Region) Federal University, alali.syy@gmail.com

Lonshakov Marat Andreevich, undergraduate, Kazan Federal University, maratlonsh@gmail.com

ABSTRACT: The question of the tectonic formation of block-fault structures under the conditions of rifting and the connection with the oil-bearing provinces of Syria has been studied. The heterogeneous structure and the main factors of the formation of the Earth's crust are reflected in the models of deep heat sources and block-fault structures of Thermovision sounding obtained by spectral-zonal Terra-MODIS and Landsat-8 zonal images. It has been established that the effectiveness of Thermovision Tomography of the geological environment in the search for hydrocarbons at great depths is based on the study of natural channels of fluid migration in permeable horizons and accumulation of fluids in porous multi-storey chambers that can be natural reservoirs for hydrocarbons. Tectonic basement ledges and complexly built sleeve-shaped structures as geological objects for the search for hydrocarbons in the sedimentary cover are one of the reserves of oil and gas production on the territory of the Syrian Arab Republic.

KEY WORDS: Syrian Arab Republic, thermovision sounding, satellite imagery, geological environment, block-fault structure, oil and gas potential.

INTRODUCTION

Ensuring the growth of hydrocarbon resources on the territory of the Syrian Arab Republic (SYR) is associated with the optimization of various cycles of the geological exploration process. This is the primary problem for modern geophysical methods. The current approaches to studying the structure of the environment include the use of a seismic method and well logging, which require time and a significant amount of capital investment. There is a question about the creation of deep models in the framework of gradient media due to the insufficient effectiveness of the methodology for performing ground-based geophysical observations.

The modern structure of the Earth's crust in the territory of the SYR was studied on the basis of a priori geological and geophysical information, which was published in a number of works [1–8]. The Palmyrid fold belt in the central part of Syria [1], [2], the Aleppo uplift [3], [4], the Euphrates graben fault system in the eastern part [5], [6], [7], [8], the Jebel zone Abd al-Aziz and Sinjar in the northeast [7], [9]. The zoning of hydrocarbon deposits in the main provinces of Syria [7], [8] was carried out with an overlay on the topographic scheme. The general conclusion following from the review is that to further increase the detail and information content, it is advisable to use modern geoinformation technologies. In particular, it is possible to use space spectral-zonal sounding with a high spatial resolution of the recorded infrared signals. This approach significantly expands the practical possibility of a non-contact study of the deep structure and the search for new deposits for the reproduction of the raw material base of the SYR. The method of thermovision remote sounding of the Earth's crust (EC), within which the tomographic approach [10] is applied in the study of the endogenous thermal field (TF), is aimed at increasing the detail of the study of the geological environment when predicting oil and gas accumulation zones in the basement and sedimentary cover.

Methodological substantiation and practical testing of the Thermovision Tomography (TVT) technology of the structure and physical state of the environment of the largest oil and gas provinces of the northern part of the Arabian platform (*Palmyride, Aleppo, Rutbah, Jebel Al Arab, Jebel Abd el Aziz, Euphrate, Bilas and Bishri*) becomes an urgent task and a promising scientific direction for forecasting hydrocarbon (HC) deposits in other regions. The purpose of the work was to study the geothermal structure of the Earth's crust of Syria in the forecast of hydrocarbon deposits based on thermovision remote sounding. The object of the study is the methods of processing and interpreting space

spectrozonol images in the thermal infrared wavelength range in relation to the territory of the SYR (Fig. 1).

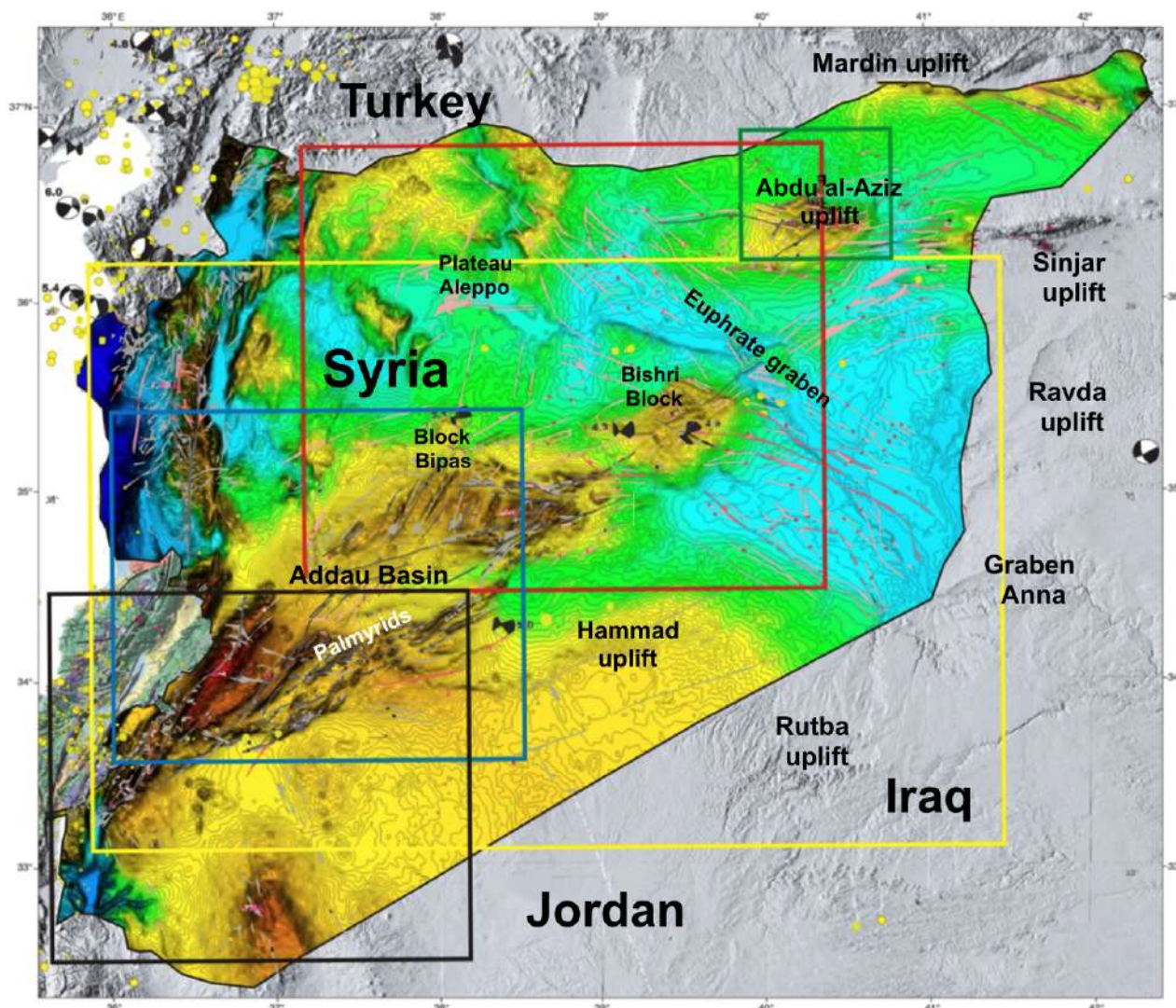


Figure 1. Tectonic map of the territory of the SYR with the location of Landsat-8 infrared images (green, red, blue and black contours) and Terra-MODIS (yellow).

Geophysical structure of the lithosphere of Syria.

The regional level of research by remote space sensing is based on the processing of Terra-MODIS images [10], [11]. The given situation of changes in the density of TF depending on the heterogeneity in the energy source and in the medium of its transit shows regional zones of destruction of the lithosphere, they have a vertical (*comparable to the Earth's tectonopher*) or inclined form (*intra-crustal horizons*) of the structure (Fig. 2). In terms of power, they reach tens of kilometers. Fluids migrate along them both laterally and to the daytime surface of the Earth. The fault system plays the role of supply channels for fluid-gas emanations to the surface, with the creation of multidirectional flows in

permeable media and the accumulation of fluids in porous media in the form of multi-storey chambers. Thus, all dispersed hydrocarbon molecules that enter the composition of fluids from various sources must be carried away (*migrate*) within the formed rift structures. This can explain the process of oil and gas accumulation for hundreds of kilometers within the Palmyrid fold-thrust belt.

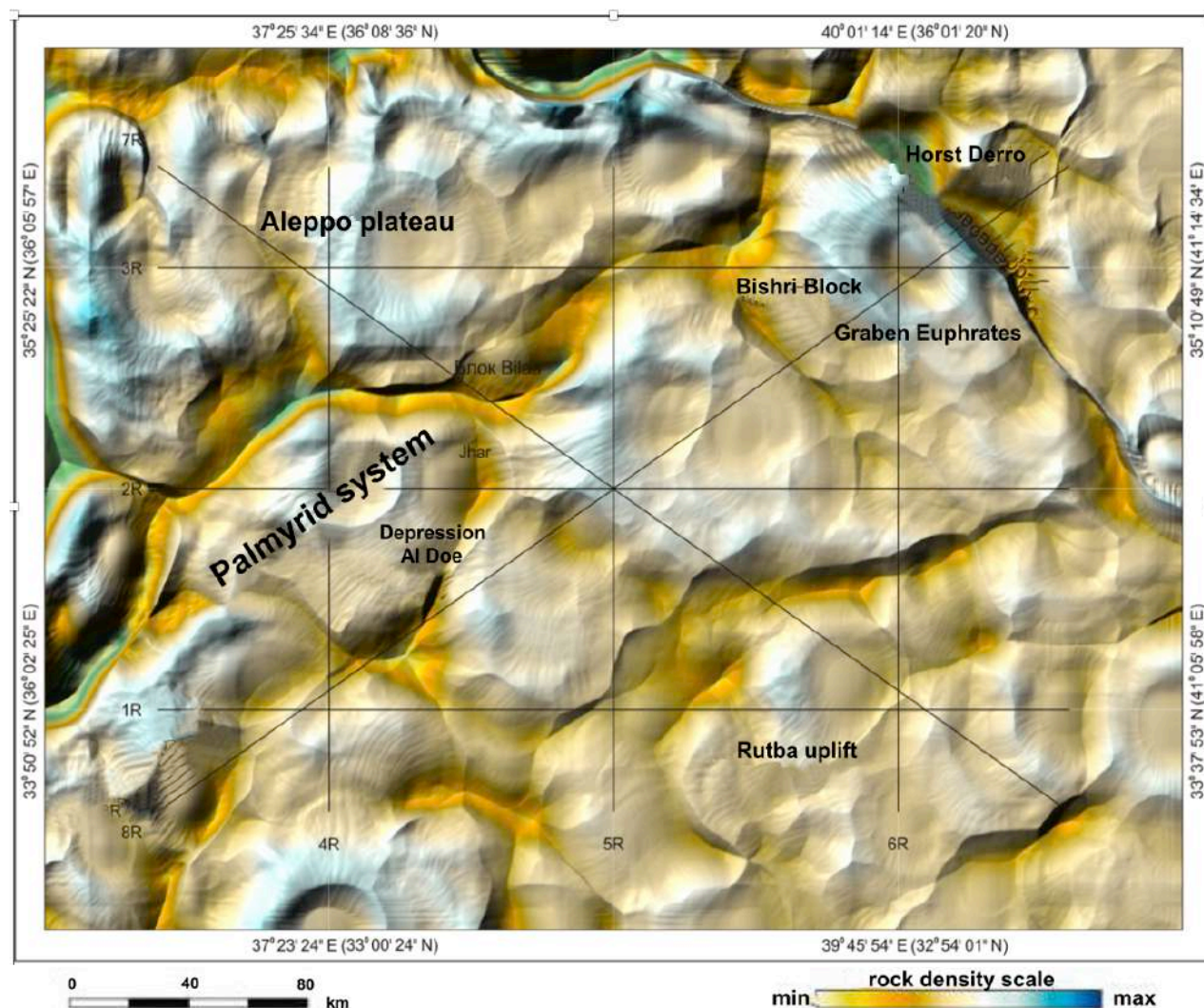


Figure 2. Map of the local field of block-fault structures in the depth interval (10–20) km according to MODIS data.

Based on the field pattern, a certain regularity is found in the system of geoblock boundaries. The morphology of the EC structures is highly detailed and informative, which is reflected in the change in the regional seismic boundary of Mohorovichich, which was calculated from the TVT data (Fig. 3). On average, the depth of the M surface is 36 km.

One can speak of lateral variability and uniqueness of the model of individual crustal blocks. Intraplate tectonic activity is manifested in the results of the seismicity of the region (*the magnitude of earthquakes reaches 6.7*). In sharp boundaries between blocks with a high amplitude of ascent or subsidence (*stepping persists throughout the entire*

section of the lithosphere). In a completely defined structure of the compensated shell of the sedimentary cover (*Euphrates graben fault system*). Real environments have zones with inversion of thermal layers in depth, which indicates one of the geothermal signs of the presence of hydrocarbons in the environment.

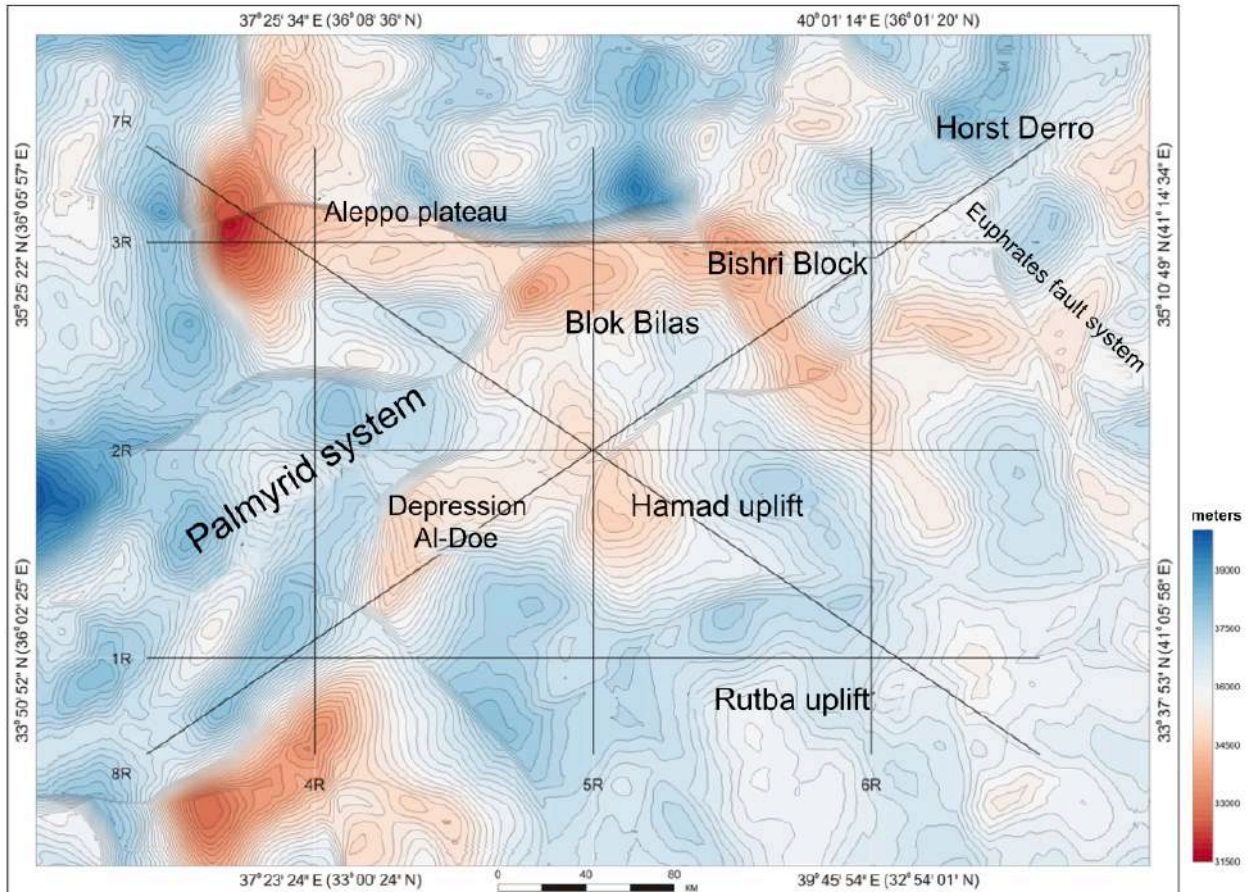


Figure 3. Map of the surface of Mohorovichich of the Syrian oil and gas province according to MODIS data.

A fundamentally new result of the study of the lithosphere is the establishment of a tectonophere located in the central part of Syria. It has a northeastern strike for many hundreds of kilometers and, as a rule, coincides with the Palmyrid rift structure of the Earth's crust (Figs. 4 and 5). The regional section of the tectonophere includes a deep central trunk in the upper mantle and gentle ramifications of destructive zones in the Earth's crust. The thickness of the main zone in the lithospheric mantle increases to 80 km, and the dip angle exceeds 75° . Another feature of the structure of the tectonophere axis is discontinuity and horizontal displacement of tens of kilometers in the Earth's crust (*uplift of Aleppo and Palmyrid*). The axis of the structure has a dip from a depth of 5 km to 42 km at an angle ($30^\circ - 45^\circ$). At the same time, the Levant fault zone in the Syrian segment, represented by a system of rift depressions and associated meridional structures, partially limits the

distribution of the tectonopher. In the eastern part of Syria, the zone borders on the system of orthogonal faults of the Euphrates.

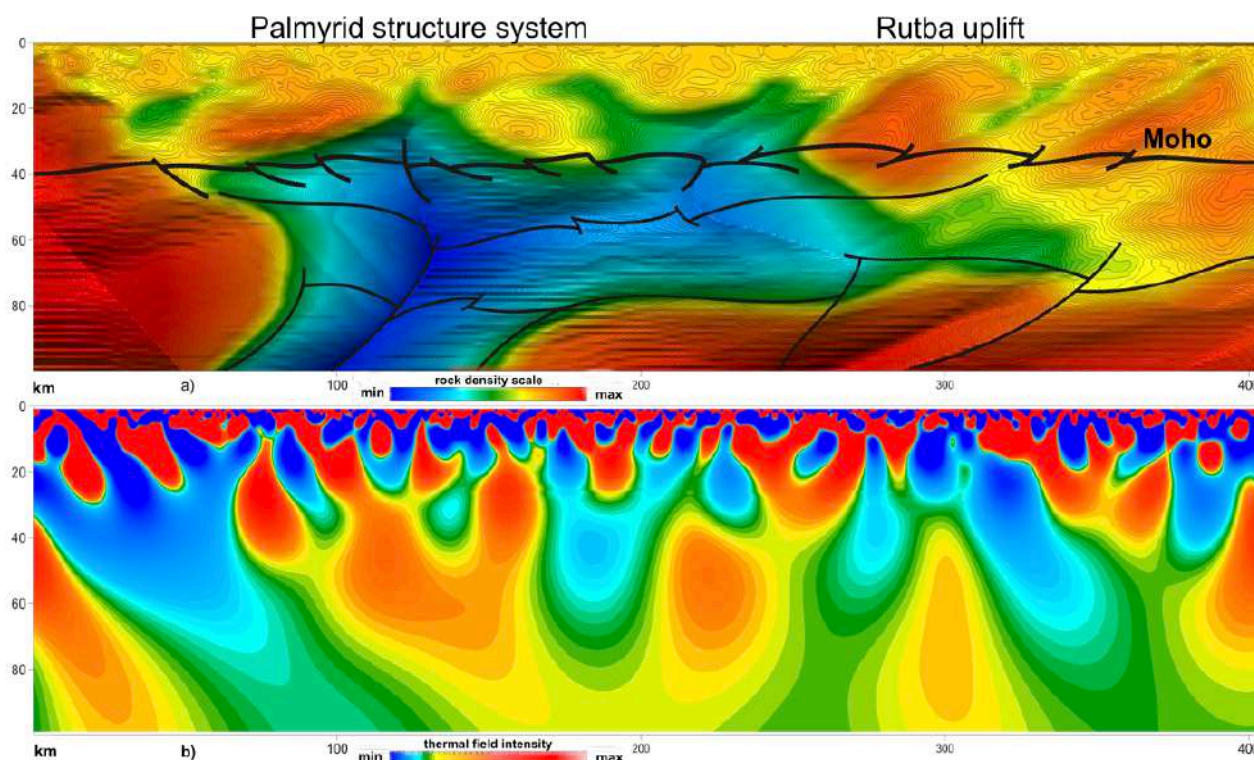


Figure 4. Models of block-fault structures with geothermal boundaries (a) and heat sources (b) of the SYR lithosphere, along the 1R profile

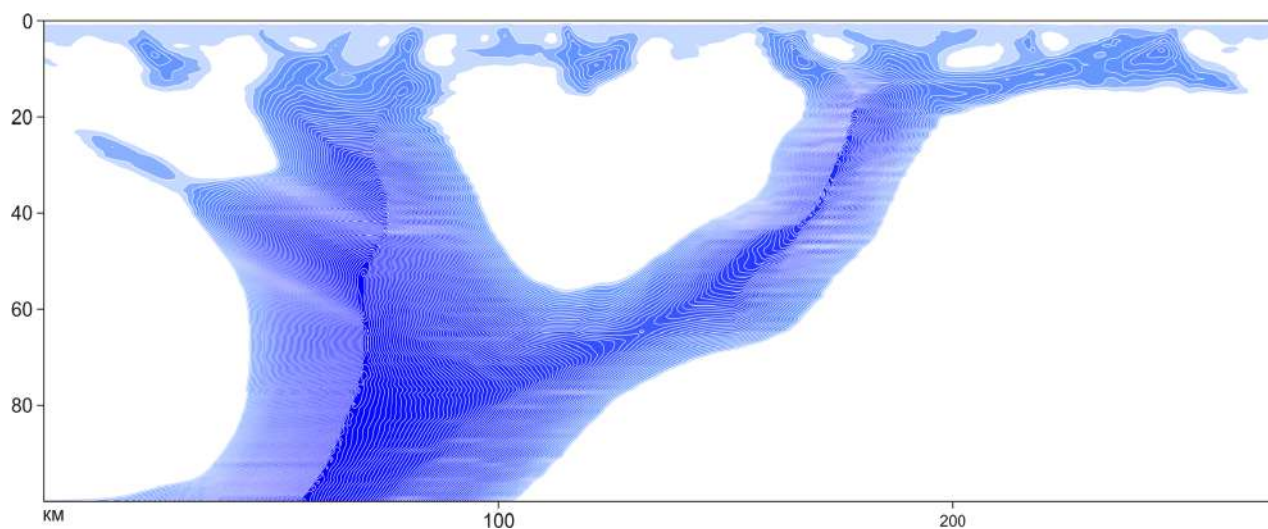


Figure 5. Model of tectonic disturbance of the SYR lithosphere, along the 4R profile

The local level of the study of the Earth's crust of the territory of Syria by remote Thermo-vision sounding is based on the processing of Landsat-8 images. The pronounced structural forms of the blocks indicate the main directions of dislocations, the creation of

thrusts of tectonic blocks of the Earth's crust. Taking into account the morphology of the field pattern (Fig. 6), in the marginal southeastern part of the undeformed part of the platform (*Aleppo Plateau*), a ledge-like formation of horizons occurred due to the development of allochthonous crustal litho-blades. The newly created anomalous terraces have a more pronounced appearance at shallow depths. The demolition of loose rocks of high porosity along the section creates conditions for the formation of local, isolated, and promising zones (Fig. 7). Detailed zoning of the environment in the form of terraces can increase the efficiency of the method in the search for Hydrocarbons.

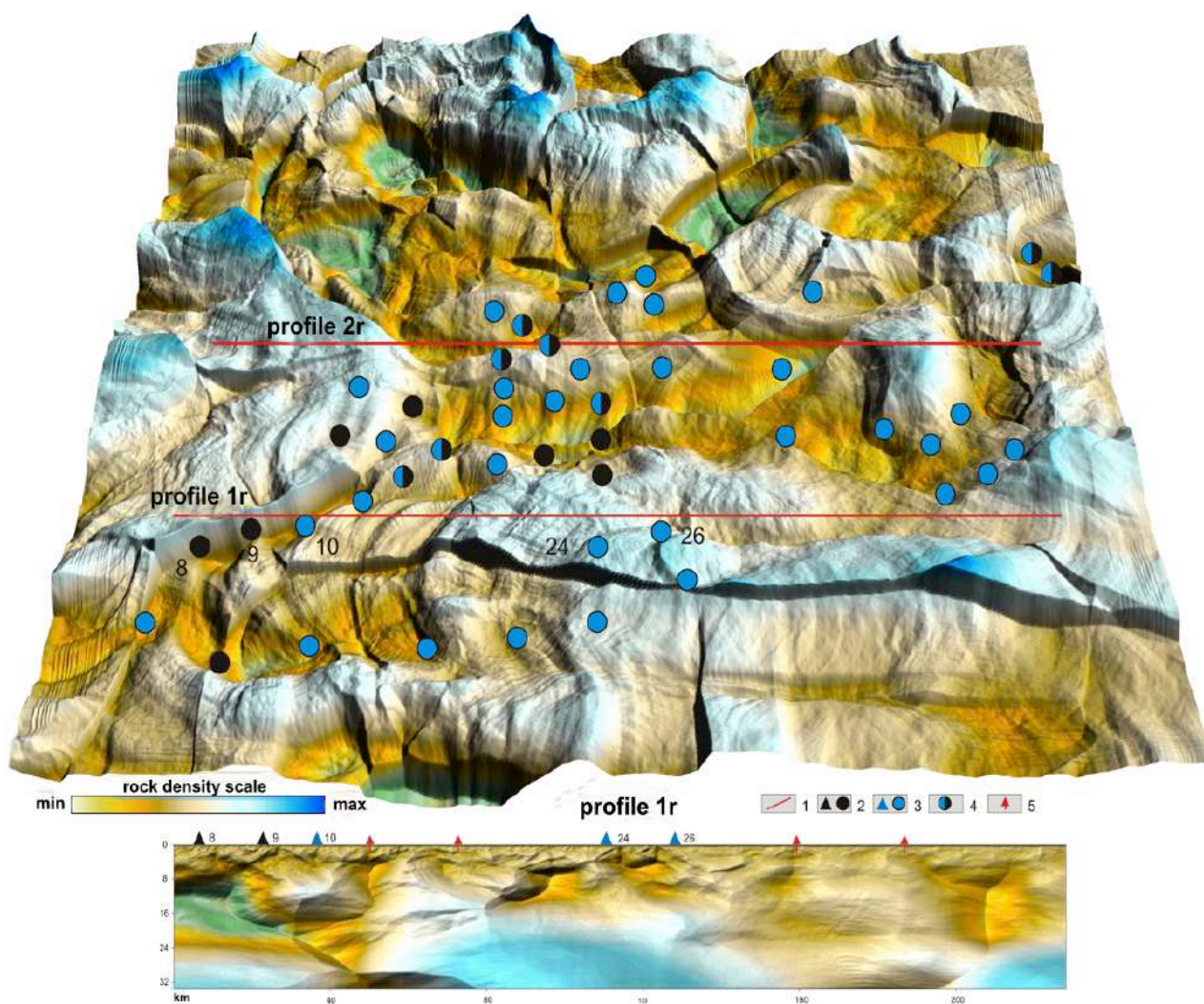


Figure 6. TVT volumetric model of the local field of block-fault structures in the depth interval (18...20) km (red contour) and along the 1r profile with the location of Hydrocarbon deposits. Symbols: 1 – TVT profile; deposits - oil (2), gas (3) and oil&gas (4); 5 - position of the promising Hydrocarbon zone according to TVT data.

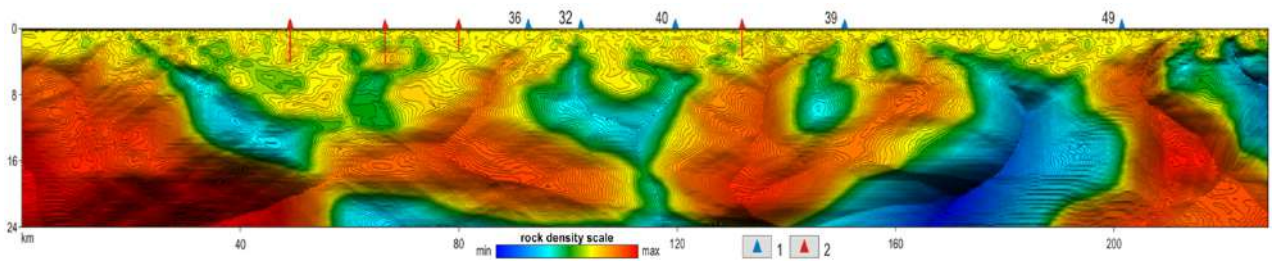


Figure 7. Model of block-fault structures along regional profile 2r

Modeling of the gravitational field made it possible to reveal correlations with the thermal structure of large-scale inhomogeneities of the medium. In the course of the study, the reliability of the calculation of potential fields was assessed when studying the structures of the earth's crust on the example of the Palmyrid graben system, the Aleppo plateau and the Rutbach uplift. The degree of convergence and information content of the results of modeling Thermovision sounding and the endogenous gravity field of the oil and gas basin, the possibility and expediency of combining methods for classifying the inhomogeneities of the medium are established. For this purpose, numerical modeling of the gravitational field of the Earth's crust and reconstruction of a three-dimensional physical-geological model of the environment based on the algorithm for calculating hypocenters and intensity of density sources [12].

The TVT maps and sections have much in common in the morphology of the isolines of the anomalous gravitational field and reflect the structure of the heterogeneous structure of the medium (Fig. 8). However, the detail of construction of laterally inhomogeneous models of TVT block-fault structures is higher than in gravimetry. In a number of cases, they approximate the inhomogeneous structure of the crust in different ways. The discrepancy between the isolines of the gravitational field is largely associated with fault zones, which are established by Thermovision sounding and find their confirmation in geological materials. In this case, gravimetry can only play an auxiliary, intermediate role in constructing a model of the medium. The result of the analysis of the gravitational field can be required when detailing the priority search for hydrocarbons only under conditions of a sufficiently dense observation system.

Tectonic ledge of the basement as a geological object of hydrocarbon search in the sedimentary cover

Mapping of ancient high-amplitude tectonic-erosion protrusions (basement remnants) is one of the urgent tasks for the development of unexplored oil resources. The transgressive overlay of the lower horizons of the sedimentary cover on the tectonic-erosion sur-

face of the ancient basement ledges creates certain prerequisites for the formation of traps in the arch and on the slopes of the ledges, the structure of which can be predicted during comprehensive TVT analysis.

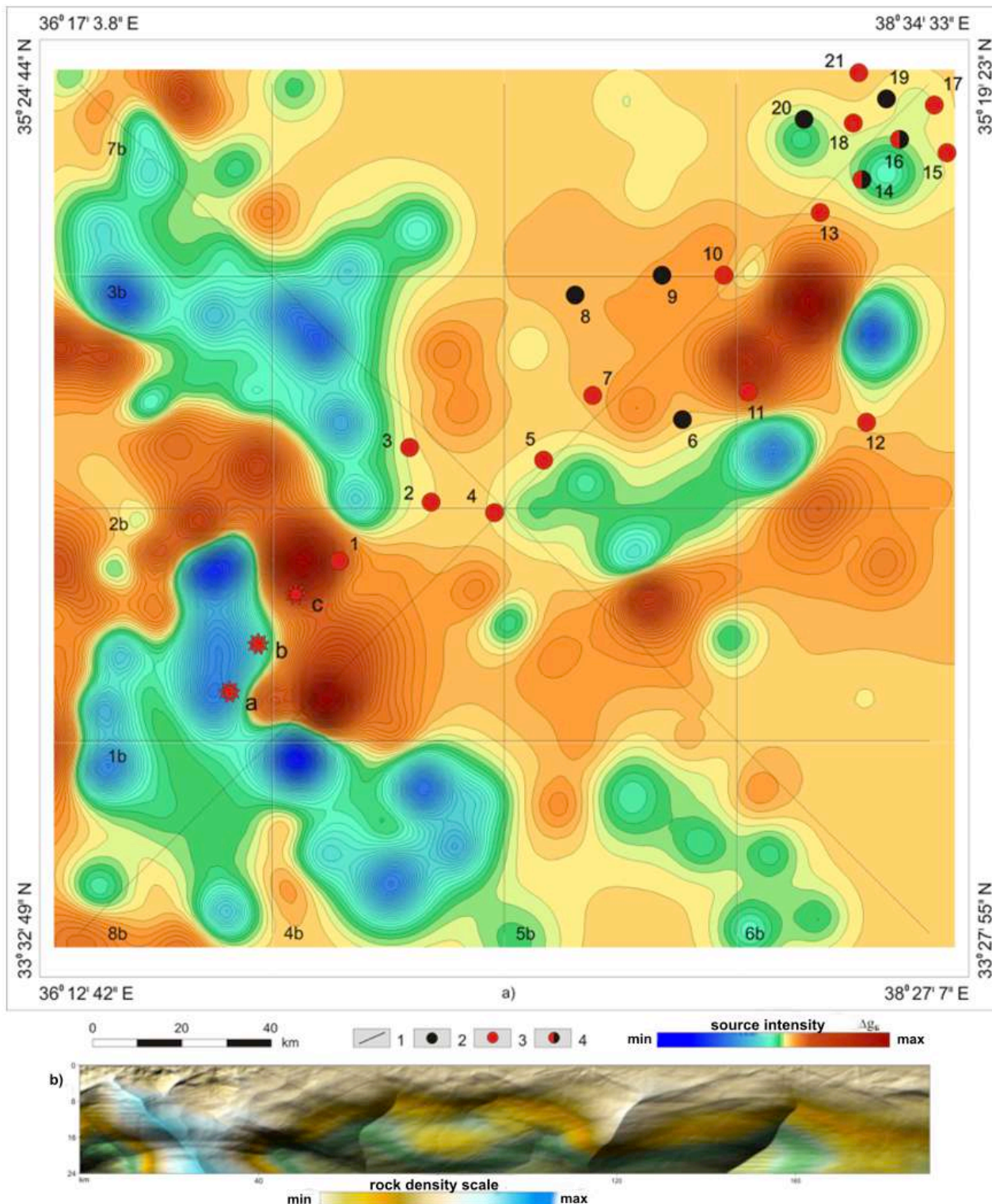


Figure 8. Map-section of local sources of gravitational density (blue contour) at a depth of 13 km (a) with high-amplitude "positive" (red) and "negative" (blue) anomalies Δg_B , and a model of block-fault structures (b) along the profile 2b. Symbols: 1 – TVT profile; fields - oil (2), gas (3) oil&gas (4)

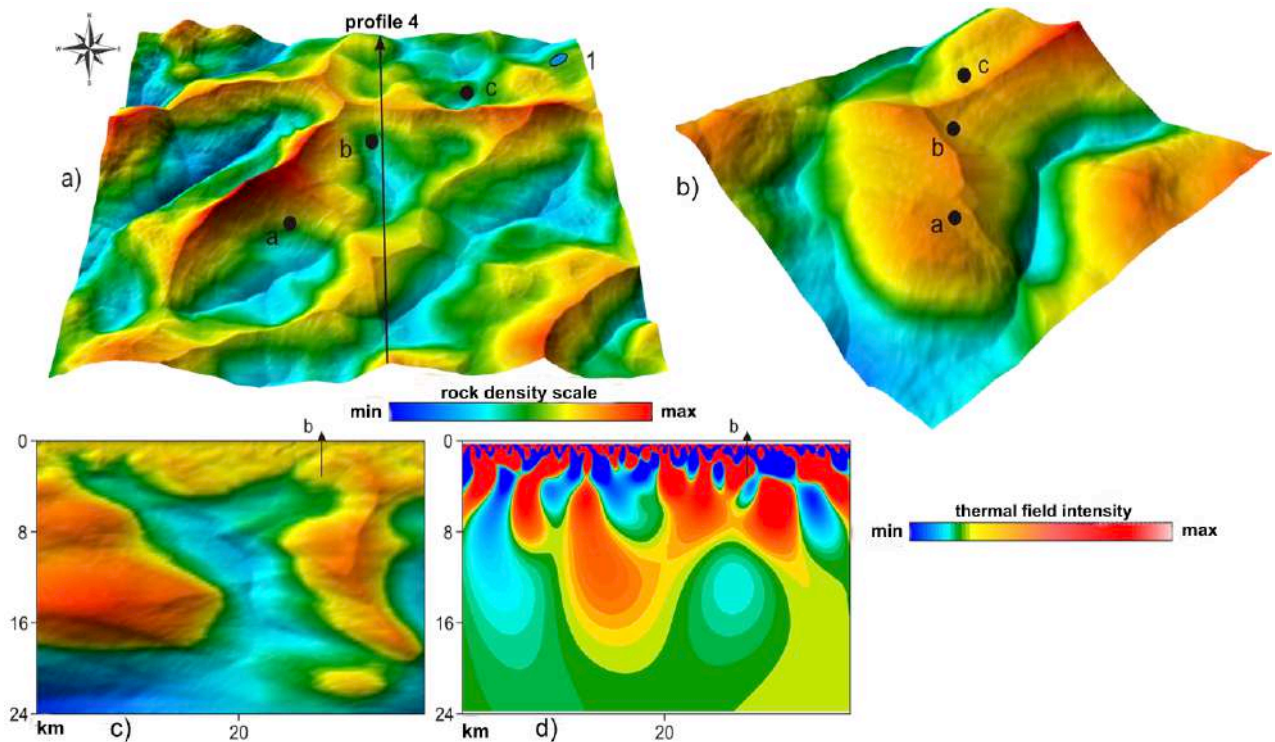


Figure 9. Maps of block-fault structures at depths of 3.6 km (a) and 8.2 km (b), models of blocks (c) and heat sources (d) of an oil&gas field

Let us demonstrate, as an example, the study of HC deposits of the structural-lithological type in the Buraij (c), Kara (b), Deir Atiyah (a) fields. In the structure of the thermal field TVT, we single out a number of defining signs (Fig. 9).

A powerful vertical fault zone links two geothermal floors located in the middle part of the crust and the sedimentary layer. Deep migration of fluid emanations along a tectonic fault creates a condition under which they spread horizontally in the roof of the cover.

Areas of dense rocks form eaves in block-fault structures with possible localization of HC deposits at this depth level. The anomalous thermal field is formed by a series of local sources without maintaining the constancy of the change in the geothermal gradient.

Hydrocarbon deposits are located almost at the same depth but are divided in the sedimentary cover into separate areas with a gradual change in permeability. Discontinuity along the lateral is largely due to a change in the lithological composition of the medium. The deep linear tectonic structure, the structure of which forms a regional ledge of dense basement rocks, captures all the studied deposits. It can be assumed that the genesis of the formation of HC deposits has the same nature. Therefore, within these zones, it is possible to discover new hydrocarbon deposits.

From the tectonic point of view, the structure of high TF gradients is considered as local plicative faults of the sedimentary cover. In practice, discovered massive deposits can be partially complicated by secondary faults. This can lead to a change in the structure of the productive horizon and, as a result, affect the quality of the trap. Therefore, a break in the lateral correlation of the formation divides it into two (*a* & *b*) independent oil deposits.

The next example illustrating the effectiveness of TVT application is a highly promising HC search area within the Belas (8), Abu Duhur (9) Jhar (6) oil fields. At the base of the geothermal floor at a depth of 3910 meters there is a productive oil layer. The reservoir deposit is formed by loose rocks along the top of the anticlinal structure (Fig. 6). The section of the cover in some places is significantly differentiated in structure. Horizontal compression (*thrust*) of the layers is traced, which leads to alternation of dense and decompressed zones at different depths. Sloping reservoir zones and folding of the medium are formed (Fig. 10).

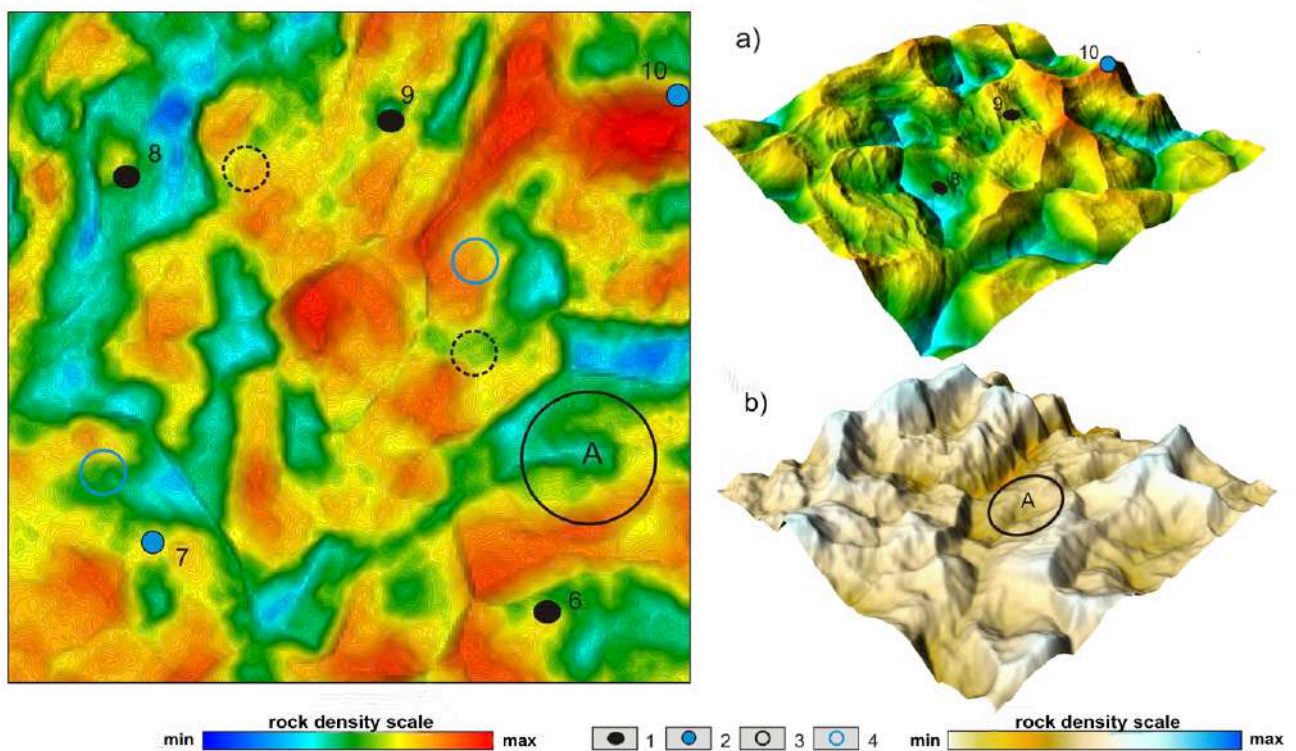


Figure 10. Maps of local block-fault structures (a) and volumetric field (b, c) at a depth of 3.6 km of an oil (1) and gas (2) field, a priority search for oil (3) and gas (4)

As practice shows, the greatest effect of interpretation is achieved when using the range of field values within one geothermal floor. In this case, linear fault zones (*blue*) and weakly isomeric objects appear on the cut, which are poorly expressed in the integral field. The emergence of hidden structures in the structure of the sedimentary cover is

used for the subsequent detailed zoning of the territory in the search for HC. In our case, a large zone A of the priority oil search is of interest. It is located to the northeast of the Jhar oil field with a productive horizon depth of 3110 meters. In the figure, the block is formed from terraces, the distribution of which is limited by a fault. There is discreteness, block mosaic and compositeness in the structure of the structural zone.

Complexly constructed sleeve-shaped structures of sedimentary cover

In this work, complexly constructed unconventional structures of the sedimentary cover are studied as a geological object for the search for hydrocarbons. Analysis of the material indicates that the formation of sedimentary reservoirs occurred in favorable conditions for a number of traps (*sleeve-shaped, lenticular and bar*), which are one of the reserves of oil and gas production in Syria. Repeated occurrence of transgression and regression of the sea basin during a relatively active tectonic time on the territory of the Arabian Platform determined an unstable dynamic environment, creating a significant lithofacies variability of terrigenous sediments, with the replacement of permeable varieties with impermeable ones at short distances. At the same time, regional faults formed diverse directions of fracturing of crustal blocks. This situation required a comprehensive study of the thermal properties of the basement rocks, the study of the nature of the distribution and formation of fracture systems, the patterns of deposits placement in unconventional reservoirs (Fig. 11).

It has been established that the formation of complexly constructed traps occurs under the following conditions, which are signs of TVT in the effective search for sleeve-shaped deposits:

- 1) The presence in the section of a decompressed extended zone, a sinuous shape comparable to a tectonic disturbance of the environment.
- 2) The presence of an inclined surface of the foundation for the free migration of large clastic material.
- 3) Presence of local protrusions on the way of sediment drift, creating a natural barrier, which results in the formation of detrital sedimentary material and the gradual accumulation of a porous layer.
- 4) Development of a dense trap above the reservoir, which creates conditions for the preservation of hydrocarbon deposits.
- 5) The development of an inclined fault at a depth along which light hydrocarbons migrated to the Earth's surface.

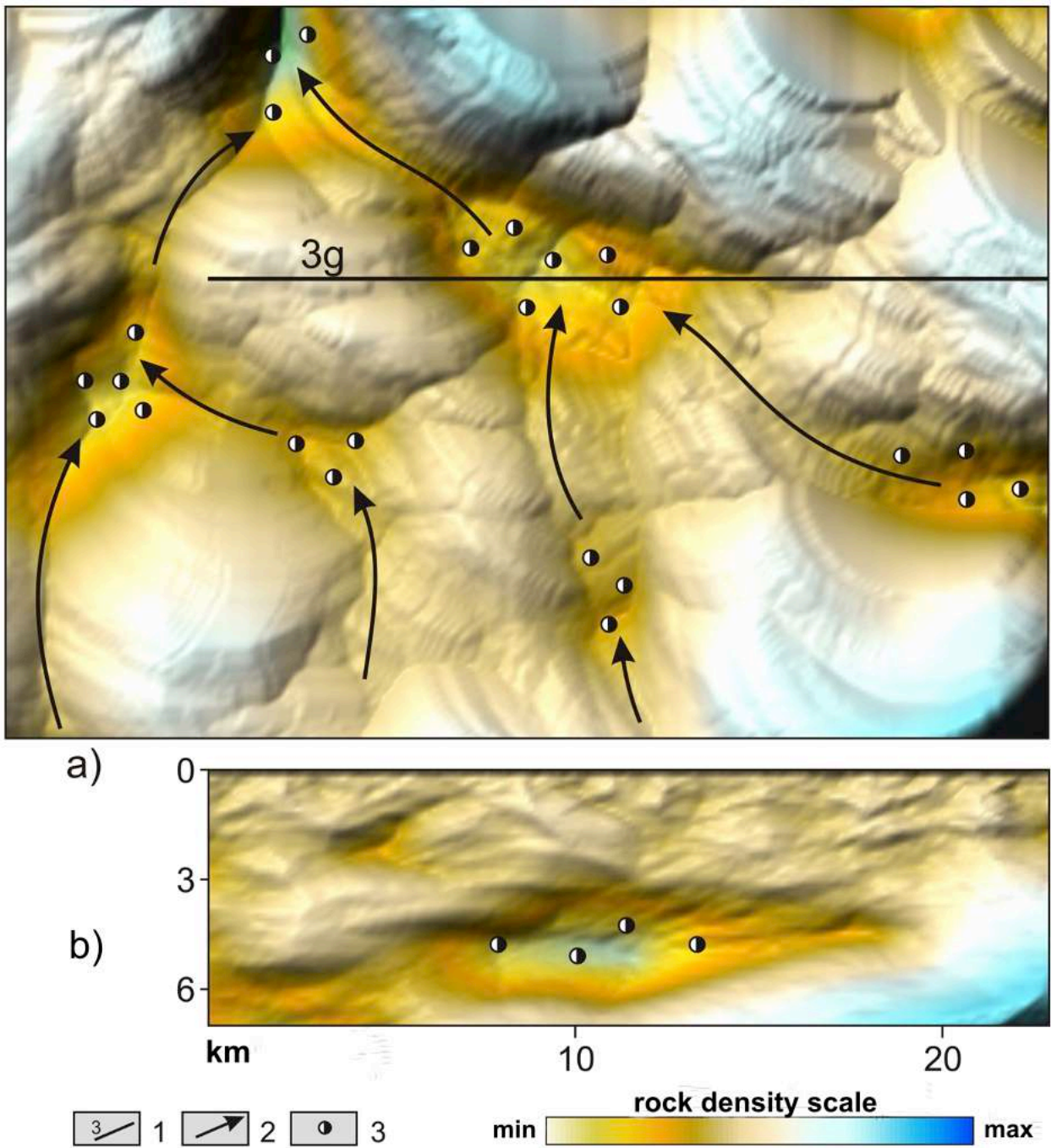


Figure 11. Models of block-fault structures during the formation of sleeve-shaped traps. 1 – profile fragment 3g; migration (2) and accumulation (3) of hydrocarbons in a highly porous medium at a depth of 3.6 km

As a result of SYR geothermal zoning, it was determined that the discovery of new complexly constructed hydrocarbon deposits should be linked to the province of Jabal Abd al-Aziz in the northeast, the southern part of the Aleppo plateau and the Euphrates fault system of the graben, in eastern part of Syria.

CONCLUSION

The study of the structure of the lithosphere of Syria by means of remote sensing, with a quantitative characteristic of thermal fields, has not been carried out so far. It has been shown for the first time that the system of numerous TVT profiles and maps of different construction scales provides valuable experimental data and significantly complements modern ideas about the formation of the deep structure of the SYR tectonophere.

The form and internal heterogeneous structure of the Earth's crust of the oil and gas provinces of Syria is well linked with tectonic faults of various ranks. The process of localization of deep fluid-gas emanations in the sedimentary cover of the region is due to active fault zones of different times and depths. Near-fault oil and gas fields are widespread in the territory of SYR.

In the course of TVT studies of the northern part of the Arabian platform during oil prospecting, we carried out an additional complex interpretation of seismic, gravity and magnetometry materials. The processes of formation of thermal characteristics during the zoning of ore fields under the conditions of paleomagnetism in the southwestern part of the SYR and from the standpoint of seismic activity of seismogenic tectonic faults have been studied. The obtained materials prove the reliability and effectiveness of the technology of Thermovision Tomography of the Geological Environment.

LITERATURE

1. Crustal shortening in the Palmyride fold belt, Syria, and implications for movement along the Dead Sea fault system / T. A. Chaimov, M. Barazangi, D. Al-Saad, T. Sawaf, A. Gebran // *Tectonics*. – 1990. – Vol. 9. – P. 1369-1386.
2. Continental Margin Evolution of the Northern Arabian Platform in Syria / J. Best., M. Barazangi, D. Al-Saad, T. Sawaf, A. Gebran // *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. – 1993. – Vol. 77. – P. 173-193.
3. Ponikarov V. P. The Geological Map of Syria Scale 1: 500.000, Explanatory notes. Syrian Arab Republic, Ministry of Industry, Damascus, Syria. – 1966.
4. Lovelock P.E. A review of the tectonics of the northern Middle East region // *Geol. Mag.* – 1984. – Vol. 121. – P. 577-587.
5. De Ruiter R. C., Lovelock P. R., Nabulsi N. The Euphrates Graben of eastern Syria: A new petroleum province in the northern Middle East. *The Middle East Petroleum Geosciences, Gulf PetroLink, Bahrain*. – 1995. – Vol. 1. – P. 357-368.

6. The intraplate Euphrates depression-Palmyrides mountain belt junction and relationship to Arabian plate boundary tectonics / D. Alsdorf, M. Barazangi, R. Litak, D Seber., T. Sawaf, D. Al-Saad // *Annali di Geofisica*. – 1995. – Vol. 38. –No. 3/4. – P. 385-397.
7. Tectonic and Geologic Evolution of Syria / G. Brew, M. Barazangi, A. K. Al-Maleh, T. Sawaf // *Gulf Petro Link. Geo Arabia, Bahrain*. – 2001. – Vol. 6, № 4. – P. 573-616.
8. Mesozoic – Cenozoic evolution of the intraplate Euphrates fault system, Syria: implications for regional tectonics / R. K. Litak and et al. // *Journal of the Geological Society, London*. – 1997. – Vol. 154. – P. 653-666.
9. Kent N., Hickman R. G. Structural development of Jebel Abd Al Aziz, Northeast Syria // *GeoArabia*. – 1997. – Vol. 2, Issue 3. – P. 307-330.
10. Karimov K.M., Karimova L.K., Gataullin K.R. Thermovision Tomography of the Geological Environment. - Kazan, 2015. - 297 p.
11. Space remote sensing in the infrared range when searching for hydrocarbon deposits in the DOUALA basin (Republic of Cameroon) / K. M. Karimov, A. Al Ali, M. A. Lonshakov // *Geology, geophysics and exploration of oil and gas fields*. - 2021. - No. 7 (355). – P. 20-25.
12. Utemov E. V., Nurgaliev D. K. Natural Wavelet Transformations of Gravity Data: Theory and Applications // *Izvestia Physics of the Solid Earth*. – 2005. – Vol. 41(4). – P. 88-96.

Information about authors

Kamil Midkhatovich Karimov – Doctor of Geology and Mineralogy, Professor of the Department of Geophysics and Geoinformation Technologies, Kazan (Volga Region) Federal University
Russia, 420008, Kazan, str. Kremlevskaya, 18
E-mail: kamil1955@inbox.ru

Ahmad Al Ali – Postgraduate Student, Department of Geophysics and Geoinformation Technologies, Kazan (Volga Region) Federal University
Russia, 420008, Kazan, str. Kremlevskaya, 18
E-mail: alali.syy@gmail.com

Marat Andreevich Lonshakov – Master of the Department of Geophysics and Geoinformation Technologies, Kazan (Volga Region) Federal University
Russia, 420008, Kazan, str. Kremlevskaya, 18
E-mail: maratlonsh@gmail.com

Научная статья

УДК 553.98(569.1)+550.834(203)

(Article in Russian)

DOI: 10.33285/2413-5011-2023-3(375)-17-24

СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ СИРИЙСКОЙ АРАБСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ПО ДАННЫМ ТЕПЛОВИЗИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

К.М. Каримов, А. Ал Али, М.А. Лоншаков

(Казанский (Приволжский) федеральный университет)

Аннотация. Изучен вопрос о тектоническом формировании блоково-разломных структур в условиях рифтогенеза и связь с нефтеносными провинциями Сирии. Гетерогенное строение и основные факторы формирования земной коры отражаются в моделях глубинных тепловых источников и блоково-разломных структур тепловизионного зондирования, полученных по спектрально-зональным снимкам Terra-MODIS и Landsat-8. Установлено, что эффективность тепловизионной томографии геологической среды при поисках углеводородов на больших глубинах основывается на изучении природных каналов миграции флюидов в проницаемых горизонтах и накопления флюидов в пористых многоэтажных камерах, которые способны быть природными резервуарами углеводородов. Тектонические выступы фундамента и сложно построенные рукавообразные структуры как геологические объекты поиска углеводородов в осадочном чехле являются одним из резервов добычи нефти и газа на территории Сирийской Арабской Республики.

Ключевые слова: Сирийская Арабская Республика, тепловизионное зондирование, космический снимок, геологическая среда, блоково-разломная структура, нефтегазоносность

Для цитирования: Каримов К.М., Ал Али А., Лоншаков М.А. Строение земной коры и перспективы нефтегазоносности территории Сирийской Арабской Республики по данным тепловизионного зондирования // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2023. – № 3(375). – С. 17–24. – DOI: 10.33285/2413-5011-2023-3(375)-17-24

Original article

THE EARTH'S CRUST AND PROSPECTS FOR OIL AND GAS POTENTIAL OF THE SYRIAN ARAB REPUBLIC ACCORDING TO THE DATA OF THE THERMAL VISION SOUNDING

K.M. Karimov, A. Al Ali, M.A. Lonshakov

(Kazan (Volga region) Federal University)

Abstract. The question of the tectonic formation of block-fault structures under the conditions of rifting and its connection with the oil-bearing provinces of Syria has been studied. The heterogeneous structure and the main factors of the Earth's crust formation are reflected in the models of deep heat sources and block-fault structures of thermal vision sounding, obtained from Terra-MODIS and Landsat-8 spectral zonal images. It has been determined that the effectiveness of thermal vision tomography of the geological environment when prospecting for hydrocarbons at great depths is based on the study of fluids migration natural channels in permeable horizons and accumulation in porous multi-stage chambers that can be natural reservoirs for hydrocarbons. Tectonic basement ledges and complexly built sleeve-like structures as geological objects of prospecting for hydrocarbons in the sedimentary cover are one of the reserves of oil and gas production in the territory of the Syrian Arab Republic.

Keywords: Syrian Arab Republic, thermal vision sounding, satellite image, geological environment, block-fault structure, oil and gas potential

For citation: Karimov K.M., Al Ali A., Lonshakov M.A. The Earth's crust and prospects for oil and gas potential of the Syrian Arab Republic according to the data of the thermal vision sounding // *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*. – 2023. – № 3(375). – Pp. 17–24. – DOI: 10.33285/2413-5011-2023-3(375)-17-24

Введение

Обеспечение прироста ресурсов углеводородов на территории Сирийской Арабской Республики (САР) связано с оптимизацией различных циклов геолого-разведочного процесса. Отсюда вытекает первоочередная проблема для современных геофизических методов. Применяющиеся в настоящее время подходы к изучению структуры среды включают использование сейсмического метода и каротажа скважин, для выполнения которых необходимы временные затраты и значительный объем капитальных вложений. Имеется во-

прос к созданию глубинных моделей в рамках градиентных сред из-за недостаточной эффективности методики выполнения наземных геофизических наблюдений.

Современное строение земной коры территории САР изучалось на основе априорной геолого-геофизической информации, которая опубликована в ряде работ [1–8]. Изучались складчатый пояс Пальмирид в центральной части Сирии [1, 2], поднятие Алеппо [3, 4], система разломов Евфрат грабена в восточной части [5–8], зоны Джебель Абд аль-Азиз и Синжар на северо-востоке [7, 9]. Выполнено районирование месторождений углеводородов основных провинций Сирии [7, 8] с наложе-

Геофизическое строение литосферы Сирии

нием на топографическую схему. Общий вывод, вытекающий из сделанного обзора, заключается в том, что для дальнейшего повышения детальности и информативности целесообразно применение современных геоинформационных технологий. В частности, можно использовать космическое спектрально-зондирование с высоким пространственным разрешением регистрируемых инфракрасных сигналов. Данный подход существенно расширяет практическую возможность бесконтактного исследования глубинного строения и поиск новых месторождений для воспроизводства сырьевой базы САР. Метод тепловизионного дистанционного зондирования земной коры (ЗК), в рамках которого применим томографический подход [10] в изучении эндогенного теплового поля (ТП), направлен на повышение детальности исследования геологической среды при прогнозе зон нефтегазоаккумуляции в фундаменте и осадочном чехле.

Методическое обоснование и практическое апробирование технологии тепловизионной томографии (ТВТ) структуры и физического состояния среды крупнейших нефтегазоносных провинций северной части Аравийской платформы (Palmyride, Aleppo, Rutbah, Jebel Al Arab, Jebel Abd el Aziz, Euphrate, Bilas и Bishri) становится актуальной задачей и перспективным научным направлением для прогнозирования залежей углеводородов (УВ) в других регионах. Цель работы заключалась в изучении геотермического строения земной коры Сирии при прогнозе залежей углеводородов на основе тепловизионного дистанционного зондирования. Объектом исследования являются методы обработки и интерпретации космических спектрально-зондовых снимков в тепловом инфракрасном диапазоне длин волн применительно к территории САР (рис. 1).

Региональный уровень исследования дистанционным космическим зондированием основан на обработке снимков Terra-MODIS [10, 11]. Приведенная ситуация изменения плотности ТП в зависимости от неоднородности в источнике энергии и в среде ее транзита показывает региональные зоны деструкции литосферы, которые обладают вертикальной (сопоставимой с тектонофером Земли) или наклонной формой (внутрикоровыми горизонтами) строения (рис. 2). По толщине они достигают десятков километров. По ним происходит миграция флюидов как по латерали, так и к дневной поверхности Земли. Система разломов играет роль подводящих каналов для поступления к поверхности флюидо-газовых эманаций, с созданием разнонаправленных перетоков в проницаемых средах и накоплением флюидов в пористых средах в виде многоэтажных камер. Таким образом, все рассеянные молекулы углеводородов, попадающие в состав флюидов из различных источников, должны сноситься (мигрировать) в пределах сформированных рифтовых структур. Этим можно объяснить процесс нефте- и газоаккумуляции на сотни километров в пределах складчато-надвигового пояса Пальмирид.

Исходя из рисунка поля, в системе границ геоблоков обнаруживается определенная закономерность. Морфология структур ЗК имеет высокую детальность и информативность, которые отражаются в изменении региональной сейсмической границы Мохоровичича, которая рассчитана по данным ТВТ (рис. 3). В среднем глубина поверхности М составляет 36 км.

Можно говорить о латеральной изменчивости и неповторимости модели отдельных блоков коры. Внутриплитная тектоническая активность проявляется в результатах сейсмичности региона (магнитуда землетрясений достигает 6,7). В резких границах раздела блоков с высокой амплитудой подъема или опускания (ступенчатость сохраняется по всему разрезу литосферы). В совершенно определенной структуре компенсируемой оболочки осадочного чехла (система разломов Евфрат грабена). Реальные среды имеют зоны с инверсией тепловых слоев по глубине, что указывает на один из геотермических признаков наличия углеводородов в среде.

Принципиально новым результатом исследования литосферы является установление тектонофера, расположенного в центральной части Сирии. Он имеет северо-восточное простирание на многие сотни километров и, как правило, совпадает с рифтовой структурой земной коры Пальмирид (рис. 4, 5). Региональное сечение тектонофера включает глубинный центральный ствол в верхней мантии и пологие разветвления деструктивных зон в земной коре. Толщина главной зоны в литосферной ман-

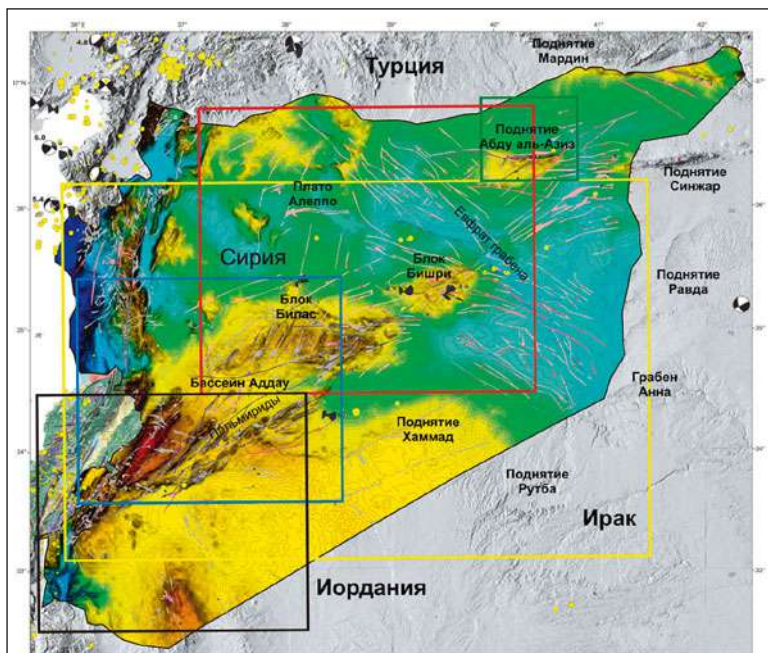


Рис. 1. Тектоническая карта территории САР с местоположением инфракрасных снимков Landsat-8 (зеленый, красный, синий и черный контуры) и Terra-MODIS (желтый)

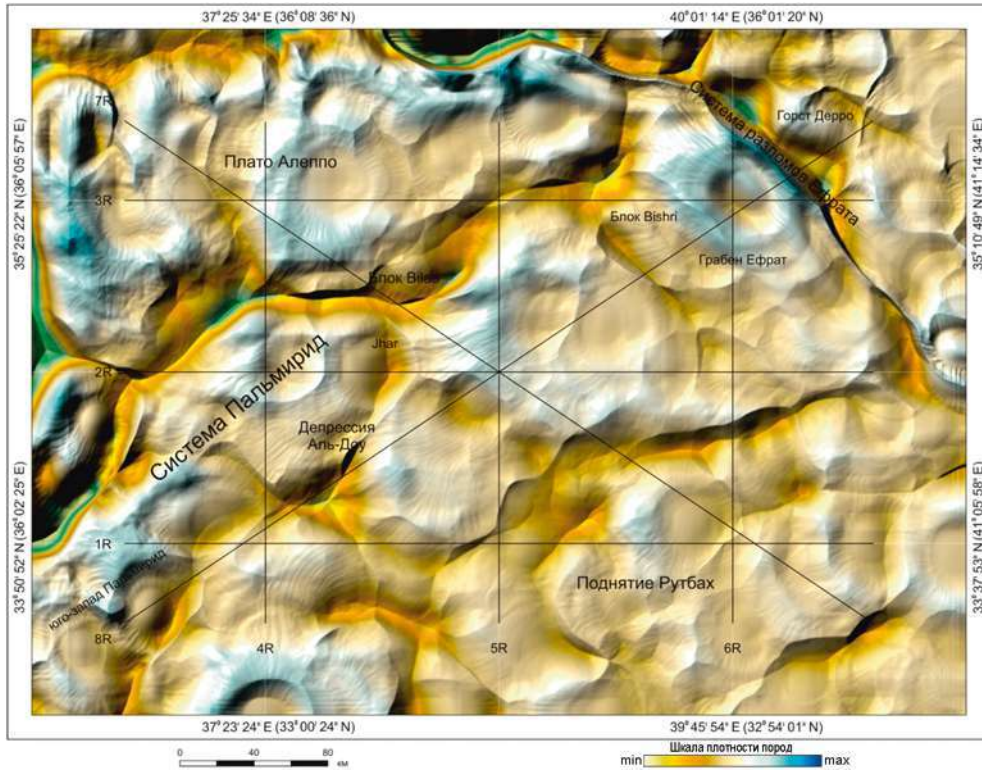


Рис. 2. Карта локального поля блоково-разломных структур в интервале глубин 10...20 км по данным MODIS

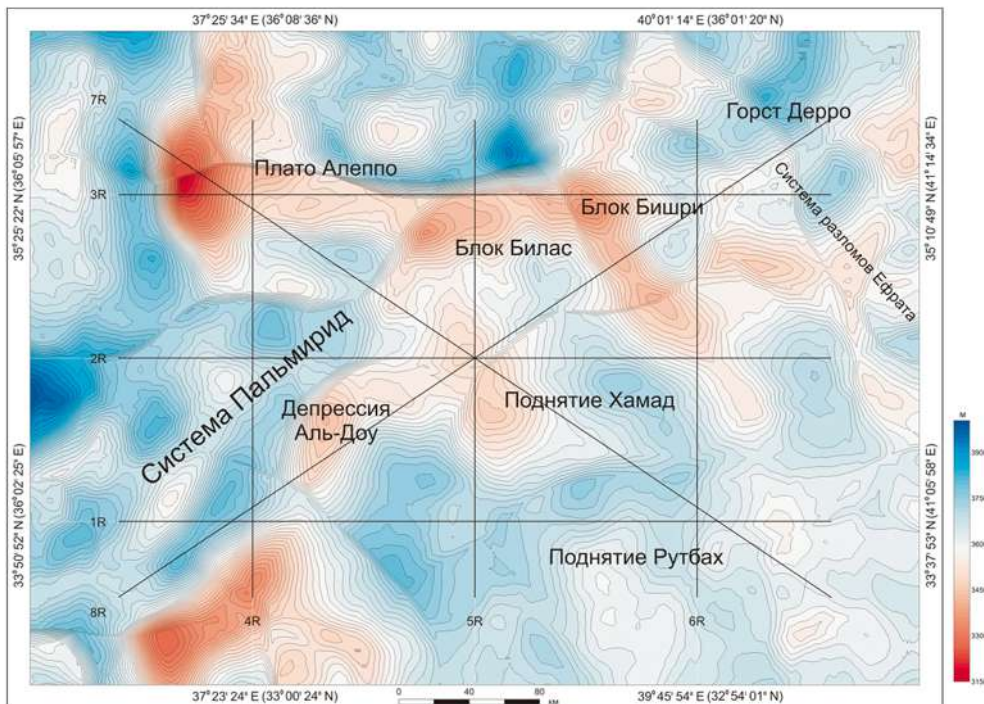


Рис. 3. Карта поверхности Мохоровичичич Сирийской нефтегазоносной провинции по данным MODIS

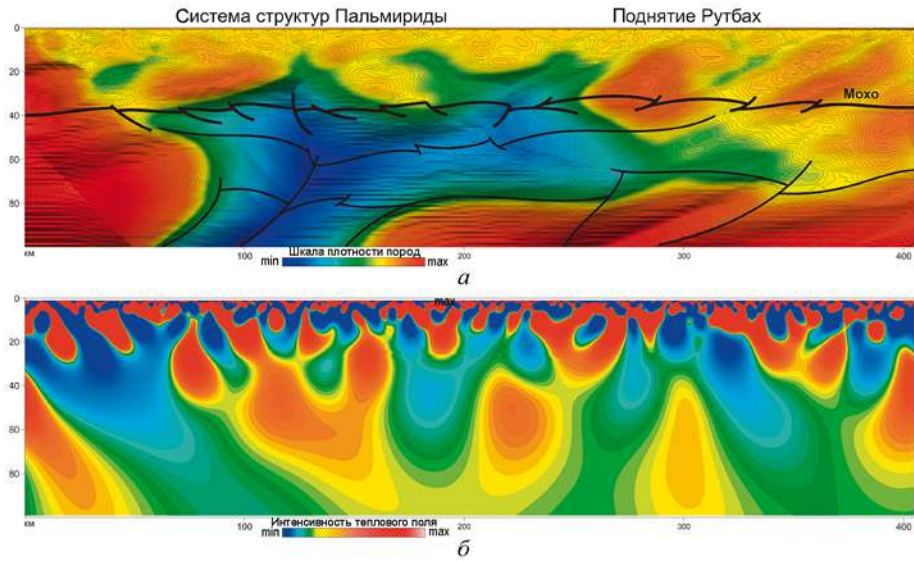


Рис. 4. Модели блоково-разломных структур с геотермическими границами (а) и тепловых источников (б) литосферы САР по профилю 1R

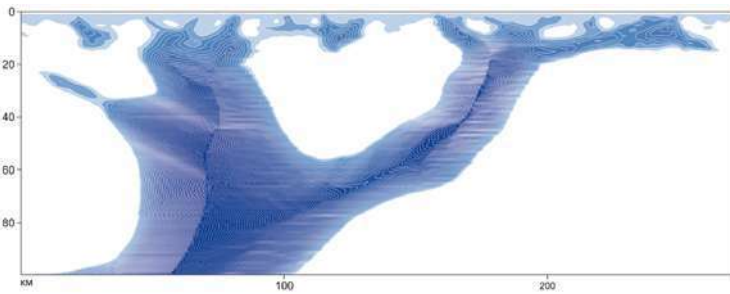


Рис. 5. Модель тектонического нарушения литосферы САР по профилю 4R

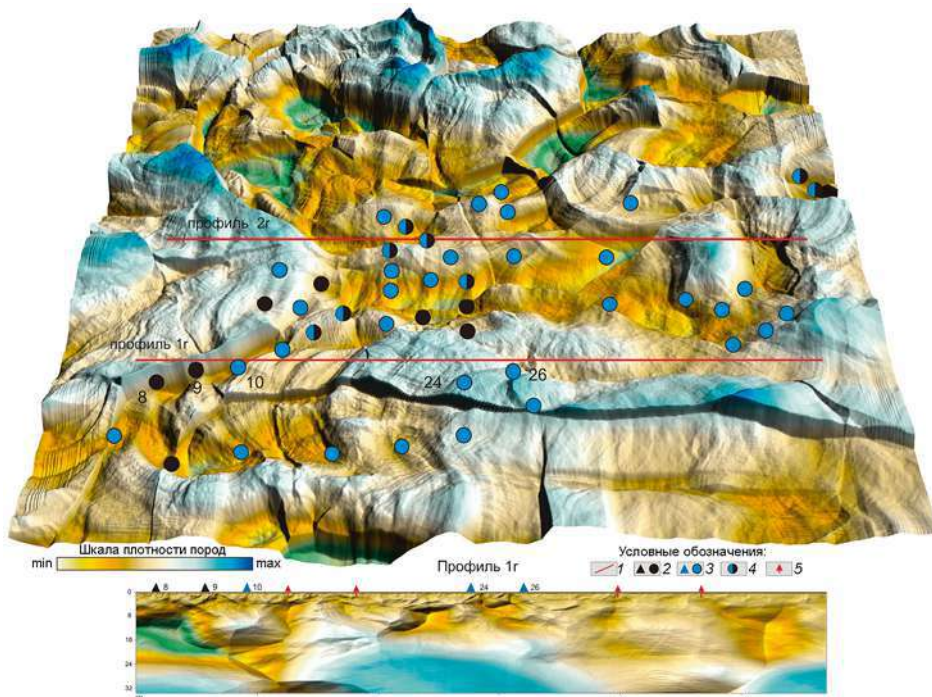


Рис. 6. Модель локального поля блоково-разломных структур в интервале глубин 18...20 км (красный контур) и по профилю 1г с расположением месторождений углеводородов:
1 – ТВТ профиль; месторождения: 2 – нефтяное, 3 – газовое, 4 – газонефтяное,
5 – положение перспективной зоны УВ по данным ТВТ

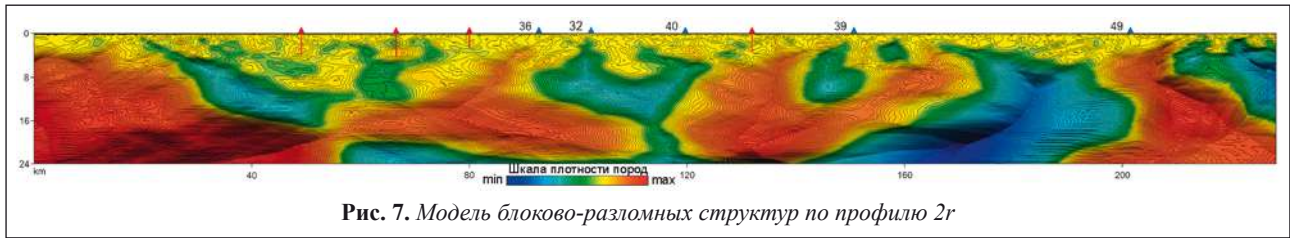


Рис. 7. Модель блоково-разломных структур по профилю 2г

тии увеличивается до 80 км, а угол падения превышает 75° . Другой особенностью строения оси тектонофера является прерывистость и смещение по горизонтали на десятки километров в земной коре (поднятие Алеппо и Пальмириды). Ось структуры имеет погружение с глубины 5 км до 42 км под углом ($30 \dots 45^\circ$). При этом зона Левантского разлома в Сирийском сегменте, представленная системой рифтовых впадин и сопряженных с ним меридиональных структур, частично ограничивает распространение тектонофера. В восточной части Сирии зона граничит с системой ортогональных разломов Евфрата.

Локальный уровень исследования земной коры территории Сирии дистанционным тепловизионным зондированием основан на обработке снимков Landsat-8. Резко выраженные структурные формы блоков указывают на основные направления дислокаций, создание надвигов тектонических блоков земной коры. С учетом морфологии рисунка поля (рис. 6) в краевой юго-восточной части недеформированного участка платформы (плато Алеппо) произошло уступообразное формирование горизонтов за счет развития аллохтонных литопластин коры. Вновь создаваемые аномальные террасы имеют более выраженный вид на малых глубинах. Снос рыхлых пород высокой пористости по разрезу создает условия для образования локальных, обособленных и перспективных зон (рис. 7). Детальное районирование среды в форме террас может повысить эффективность метода при поисках УВ.

Моделирование гравитационного поля позволило выявить корреляционные связи с тепловым строением крупномасштабных неоднородностей среды. В процессе исследования оценена достоверность расчета потенциальных полей при изучении структур земной коры на примере системы грабенов Пальмирид, плато Алеппо и поднятия Рутбах. Установлена степень сходимости и информативности результатов моделирования тепловизионного зондирования и эндогенного гравитационного поля нефтегазоносного бассейна, возможность и целесообразность комплексирования методов для классификации неоднородностей среды. С этой целью выполнены численное моделирование гравитационного поля земной коры и реконструкция трехмерной физико-геологической модели среды на основе алгоритма расчета гипоцентров и интенсивности источников плотности [12].

Карты и разрезы ТВТ имеют много общего в морфологии рисунка изолиний аномального гра-

витационного поля и отражают строение гетерогенной структуры среды (рис. 8). Однако детальность построения латерально-неоднородных моделей блоково-разломных структур ТВТ выше, чем в гравиметрии. В ряде случаев они по-разному аппроксимируют неоднородное строение коры. Несовпадение изолиний гравитационного поля в большей степени связано с зонами разломов, которые установлены тепловизионным зондированием и находят свое подтверждение в геологических материалах. В этом случае гравиметрия может иметь лишь вспомогательную, промежуточную роль в построении модели среды. Результат анализа гравитационного поля может быть востребован при детализации приоритетного поиска УВ только в условиях достаточно плотной системы наблюдений.

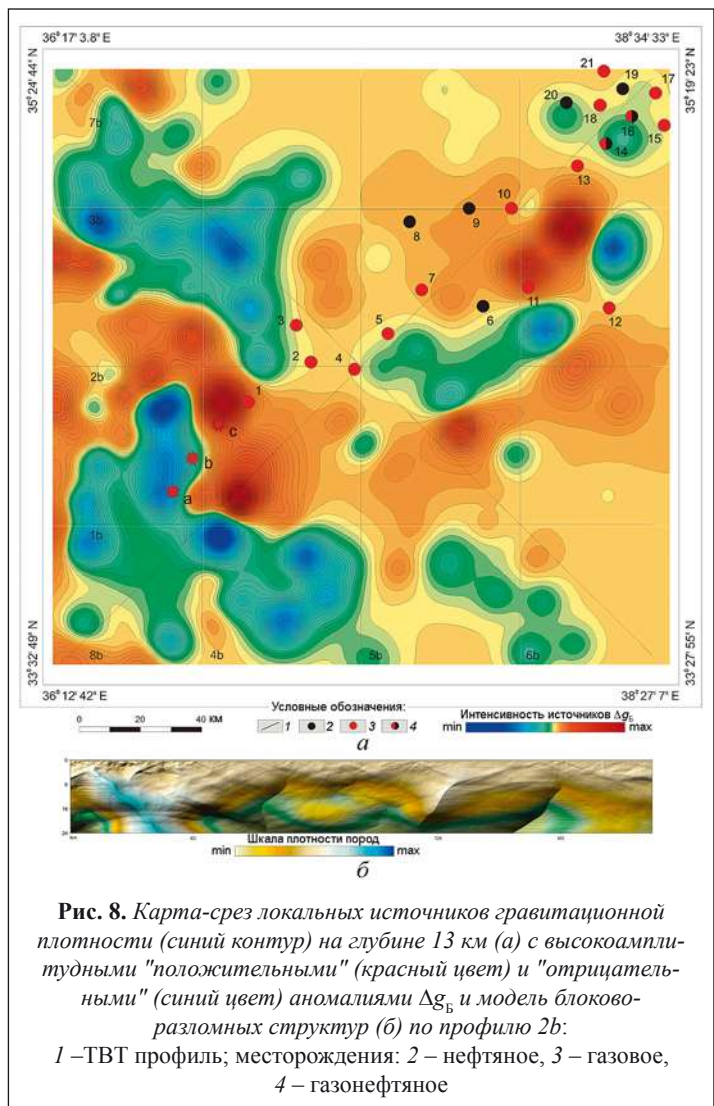


Рис. 8. Карта-срез локальных источников гравитационной плотности (синий контур) на глубине 13 км (а) с высокоамплитудными "положительными" (красный цвет) и "отрицательными" (синий цвет) аномалиями Δg_B и модель блоково-разломных структур (б) по профилю 2b: 1 – ТВТ профиль; месторождения: 2 – нефтяное, 3 – газовое, 4 – газонефтяное

Тектонический выступ фундамента как геологический объект поиска углеводородов в осадочном чехле

К числу актуальных задач по освоению неразведанных ресурсов нефти относится картирование древних высокоамплитудных тектоно-эрозионных выступов (останцев фундамента). Трансгрессивное налегание нижних горизонтов осадочного чехла на тектоно-эрозионную поверхность древних выступов фундамента создает определенные предпосылки для формирования ловушек в своде и на склонах выступов, строение которых можно спрогнозировать при комплексном анализе ТВТ.

Продемонстрируем в качестве примера изучение залежей УВ структурно-литологического типа на месторождениях Бурайдж (с), Кара (b), Дейр-Атия (а) (рис. 9). В строении теплового поля ТВТ выделим ряд определяющих признаков.

Мощная зона вертикального разлома увязывает два геотермических этажа, расположенных в средней части коры и осадочном слое. Глубинная миграция флюидных эманаций по тектоническому нарушению создает условие, при котором происходит горизонтальное растекание их в кровле чехла.

Участки плотных пород формируют карнизы в блоково-разломных структурах с возможной локализацией залежей УВ на этом уровне глубин. Аномальное тепловое поле сформировано серией локальных источников без сохранения постоянства изменения геотермического градиента.

Месторождения углеводородов расположены практически на одной глубине, но разделены в осадочном чехле на отдельные участки с постепенным изменением проницаемости. Прерывистость по латерали в большей степени обусловлена изменением литологического состава среды. Глубинная линейная тектоническая структура, строение которой формирует региональный выступ плотных пород фундамента, захватывает все изучаемые месторождения. Можно предположить, что

генезис образования месторождений УВ имеет одну природу. Поэтому в пределах этих зон возможно открытие новых залежей углеводородов.

С тектонической позиции строение высоких градиентов ТП рассматриваем как локальные пликативные разломы осадочного чехла. На практике обнаруженные массивные залежи могут быть частично осложнены второстепенными разломами. Это может привести к изменению строения продуктивного горизонта и, как следствие, повлиять на качество покрышки. Поэтому разрыв в латеральной корреляции пласта разбивает его на две (а и b) самостоятельные залежи нефти.

Следующим примером, иллюстрирующим эффективность применения ТВТ, является высокоперспективная зона поиска УВ в пределах месторождений нефти Бельас (8), Абу-Духур (9), Джхар (6) (см. рис. 6). В основании геотермического этажа на глубине 3910 м располагается продуктивный нефтяной слой. Пластовая залежь сформирована рыхлыми породами по кровле антиклинальной структуры (см. рис. 6). Разрез чехла местами значительно дифференцирован по строению. Прослеживается горизонтальное сжатие (надвиг) пластов, которое приводит к чередованию плотных и разуплотненных зон на разных глубинах. Образуются наклонные зоны коллекторов и складчатость среды (рис. 10).

Как показывает практика, наибольший эффект интерпретации достигается при использовании интервала значений поля в пределах одного геотермического этажа. В этом случае на срезе появляются линейные зоны разломов (синего цвета) и слабо изомерные объекты, которые мало выражены в интегральном поле. Возникновение скрытых структур в строении осадочного чехла используется для последующего детального районирования территории при поисках УВ. В нашем случае интерес представляет крупная зона А приоритетного поиска нефти. Она расположена северо-восточнее от нефтяного месторождения Джхар с глубинами продуктивного горизонта 3110 м. Блок сформиро-

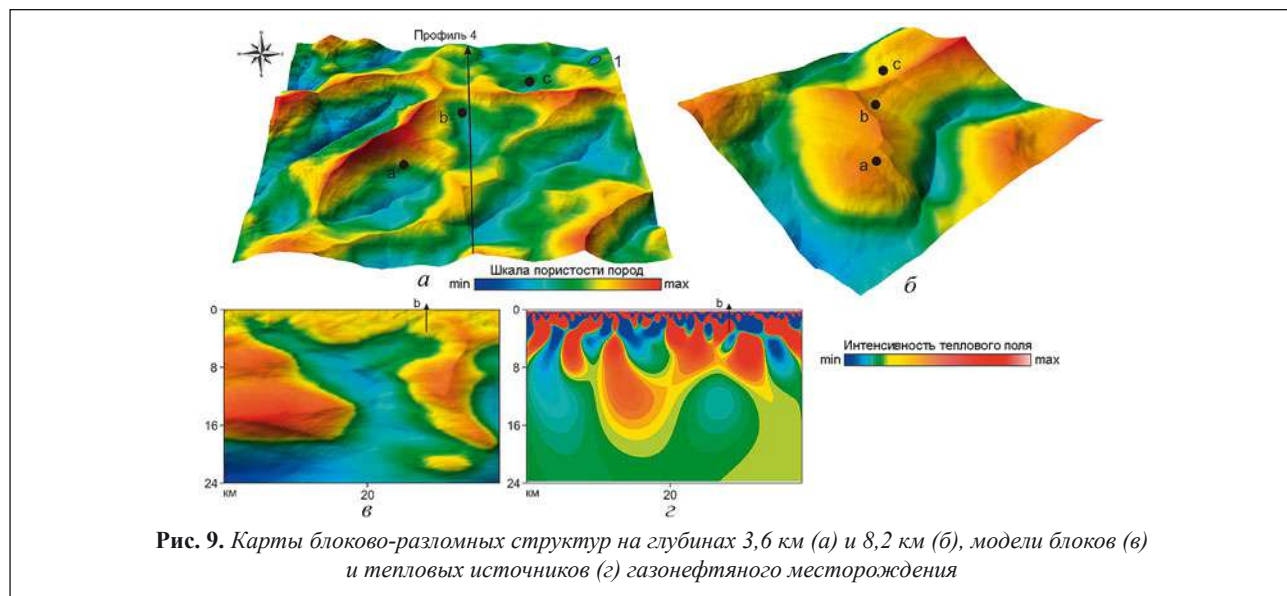
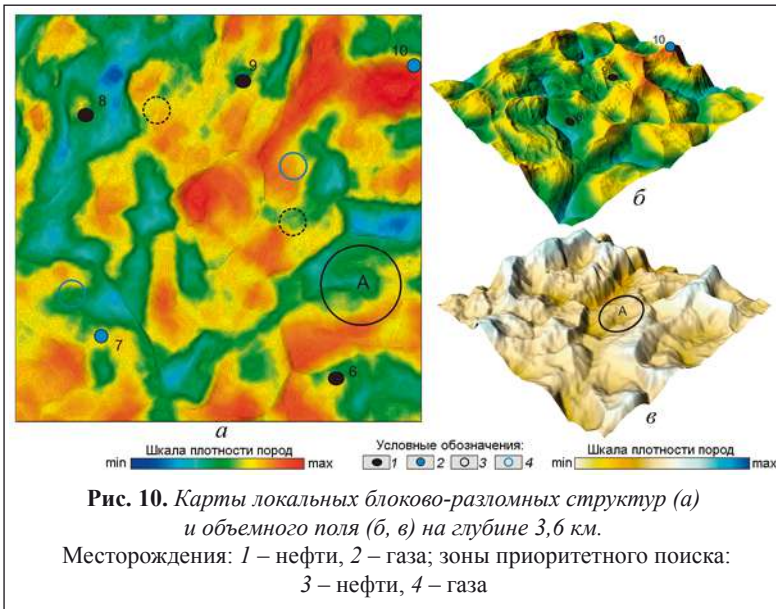


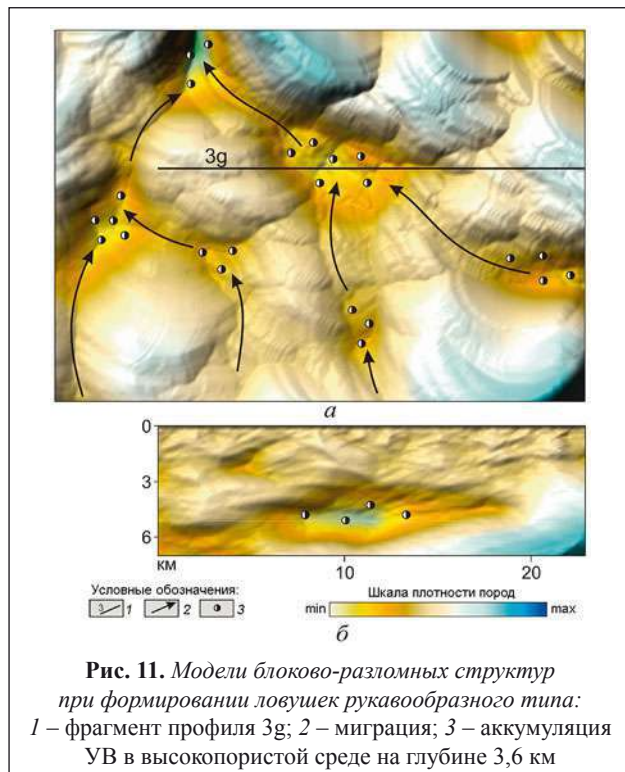
Рис. 9. Карты блоково-разломных структур на глубинах 3,6 км (а) и 8,2 км (б), модели блоков (в) и тепловых источников (г) газонефтяного месторождения



ван из террас, распространение которых ограничено разломом. Возникает дискретность, блоковая мозаичность и композитность в строении структурной зоны.

Сложно построенные рукавообразные структуры осадочного чехла

В работе изучены сложно построенные нетрадиционные структуры осадочного чехла как геологический объект поиска углеводородов. Анализ материала свидетельствует о том, что образование осадочных коллекторов происходило в благоприятных условиях для ряда ловушек (рукавообразных, линзовидных и баро-



вых), которые являются одним из резервов добычи нефти и газа в Сирии. Неоднократное проявление трансгрессии и регрессии морского бассейна в относительно активное тектоническое время на территории Аравийской платформы определяло неустойчивую динамическую обстановку, создавая значительную литолого-фациальную изменчивость терригенных осадков, с замещением проницаемых разностей непроницаемыми на коротких расстояниях. При этом региональные разломы формировали многообразные направления трещиноватости блоков коры. Такая ситуация потребовала всестороннего изучения тепловых свойств пород фундамента, исследования характера распределения и формирования трещинных систем, закономерностей размещения залежей в коллекторах нетрадиционного типа (рис. 11).

Установлено, что формирование сложно построенных ловушек происходит при следующих условиях, которые являются признаками ТВТ при эффективном поиске рукавообразных залежей:

- 1) присутствие в разрезе разуплотненной протяженной зоны извилистой формы, сопоставимой с тектоническим нарушением среды;
- 2) присутствие наклонной поверхности фундамента для свободной миграции крупного обломочного материала;
- 3) наличие на пути сноса осадков локальных выступов, создающих природный барьер, в результате которого происходит формирование обломочного осадочного материала и постепенное накопление пористого слоя;
- 4) развитие над коллектором плотной покрывки, создающей условия сохранения залежи углеводородов;
- 5) развитие наклонного разлома на глубине, по которому происходила миграция легких углеводородов к поверхности земли.

В результате геотермического районирования САР определено, что открытие новых сложно построенных залежей углеводородов следует увязывать с провинцией Джебель Абд аль-Азиз на северо-востоке, с южной частью плато Алеппо и с системой разломов Евфрат грабена в восточной части Сирии.

Заключение

Изучение строения литосферы Сирии посредством дистанционного зондирования с количественной характеристикой тепловых полей до настоящего времени не проводилось. Впервые показано, что система многочисленных профилей и карт ТВТ разного масштаба построения дает полноценный экспериментальный материал и существенно дополняет современные представления о формировании глубинного строения тектоносферы САР.

Форма и внутреннее гетерогенное строение земной коры нефтегазовых провинций Сирии хорошо увязываются с тектоническими нарушениями разного ранга.

Процесс локализации глубинных флюидогазовых эманий в осадочном чехле региона обусловлен активными зонами разломов разного времени и глубины заложения. Месторождения нефти и газа приразломного типа имеют широкое распространение на территории САР.

В процессе ТВТ исследований северной части Аравийской платформы при нефтепоисковых работах нами проведена дополнительная комплексная интерпретации материалов сейсморазведки, грави- и магнитометрии. Изучены процессы формирования тепловых характеристик при районировании рудных полей в условиях палеомагнетизма юго-западной части САР и с позиции сейсмической активности сейсмогенерирующих тектонических нарушений. Полученные материалы доказывают состоятельность технологии тепловизионной томографии геологической среды.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Crustal shortening in the Palmyride fold belt, Syria, and implications for movement along the Dead Sea fault system* / T.A. Chaimov, M. Barazangi, D. Al-Saad, T. Sawaf, A. Gebran // *Tectonics*. – 1990. – Vol. 9. – Pp. 1369–1386.
2. *Continental Margin Evolution of the Northern Arabian Platform in Syria* / J. Best, M. Barazangi, D. Al-Saad, T. Sawaf, A. Gebran // *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. – 1993. – Vol. 77. – Pp. 173–193.
3. Ponikarov V.P. *The Geological Map of Syria. Scale 1: 500.000. Explanatory notes.* – Syrian Arab Republic, Ministry of Industry, Damascus, 1966.
4. Lovelock P.E. *A review of the tectonics of the northern Middle East region* // *Geol. Mag.* – 1984. – Vol. 121. – Pp. 577–587.
5. De Ruiter R.C., Lovelock P.R., Nabulsi N. *The Euphrates Graben of eastern Syria: A new petroleum province in the northern Middle East* // *The Middle East Petroleum Geosciences. Gulf PetroLink.* – Bahrain, 1995. – Vol. 1. – Pp. 357–368.
6. *The intraplate Euphrates depression – Palmyrides mountain belt junction and relationship to Arabian plate boundary tectonics* / D. Alsdorf, M. Barazangi, R. Litak, D. Seber, T. Sawaf, D. Al-Saad // *Annali di Geofisica.* – 1995. – Vol. 38. – № 3/4. – Pp. 385–397.
7. *Tectonic and Geologic Evolution of Syria* / G. Brew, M. Barazangi, A.K. Al-Maleh, T. Sawaf // *Gulf PetroLink. Geo Arabia.* – Bahrain, 2001. – Vol. 6. – № 4. – Pp. 573–616.
8. *Mesozoic–Cenozoic evolution of the intraplate Euphrates fault system, Syria: implications for regional tectonics* / R.K. Litak [et al.] // *Journal of the Geological Society.* – London, 1997. – Vol. 154. – Pp. 653–666.
9. Kent N., Hickman R.G. *Structural development of Jebel Abd Al Aziz, Northeast Syria* // *GeoArabia.* – 1997. – Vol. 2. – № 3. – Pp. 307–330.
10. Каримов К.М., Каримова Л.К., Гатауллин К.Р. *Тепловизионная томография геологической среды.* – Казань, 2015. – 297 с.
11. *Космическое дистанционное зондирование в инфракрасном диапазоне при поисках залежей углеводородов в бассейне DOUALA (Республика Камерун)* / К.М. Каримов, А. Ал Али, Т.А. Вагапов, М.А. Лоншаков // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений.* – 2021. – № 7(355). – С. 20–25. – DOI: 10.33285/2413-5011-2021-7(355)-20-25
12. Utemov E.V., Nurgaliev D.K. *Natural Wavelet Transformations of Gravity Data: Theory and Applications* // *Izvestia Physics of the Solid Earth.* – 2005. – Vol. 41(4). – Pp. 88–96.

REFERENCES

1. *Crustal shortening in the Palmyride fold belt, Syria, and implications for movement along the Dead Sea fault system* / T.A. Chaimov, M. Barazangi, D. Al-Saad, T. Sawaf, A. Gebran // *Tectonics*. – 1990. – Vol. 9. – Pp. 1369–1386.
2. *Continental Margin Evolution of the Northern Arabian Platform in Syria* / J. Best, M. Barazangi, D. Al-Saad, T. Sawaf, A. Gebran // *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. – 1993. – Vol. 77. – Pp. 173–193.
3. Ponikarov V.P. *The Geological Map of Syria. Scale 1: 500.000. Explanatory notes.* – Syrian Arab Republic, Ministry of Industry, Damascus, 1966.
4. Lovelock P.E. *A review of the tectonics of the northern Middle East region* // *Geol. Mag.* – 1984. – Vol. 121. – Pp. 577–587.
5. De Ruiter R.C., Lovelock P.R., Nabulsi N. *The Euphrates Graben of eastern Syria: A new petroleum province in the northern Middle East* // *The Middle East Petroleum Geosciences. Gulf PetroLink.* – Bahrain, 1995. – Vol. 1. – Pp. 357–368.
6. *The intraplate Euphrates depression – Palmyrides mountain belt junction and relationship to Arabian plate boundary tectonics* / D. Alsdorf, M. Barazangi, R. Litak, D. Seber, T. Sawaf, D. Al-Saad // *Annali di Geofisica.* – 1995. – Vol. 38. – № 3/4. – Pp. 385–397.
7. *Tectonic and Geologic Evolution of Syria* / G. Brew, M. Barazangi, A.K. Al-Maleh, T. Sawaf // *Gulf PetroLink. Geo Arabia.* – Bahrain, 2001. – Vol. 6. – № 4. – Pp. 573–616.
8. *Mesozoic–Cenozoic evolution of the intraplate Euphrates fault system, Syria: implications for regional tectonics* / R.K. Litak [et al.] // *Journal of the Geological Society.* – London, 1997. – Vol. 154. – Pp. 653–666.
9. Kent N., Hickman R.G. *Structural development of Jebel Abd Al Aziz, Northeast Syria* // *GeoArabia.* – 1997. – Vol. 2. – № 3. – Pp. 307–330.
10. Karimov K.M., Karimova L.K., Gataullin K.R. *Teplovizionnaya tomografiya geologicheskoy sredy.* – Kazan', 2015. – 297 s.
11. *Kosmicheskoe distantsionnoe zondirovanie v infrakrasnom diapazone pri poiskakh zalezhey uglevodorodov v bassejne DOUALA (Respublika Kamerun)* / K.M. Karimov, A. Al Ali, T.A. Vagapov, M.A. Lonshakov // *Geologiya, geofizika i razrabotka nefyanykh i gazovykh mestorozhdeniy.* – 2021. – № 7(355). – S. 20–25. – DOI: 10.33285/2413-5011-2021-7(355)-20-25
12. Utemov E.V., Nurgaliev D.K. *Natural Wavelet Transformations of Gravity Data: Theory and Applications* // *Izvestia Physics of the Solid Earth.* – 2005. – Vol. 41(4). – Pp. 88–96.

Информация об авторах

Камиль Мидхатович Каримов (д-р геол.-минер. наук, профессор)
kamil1955@inbox.ru
Ахмад Ал Али
alali.syy@gmail.com
Марат Андреевич Лоншаков
maratlonsh@gmail.com

Казанский (Приволжский) федеральный университет
Казань, Россия

Information about the authors

Kamil M. Karimov (Dr. of geol.-mineral. sci., Professor)
kamil1955@inbox.ru
Akhmad Al Ali
alali.syy@gmail.com
Marat A. Lonshakov
maratlonsh@gmail.com

Kazan (Volga region) Federal University
Kazan, Russia



РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

НЕФТИ и ГАЗА

(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

имени И.М. ГУБКИНА

Базовый вуз нефтегазового комплекса России