ISSN 2663-0419 (Online)
ISSN 2218-8754 (Print)

AZERBAIJAN NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES

ANAS TRANSACTIONS

EARTH SCIENCES



www.journalesgia.com

2021
№2

We are Crossref Member

ELSEVIER Scopus

Crossref
This journal is included and indexed in the *GeoRef* database

REDAKSİYA HEYƏTI

Əlizadə Ak.A. – baş redaktor (Azərbaycan), Qədirov F.Ə. – baş redaktorun müavini (Azərbaycan), Süleymanov B.Ə. – baş redaktorun müavini (Azərbaycan), Quliyev İ.S. – baş redaktorun müavini (Azərbaycan), Babayev Q.R. – baş redaktorun müavini) (Azərbaycan), Babazadə V.M. (Azərbaycan), Calalov Q.İ. (Azərbaycan), Əliyeva E.H. (Azərbaycan), Əfəndiyev Q.M. (Azərbaycan), Feyzulayev Ə.Ə. (Azərbaycan), Kəngərli T.N. (Azərbaycan), Məmmədov P.Z. (Azərbaycan), Muxtarov A.Ş. (Azərbaycan), Salmanov A.M. (Azərbaycan), Yetirmişli Q.C. (Azərbaycan).

Allen Mark (Böyük Britaniya), Aydın Ali (Türkiyə), Çelidze T. L. (Gürcüstan), Eppelbaum L.V. (İsrail), İsmail-zadə Ə.T. (Almaniya), Kalafat Doğan (Turkiyə), Kərimov V.Y. (Rusiya), Qliko A.O. (Rusiya), Lavruşin V.Y (Rusiya), Reilinger R. (ABŞ), Şnyukov Y.F. (Ukrayna), Takeşi Sagiya (Yaponiya), Talebian M. (İran), Tibaldi Alessandro (İtaliya), Vişnyakov V.M. (Böyük Britaniya), Zavyalov A.D. (Rusiya).

EDITORIAL BOARD

Alizadeh Ak.A. – Editor-in-Chief (Azerbaijan), Kadirov F.A. – Deputy Editor-in-Chief (Azerbaijan), Suleimanov B.A. – Deputy Editor-in-Chief (Azerbaijan), Guliyev I.S. – Deputy Editor-in-Chief (Azerbaijan), Babayev G.R. – Deputy Editor-in-Chief (Azerbaijan), Afandiyev G.M. (Azerbaijan), Aliyeva E.H. (Azerbaijan), Babazade V.M. (Azerbaijan), Feyzullayev A.A. (Azerbaijan), Jalalov G.I. (Azerbaijan), Kangarli T.N. (Azerbaijan), Mammadov P.Z. (Azerbaijan), Mukhtarov A.Sh. (Azerbaijan), Salmanov A.M. (Azerbaijan), Yetirmishli G.J. (Azerbaijan).

Allen Mark **(**United Kingdom), Aydın Ali (Turkey), Chelidze T.L. (Georgia), Eppelbaum Lev V. (Israil), Gliko A.O. (Russia), Ismail-zadeh A.T. (Germany), Kalafat Doğan (Turkey), Kerimov V.Y. (Russia), Lavrushin V.Y. (Russia), Reilinger R. (USA), Shnyukov Y.F. (Ukraine), Takeshi Sagiya (Japan), Talebian M. (Iran), Tibaldi Alessandro (Italy), Vishnyakov V.M. **(**United Kingdom), Zavyalov A.D. (Russia).

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ализаде Ак.А. – главный редактор (Азербайджан), Кадиров Ф.А. – зам.главного редактора (Азербайджан), Сулейманов Б.А. – зам.главного редактора (Азербайджан), Гулиев И.С. – зам.главного редактора (Азербайджан), Бабаев Г.Р. – зам.главного редактора (Азербайджан), Алиева Э.Г. (Азербайджан), Бабазаде В.М. (Азербайджан), Джалалов Г.И. (Азербайджан), Етирмишли Г.Дж. (Азербайджан), Кенгерли Т.Н. (Азербайджан), Мамедов П.З. (Азербайджан), Мухтаров А.Ш. (Азербайджан), Салманов А.М. (Азербайджан), Фейзуллаев А.А. (Азербайджан), Эфендиев Г.М. (Азербайджан).

Айдын Али (Турция), Аллен Марк (Великобритания), Вишняков В.М. (Великобритания), Глико А.О. (Россия), Завьялов А.Д. (Россия), Исмаил-заде А.Т. (Германия), Калафат Доган (Турция), Керимов В.Ю. (Россия), Лаврушин В.Ю. (Россия), Рейлингер Р. (США), Такеши Сагия (Япония), Талебиан М. (Иран), Тибальди Алессандро (Италия), Челидзе Т.Л. (Грузия), Шнюков Е.Ф (Украина), Эппельбаум Л.В. (Израиль).

Buraxılışına məsul: **Hafiz Abıyev**

Dizayn/Qrafika: **Kərim Nəbiyev**
Xəlil Nəbiyev

Veb-redaktor: **Tofiq Rəşidov**

Jurnal Azərbaycan MEA Geologiya və Geofizika İnstitutunda yığılmış və səhifələnmişdir

* * *

Responsible for the issue: **Hafiz Abiyev**

Design/Graphycs: **Karim Nabiyev**
Khalil Nabiyev

Web-editor: **Tofig Rashidov**

This journal has been prepead at the Geology and Geophysics Institute of Azerbaijan National Academy of Sciences

* * *

Ответственный за выпуск: **Хафиз Абиев**

Дизайн/графика: **Керим Набиев**
Халил Набиев

Веб-редактор: **Тофиг Рашидов**

Журнал набран и сверстан в Институте геологии и геофизики НАН Азербайджана

* * *

Ünvan: AZ1001, Bakı şəhəri, İstiqlaliyyət küçəsi 30, "ANAS Transactions, Earth Sciences"

Address: "ANAS Transactions, Earth Sciences" 30, Istiglaliyyat str., Baku, Azerbaijan, AZ1001

Адрес: AZ1001, г. Баку, Истиглалият, 30. Редакция "ANAS Transactions, Earth Sciences"

* * *

İcraçı redaktorlar: **A.A.İsrafilova, C.S.Qurbanova**
Executive Editors: **A.A.Israfilova, J.S.Gurbanova**
Исполнителные редакторы: **А.А.Исрафилова**
Дж.С.Курбанова

ELM NƏŞRİYYATI

Formatı: 60x84$^{1/8}$. Həcmi: 10,5 ç.v.
Tirajı: 300 nüsxə

© "Elm" nəşriyyatı, 2021

ANAS Transactions Earth Sciences 2 / 2021

http://www.journalesgia.com

PETROLOGICAL FACTORS OF FORMATION OF CENTRAL LOK-GARABAKH ZONE INTRUSION COMPLEXES OF UPPER JURASSIC – EARLY CRETACEOUS AGE

Mammadov M.N.[1], Babaeva G.J.[1], Veliyev A.A.[2], Abbasov K.F.[1], Sariyev F.H.[1], Bayramov A.A.[2]

[1]Institute of Geology and Geophysics, Azerbaijan National Academy of Sciences
119, H.Javid Ave., Baku, Azerbaijan, AZ1143: musamamedov@rambler.ru
[2]Azerbaijan International Mining Company,
1033, Izmir str., Hayat Tower 2, Baku, Azerbaijan, AZ1065

Keywords: *Gadabay-Soyudlu intrusion, crystallization temperature and partial pressure of Oxygen, gabbroid phase, quartz diorite phase*

Summary. The presented paper is dedicated to the study of the formation of the Gadabay-Soyudlu intrusion of Upper Jurassic – Lower Cretaceous age based on complex geological-mineralogical researches. As a result, it was proved that the intrusion and its comagmatic volcanic analogues have been formed within the mature volcanic island arc setting. By the results of titaniferous magnetite-ilmenite and pyroxene thermobarometers gabbroid rocks of the first phase have been crystallized in the high thermobaric conditions. Ni (millerite) and Co (cobaltite) ore mineralizations related to this phase of the intrusion are found in the rocks. The vein rocks of the gabbroid phase are fine grained crystalline rocks such as micro-gabbro, spessartite, diabase. Rock members of the gabbroid phase have been formed under the control of crystallization-differentiation in magmatic chambers located in the upper crust under relatively high thermobaric conditions.

The derivatives of the quartz-diorite or second phase crystallized under the lower thermobaric conditions ($T \approx 780^oC$). The vein rocks of this phase are aplite and granite-pegmatite occurring in the areoles of the second phase. The second phase has also formed within the upper crust, but crystallization temperature was dropped and partial pressure of oxygen was increased.

Both first phase and second phase derivatives have been crystallized from the primary tholeiitic magma relatively enriched in Al_2O_3 within the mature volcanic island arc setting under the control of differential crystallization process.

The gold-pyrite, gold-polymetallic and gold-barite-copper-polymetallic ore mineralization were justified to be related to the quartz diorite phase magmatism.

© 2021 Earth Science Division, Azerbaijan National Academy of Sciences. All rights reserved.

Introduction

Nowadays, the results of petrological and geodynamic researches are one of the principal criterions in the study of formation and localization of natural mineral resources. In this context, the initial composition of magmatic melts and the geologic-geodynamic situtations controlling their evolution process have the crucial role. The formation of initial melts with different compositions directly depends on physical-chemical and geological-geodynamic situations. These melts can pass different evolution paths depending on existing geodynamic situations. In this context, in the mature ensialic island arc environment the representative typomorphic calc-alkaline basaltic intrusive rocks and their derivatives, as well as their effusive comagmatites are formed through the staged processes, whereas in the ensimatic island arc environment the derivatives of tholeiitic basalt magma are formed. In other geodynamic situations absolutely different magmatic rocks are formed.

Geology of the Region

The Lok-Garabakh zone in the structural-geological context is situated in the central part of the Mediterranean folding belt, more precisely in the Caucasus-Zagros segment of the belt and formed as a result of the northern subduction of the Mesotethys ocean (Rustamov, 2019; Panov, 2013; Adamia etc., 1977). In the early Jurassic ages Mesotethys had larger width in the east and the narrower in the west dividing Gondwana and Laurasia. This mature island arc starts from the Aras river in the eastern south and extends to the western north along the main Caucasus direction to the Lok-Garabakh crystallic massive. From here the zone turns to west, that is, continues along latitude direction to the Pond moun-

tains. That's why most geologists call this zone as Lok-Garabakh-Pond mature island arc.

In the Azerbaijan territory the Lok-Karabakh zone is situated in the north-eastern slopes of the Lesser Caucasus. In the geological structure of the zone, magmatic, volcanic, metamorphic, volcano-sedimentary and normal sedimentary rock complexes of Paleozoic and Mesozoic age are present. The oldest basement rocks in the studied region are exposed in the deep erosional cross-section of Asrik, Akhinja, Hasansu, Khrami rivers in the western extension of the zone. Here, the complexes of this crystallic basement consist of intensively metamorphosed schists and graphitized, sericitized, amphibolized gneisses. Basal conglomerates of quite thickness (250 m) of Hettangian age are superposed on them.

Referring to researchers (Rustamov, 2019; Adamia et al., 1977), it can be highlighted that the upheaving environment in the basement part of this zone within the Lesser Caucasus predominated during the Upper Carbon – Early Jurassic period. Hence, transgressive basal conglomerates of quite thickness were formed here. In the valleys of both Hasansu and Asrik rivers intensively metamorphosed schists (Sinemurian, Pliensbachian, Toarcian, Early Aalenian) argillites, fine grained sandstones of small thickness occur. The contacts of Early and Middle Jurassic ages can be observed in Shamkir, Shamsaddin, Allahverdi anticlinoria.

The pause in geological "lull" was interrupted with the Early Bajocian volcanism. Volcanic rocks are presented in the geological structure of Shamkir, Murovdagh, Shamsaddin, Allahverdi anticlinoria mostly as lava-pyroclastic and sub-volcanic facies (Abdullaev, 1963). The thickness of the Lower Bajocian stage varies between 1500-2000 meters. In composition they correspond to porphyritic basalt, basaltic andesite and rarely andesite. In the Upper Bajocian stage the volcanic facies of quartz-plagioclase rhyolite, rhyodacite composition and their comagmatic intrusive analogues widely distributed in the studied area and demonstrated bimodal relationship with the Lower Bajocian volcanic rocks were formed. These comagmatites are presented in the geological structure of Murovdagh, Goy-gol, Shamkir, Shamsaddin, Allahverdi anticlinoria. And volcanic rocks conformably overlay the basalts and basaltic andesites of the Lower Bajocian stage. Intrusions of the Upper Bajocian age are exposed as Atabay-Slavyanka, Gilanbir, Mehrab, Tovuz, Akhpat outcrops. Their age to be Upper Bajocian (166±1 Ma, 176±1 Ma) is proved by conducted geochronological studies (Sadygov, 2019) and by the geological position of intrusions (Abdullaev, 1979). The mentioned intrusions and their volcanic rock analogues non-conformably lay upon Bajocian volcanic rocks in Shamkir, Murovdagh and Goy-gol anticlinoria of the Lok-Karabagh zone.

Volcanic and volcanic-sedimentary rocks of the Bathonian stage within the Shamkir horst anticlinorium are distributed scarcely comparing with the Garadakh, Murovdagh, Shamsaddin, Allahverdi anticlinoria. They are mostly composed of agglomerate tuff, tuff-breccia, volcanic breccia and conglomerates. The composition of volcanic breccia and lava covers is mainly basaltic, andesite-basaltic, andesitic, dacitic and in limited amount rhyolitic. The subvolcanic facies of the described volcanic rocks occur as dikes, stocks of small diameter and sills.

Sedimentary rocks of the Callovian-Oxfordian stages lay upon narrowly spread volcanic rocks of the Bathonian stage in the north-western and south-eastern flanks of the Shamkir anticlinorium. This geological lull was interrupted by the Upper Jurassic (Kimmeridgian) volcano-plutonic magmatic processes. These processes were more intensive in the Kimmeridgian – Early Cretaceous period in the north-eastern flanks of the Shamkir anticlinorium.

The volcanic processes have widely developed in the north-western and north-eastern flanks of the anticlinorium, more precisely in its contact with the Kazakh synclinorium. Along with this the Kimmeridgian volcanism is widely spread along the eastern slope of the Lesser Caucasus, especially in the downstream parts of the Injachay and Tartar rivers in the northern flanks of the Aghchakand synclinorium. The rocks of pyroclastic facies predominate within the Kimmeridgian – Lower Cretaceous volcanic rocks. Effusive rocks of small thickness consist of andesite, dacite, andesitic dacite. In the north-western part of the Shamkir horst anticlinorium volcanic rocks of the Early Cretaceous (Valanginian) are subalkaline trachyandesitic, trachyandesitic in composition. Besides, these rocks occur in the south-eastern part of the Murovdagh anticlinorium.

In comparison with the middle Jurassic intrusions the Upper Jurassic – Lower Cretaceous intrusive rock complexes are widespread in the Lok-Karabagh zone. They widely occur in the geological structure of the Allahverdi, Shamkir, Murovdagh, Aghdam, Goy-gol, Gaphan anticlinoria and Dashkasan, Agchakand, Aghdara etc. synclinoria of the Lok-Karabakh zone. Their age to be Upper Jurassic (159 Ma, 138 Ma) is proved by determining of the absolute age (Sadygov, 2019) and by the geological studies (Abdullaev, 1979).

The Gadabay-Soyudlu intrusion itself has a great petrogenetic importance in the formation of ore forming and ore-bearing metasomatites as well as in the formation of phases and facia compared to the aforementioned intrusions. This fact really requires further study of the geological, petrogenetic and metallogenic peculiarities of this intrusive complex.

The Gadabay-Soyudlu intrusion of the Upper Jurassic – Lower Cretaceous age in present topography starts from the same named settlement in the north-west to the confluence of Gadabaysu and Shamkir rivers in the northeast. Its north-western border extends until Arikhdam and Qaradagh villages. Plagioclase rhyolites of the Upper Jurassic in the north-western contact of the intrusion have been changed to secondary quartzite of various intensity, while in the south-eastern, eastern contacts in the Soyuqbulaq village scarnization occurs. Volcanic rocks of the Lower Bajocian stage are intensively exposed to chloritization, limonitization. By the calculation of H.I.Karimov (Karimov, 1963) the total area of intrusion is 42 km^2.

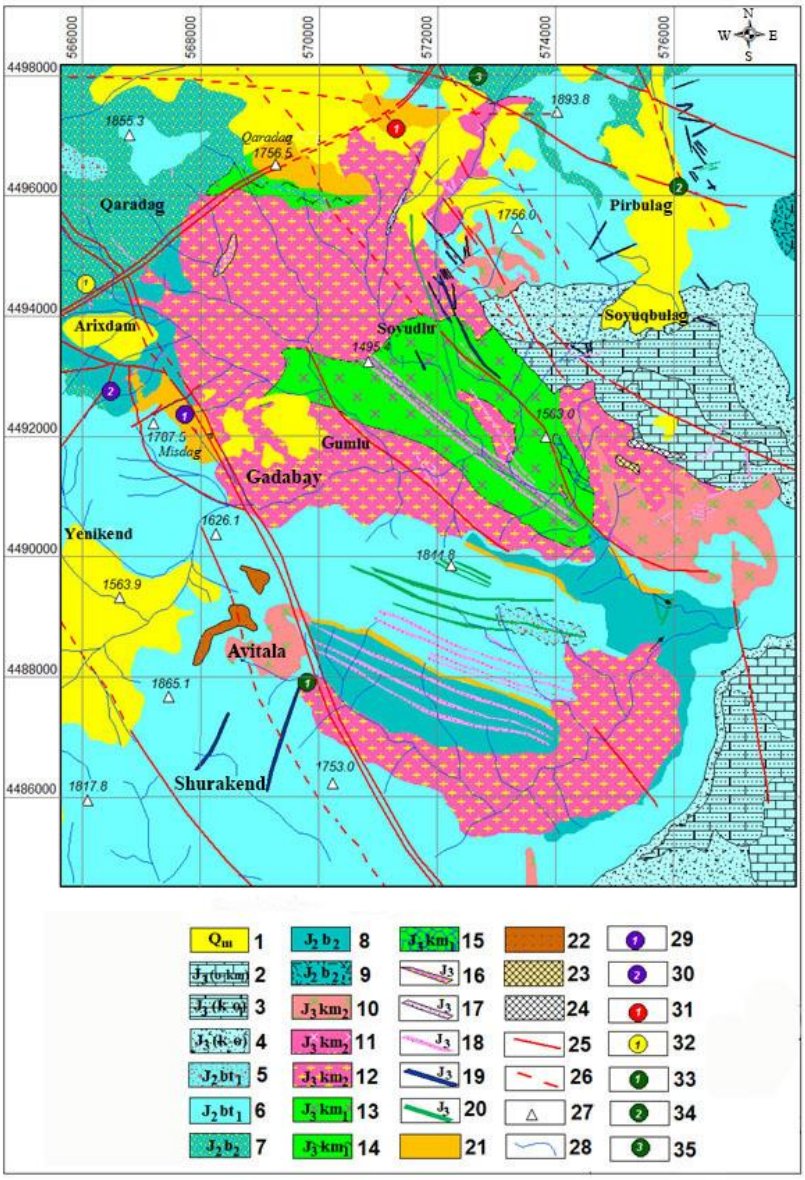


Fig 1. Lithological-structural map of the south-eastern part of the Gadabay ore region

Legend: 1 – Quaternary sediments; 2 – Limestone layer (Lusitanian): alternation of limestones with limestones and tuff-sandstones; 3 – Upper tuff-conglomerate layer: tuff-sandstones, alternation of tuffs and limestones, sandy limestones and sandstones; 4 – Lower tuff-conglomerate layer: tuff-conglomerates, tuff-breccias, tuff sandstones; 5 – Metamorphically altered tuffs; 6. Bathonian sub-volcanic layer: tuff-breccias containing tuff, tuff-conglomerates; 7 – Upper Bajocian stratum: rhyolite-riodacitic lava fascia; 8 – Lower Bajocian volcanic layer: andesitic lava fascia; 9 – Lower Bajocian stratum: pyroclastic fascia of tuff-breccia and andesite porphyries; 10 – Garagaya-Garamurad hypabyssal sub-intrusion: diorite, keratospilit; 11 – The second phase of Gadabay intrusion: diorites; 12 – The second phase of Gadabay intrusion: granodiorites, quartz diorites, diorite-syenites, diorites; 13 – The first phase of Gadabay intrusion: gabbro-diorites, gabbro; 14 – The first phase of Gadabay intrusion: gabbro-norites, gabbro; 15 – The first phase of Gadabay intrusion: gabbro-pyroxenites; 16 – Syenite-diorite dykes; 17 – Aplite dyke, 18 – Quartz-diorite dyke; 19 – Andesite dykes; 20 – Diabase dykes; 21 – Metasomatites; 22 – Greisenization (metasomatic quartzites with tourmaline); 23 – Skarns (garnet-vollastanite-calcite fascia); 24 – Skarns (carbonate-epidote fascia); 25 – Faults; 26 – Presumed faults; 27 – Altitude references, 28 – Rivers; 29 – Gadabay deposit; 30 – Gadir mineralization area; 31 – Great Galacha copper-porphyry ore manifestation; 32 – Cholpan sulfur-pyrite ore manifestation; 33 – Ayitala copper-pyrite ore manifestation; 34 – Pirbulag copper-pyrite ore manifestation; 35. Parakand-su copper-pyrite ore manifestation.

The described intrusion has been studied by numerous researchers with different approaches (Abdullaev, 1963; Karimov, 1963; Mustafaev, 1977; Ramazanov, 1993; Sadygov, 2019 etc.). All these researchers have mainly investigated the geology, petrography and mineralization of outcrops of the Bajocian and Upper Jurassic – Lower Cretaceous intrusions in the Gadabay mineralization zone. However, they haven't analyzed the geological formation conditions, physical-chemical conditions of crystallization, mineralization and localization of intrusion from point of view of plate tectonics.

Methodology

In the paper the results of analyses of 19 rock samples have been used to study the geological-geodynamic and physical-chemical conditions of the formation of the phases of the Gadabay-Soyudlu intrusion. To determine the physical-chemical conditions of the crystallization of the magmatic rocks, the results of microprobe analyses (Jeol, JSM-66 10LV) of 6 samples of pyroxene and 8 samples of iron-titanium oxide minerals have been used. Furthermore, X-ray diffractometric (Oxford instruments, X-Max) analyses of 19 samples have been run to analyze the homogeneity of the pyroxenes and iron-titanium oxide minerals. The petrographic description of the relevant rocks has been done using "Carl Zeiss Axio Imager A2m" polarized microscope. All aforementioned analyses and procedures have been done in the Institute of Geology and Geophysics of Azerbaijan National Academy of Sciences. Monomineralic separation of magmatic rocks has been conducted in the Geological and Geophysical Institute of Russian Federation. Polished sections of the ore minerals also have been studied with "Carl Zeiss Axio Imager A2m" polarized microscope.

Petrographic and mineralogical characteristics

From the presented map (Fig. 1) it can be seen that the Gadabay-Soyudlu intrusion is composed of two phases. The first phase consists of gabbroid rocks and the second one of quartz-diorite. However, along with this rock the diabase (dolerite, microgabbro) and dikes of acidic composition with northwestern orientation are widespread in the area. The first type dikes are the derivatives of gabbroid rocks and the second ones are of granodiorites.

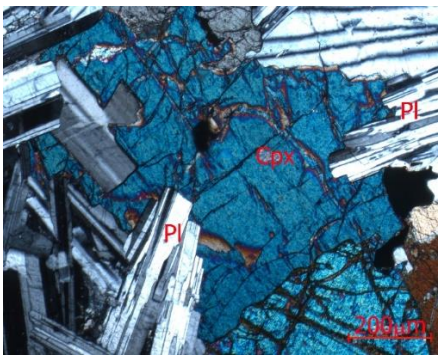
Derivatives of the first phase occur in the outcrops located in the central part of Gadabay-Soyudlu intrusion. Besides, these petrographic type rocks are found near the Almali-tala settlement. The first derivatives of the first phase are considered to be coarse grained, total crystalline gabbro and gabbro-norite of dark black color. Under the microscope gabbro-norite has gabbro-ophitic texture (Fig. 2a). The first idiomorphic granular, non-oval crystalline phase is composed of gialosiderite (Fa_{35-40}) (Fig. 2b).

Its concentration changes between 3-6% in the rock. It is distinguished by characteristic looped texture. According to the crystallization sequence the next mineral is a short prismatic hypersthene. It mostly forms intergrowths with basic plagioclase. And its concentration doesn't exceed 7-8% in the rock. The main rock forming mineral is considered to be plagioclases of the labradorite-bytownite composition. They are presented in two generation making characteristic polysynthetic twinning. The first generation is more likely to undergo alteration processes. The second generation is fresh and predominates in the rock. Clinopyroxene predominates over hypersthene in the rock. Compositionally it is composed of Mg augite (Ng=1.720; Np=1.694; 2V=54-56; CNg=44-46) (fig. 2d). Along with the described minerals Cr magnetite and magnetite are present in gabbro-norite and normal gabbro.

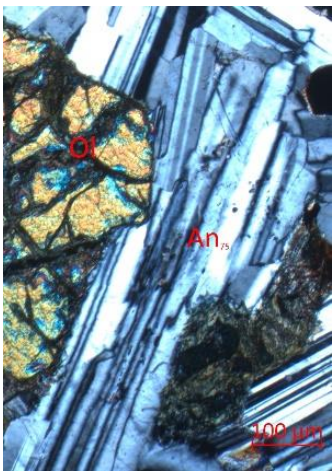
As we noted, within the intrusion gabbro and gabbro-norite of dark black color are gradually replaced by melanocratic gabbro of pale black color and they in turn by leucocratic gabbro of greyish black color. This gradual transition is distinguishable under the microscope. Olivine is practically absent, the content of ortho- and clinopyroxene decreases along the transition, while the content of plagioclase increases and anorthite – decreases. Besides, biotite, hornblende, even secondary uralite, epidote are present in the described rocks. Clearly formed middle titan magnetite is observed in these rocks.

Finally, in the next transition leucocratic gabbroids are replaced by quartz bearing gabbro-diorites. These rocks have a light gray colour, the naked eye can see small grains of quartz with a glassy luster, rare elongated narrow grains of hornblende, straw-yellow grains of biotite with a predominance of plagioclase grains. It should be noted that both pyroxenes undergo uralitization and even chloritization to varying degrees. Very tiny grains such as magnetite and blood red hematite are scattered within these minerals. Fine quartz grains are present in a shapeless, xenomorphic form among the plagioclase grains. Biotite sheets are also distributed narrowly.

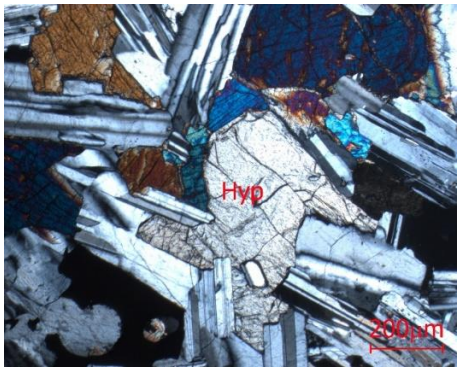
The rocks of gabbroid phase cut through by dykes of kersantite, microgabbro or dolerite in insignificant thickness. From the point of view of petrochemistry (Table 1) it is obvious that the rocks of the first phase have formed under the control of fractional differentiation in the intrusive chamber. The initial derivatives of the intrusion such as gabbro-norite, hypersthene-bearing gabbro-norite, melanocratic gabbro have gradual transition into each other and are olivine normalized (Table 1, an. 1, 2, 3).



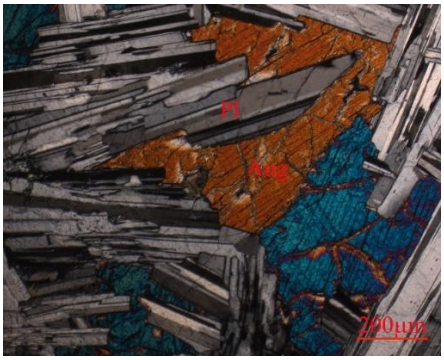
a



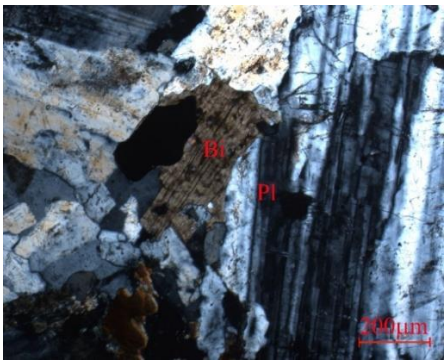
b



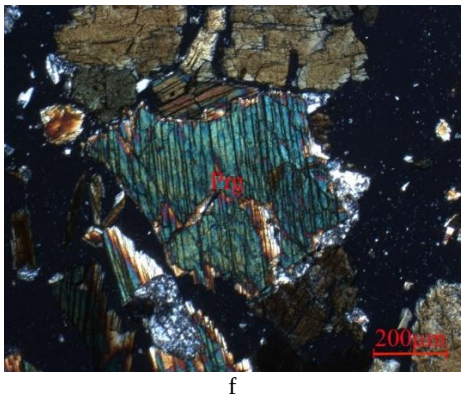
c



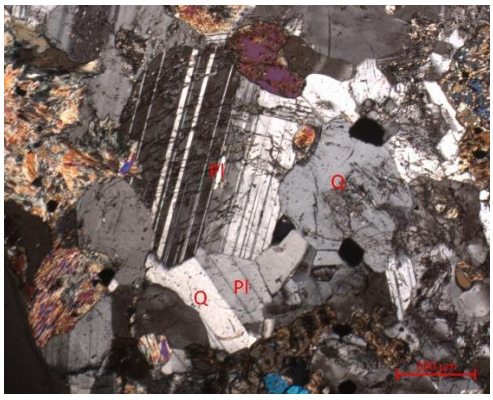
d



e



f



g

Fig. 2. Photomicrographs of the thin sections of rocks of the Gadabay-Soyudlu intrusion

a – gabbro-norite, b – olivine gabbro, c – hypersthene gabbro-norite, d – gabbro, e – diorite, f – pargasite diorite, g – quartz-diorite

Besides, the exceeding of Na_2O over the K_2O is characterized by predominance of normative albite. The behavior of normative anorthite molecule in the rocks can be clearly seen in the table (Table 1). The crystallization temperature of olivine-norite – the first derivative of the described intrusion has been calculated based on (Lindsley, 1983) orthopyroxene-clinopyroxene equilibrium (Table 2, an. 1, 2, 3).

As seen from Table 2, enstatite molecules in both olivine-bearing gabbro-norite and hypersthene-bearing gabbro-norite are close to each other (En=84–85%) in composition and are in equilibrium with Mg-augite (table 2, an. 1, 2).

In quartz diorite concentration of the ferrosilite component of the orthopyroxene increases and the pyroxene has a ferro-hypersthene composition (Table 2). Hence, the fractional differentiation in the intrusive chamber caused an increase of ferrosilite molecule concentration and a decrease of enstatite molecule within the ortho- and clinopyroxenes.

Based on the above data, it can be justified that most likely the primary magma of the Gadabay-Soyudlu intrusion could be high-magnesium tholeiitic basalt partially enriched in Al_2O_3. The first or gabrroid phase of the intrusion has been formed by fractionation in the magmatic chambers under the control of crystallization-differentiation. The geological setting represented the upper horizons of a mature volcanic island arc.

As noted earlier, the second phase of the Gadabay-Soyudlu intrusion is a quartz-diorite complex. This is justified by the fact that both in the Gadabay intrusion and in other intrusive outcrops the predominant petrographic rock types are quartz-diorites, besides gabbroid xenoliths of various sizes occur within these rocks. Along with this, their vein rocks cut gabbroid rocks and sometimes quartz-diorites. In all this, thermal contacts are observed in gabbroid rocks.

Table 1

Chemical and CIPW composition of the representative samples of the Gadabay-Soyudlu intrusion

Components \ Analyses	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO_2	49.46	48.64	49.35	52.73	58.75	60.41	63.51	67.85	57.10
TiO_2	0.48	0.64	0.64	0.67	0.36	0.11	0.16	0.41	0.64
Al_2O_3	18.75	18.64	16.33	19.55	16.64	17.43	15.26	14.54	16.48
Fe_2O_3	3.31	3.26	3.26	3.21	3.28	2.75	3.23	1.96	2.56
FeO	5.86	5.46	7.56	3.27	4.76	3.52	5.36	2.38	3.75
MnO	0.16	0.16	0.24	0.01	0.16	0.11	0.12	0.02	0.14
MgO	6.36	6.42	6.73	4.76	3.82	3.39	2.12	2.24	4.21
CaO	9.21	9.66	9.92	8.70	0.42	6.60	5.16	2.31	5.34
Na_2O	3.42	3.22	3.40	4.42	3.78	3.42	2.38	5.11	3.36
K_2O	0.06	0.38	0.78	0.47	0.42	0.75	1.10	1.54	4.28
P_2O_5	0.14	0.14	0.20	0.01	0.11	0.10	0.16	0.16	0.28
n,n	2.32	2.85	1.48	1.87	0.43	1.20	1.39	1.33	1.38
∑	99.53	99.33	99.77	99.67	99.93	99.79	99.95	99.85	99.52
Ap	0.3	0.3	0.5	-	0.2	0.2	0.4	0.4	0.7
Il	0.9	1.2	1.2	1.1	0.7	0.2	0.3	0.8	1.2
Mt	4.8	4.7	4.7	4.7	4.7	4.5	4.6	2.8	3.7
Or	0.3	2.2	4.5	1.7	2.5	4.5	6.8	9.1	25.3
ab	28.9	27.3	29.8	37.4	32.0	29.0	20.1	43.2	28.4
an	35.6	35.3	26.8	32.1	27.2	30.0	24.7	10.5	11.2
wo	3.8	4.9	8.9	4.6	1.6	0.9	-	-	3.1
en	2.4	3.2	5.2	3.5	1.0	0.6	-	-	2.1
fs	1.16	1.3	3.3	0.6	0.6	0.3	-	-	0.8
fo	1.6	3.3	6.9	-	-	-	-	-	-
fa	0.86	1.5	4.8	-	-	-	-	-	-
en	11.4	10.4	1.7	8.4	8.5	7.9	5.2	8.1	8.4
fs	5.25	3.3	1.1	1.6	6.1	3.9	3.3	2.1	3.2
cs	-	-	-	-	-	-	1.0	0.4	-
Q	-	-	-	0.9	14.2	35.2	31.7	21.8	4.0

1 – olivine gabbro; 2 – hypersthene gabbro-norite; 3 – melanocratic gabbro; 4 – gabbro-diorite; 5 – diorite; 6 – quartz diorite; 7 – banatite; 8 – granodiorite; 9 – monzonite

Table 2

Chemical composition and crystallochemical formulas of the gabbroids and diorites of the Gadabay-Soyudlu intrusion

Rock	Olivine-bearing gabbro-norite (Almali-tala)		Hypersthene-bearing gabbro (Arikhdam)		Quartz diorite (Soyudlu)	
mineral / Components	opx	cpx	opx	cpx	opx	cpx
SiO_2	53.75	50.86	54.25	50.21	50.38	50.60
TiO_2	0.10	0.48	0.12	0.46	0.11	0.16
Al_2O_3	2.15	2.32	1.85	1.82	2.60	1.38
Cr_2O_3	0.46	0.26	0.47	0.18	-	-
Fe_2O_3	3.26	2.97	2.12	5.05	1.88	1.66
FeO	9.11	7.03	10.04	6.28	23.91	14.71
MnO	0.23	0.21	0.22	0.24	0.16	0.19
MgO	30.46	14.46	30.10	14.76	20.18	12.31
CaO	0.38	20.68	0.25	20.45	0.18	18.50
Na_2O	0.04	0.36	0.03	0.40	0.04	0.05
∑	99.94	99.63	99.45	99.85	99.44	99.56
Si	1.905	1.904	1.931	1.883	1.913	1.941
Al	0.090	0.103	0.003	0.080	0.116	0.062
Ti	0.003	0.013	0.077	0.013	0.003	0.005
Cr	0.013	0.008	0.013	0.005	-	-
Fe^{+3}	0.087	0.084	0.057	0.142	0.053	0.048
Fe^{+2}	0.270	0.260	0.299	0.197	0.759	0.472
Mn	0.007	0.007	0.007	0.007	0.005	0.006
Mg	1.608	0.806	1.596	0.824	1.141	0.703
Ca	0.014	0.829	0.010	0.821	0.007	0.760
Na	0.003	0.026	0.002	0.029	0.003	0.004
∑	4.00	4.00	3.995	4.001	4.000	4.001
Ca	0.7	44.5	0.5	44.6	0.4	39.3
Mg	85.0	43.5	83.8	44.7	59.8	36.3
Fe	14.3	13.0	15.7	10.7	39.8	24.4
t°C	800		780		850	

As we have already mentioned, quartz-diorites are the most widely distributed petrographic rock type of the Gadabay-Soyudlu intrusion. These are macroscopically spotted grey, coarse grained, holocrystalline rocks. Rare dark black amphibole grains with metallic luster, as well as pyroxene and goldish yellow biotite grains are distinguishable in macroscopic background color. Under microscope diorites are hypidiomorphic, holocrystalline rocks. The major mineral of the rock is plagioclase. It predominates in the rock, in most cases forms idiomorphic polysynthetic twinning grains. In composition it corresponds to andesine (An_{38-48}). In quartz-diorites the anorthite molecule is reduced to 32-36%. In the center of zonal grains, chloritization, pellitization, and sometimes epidotization of varying intensity are observed. In normal diorites quartz grains present in limited amount among plagioclase grains.

As can be seen, from the normal diorites toward their quartz-bearing analogues the amount of colored minerals decreases. These minerals are ortho- and clinopyroxenes, amphiboles, biotite, while the secondary minerals are epidote, uralite, chlorite, calcite, prehnite. The first-generation iron-titan oxide minerals form mutual intergrowths with ortho- and clinopyroxenes. Their secondary analogues are found in the uralite and amphibole grains in the dot like, sometimes brownish tiny leaf-like forms. The gradual increase of quartz grains in normal diorites changes them to quartz-diorite varieties. Besides, quartz grains become larger and their undulose extinction is clearly observed. Along with clinopyroxene, a greenish-blue hair-like uralite is formed in most cases. These pyroxenes are distinguished by their pale green color and characteristic pleochroism. They correspond to iron augite ($Wo_{39-40}En_{35-38}Fs_{60-66}$) by their optical features and chemical composition. Orthopyroxene occurs as solitary grains and is a hypersthene in composition (CNg=0, Ng=1.730, Np=1.714). Both in west, north-western and south-eastern contacts and near contact zones of the Gadabay-Soyudlu intrusion quartz-diorites gradually change to granodiorites, tonalities, banatites. However, with the decrease of colored minerals, the amount of plagioclase also decreases. Consequently, beginning from the quartz-diorites toward the granodiorites the amount of quartz increases.

After the quartz-diorites and hornblende-biotite diorites the second most spread rock variety of the Gadabay-Soyudlu intrusion is considered to be granodiorites. These rocks have a pinkish hue on a gray background and are mostly medium- and coarse-grained. They mainly occur in the south-eastern and north-western parts of the intrusion.

Plain-like prismatic, rarely irregular plagioclase grains predominate within the rock. In composition they correspond to acidic andesine (An_{31-40}) and are exposed to alteration processes not too much. Pellitization and sericitization are occasionally observed in the central part of zonal crystals. As noted earlier, the second most common mineral in the rocks is quartz. It occurs among the plagioclase grains as xenomorphic ones. Along with this, they form intergrowths with alkaline feldspars. According to the results of optical studies (2V=65-70, CNp=3-5, d_{hkl}=4.18-4.2) and XRD analyses, the transition phase is a weakly homogeneous orthoclase. Here the concentration of perthite varies from 15 to 22%.

As mentioned before, of the colored minerals ferro-hypersthene, ferro-augite, hornblende, and sometimes pargasite and biotite present in limited amounts. Secondary (uralite, hematite, limonite, magnetite, sericite, clinochlore, epidote) and accessory (apatite, garnet, titan magnetite, sphene etc.) minerals occur in insignificant amounts.

It should be noted that the amount of biotite and hornblende sometimes increases in granodiorites causing the formation of biotite and hornblende varieties of these rocks. And sometimes granodiorites change into tonalite and banatite. In this context the amount of quartz decreases in their composition comparing with granodiorites. Besides, in tonolite the alkaline feldspar doesn't occur at all or occurs as isolated grains. In banatites orthoclase occurs along with quartz. These rocks also have hornblende and biotite varieties of granodiorites. Granites and their hornblende and biotite varieties are considered to be the last or final petrographic type of rocks of the Gadabay-Soyudlu intrusion. They are mainly spread in north-western and south-western contacts of the intrusion. It should be noted that in the Soyudlu village within the gabbroids there are outcrops of granoaplite as a form of stockwork and ring. Besides, quartz-monzodiorite was found in the exploration well near the Soyugbulag village in the north-eastern flank of the Gadabay-Soyudlu intrusion. In addition, the same rock was found by AIMC Company while they drilled exploration well in the north-western flank of the intrusion.

Monzonites and their quartz-bearing analogues are macroscopically coarse-grained rocks of pale pinkish-gray color. Under the microscope it has a characteristic monzonite structure. It is a holocrystalline rock. Minerals are presented as plagioclase within labradorite, transitional orthoclase, quartz, hornblende, biotite, moderately titanium magnetite. And the accessory minerals are apatite, zirconium, whereas the secondary minerals are chlorite, epidote and limonite. Plagioclase predominates among the aforementioned minerals and has prismatic, idiomorphic, polysynthetic twinnings. They sometimes are sericitized and sometimes epidotized. Orthoclase is xenomorphic comparing with plagioclase and occurs as irregular dusky grey grains. Of colored minerals, elongated prismatic pargasite with its strong pleochroism is present. A limited number of diopside occurs as pyroxenes. There are more biotite sheets compared with other colored minerals. Magnetite occurs in pargasite and diopside as inclusions in the long vein like grains form. Monzonites make transitions sometimes to diorites and sometimes to syenites.

The vein rocks of the second phase of Gadabay-Soyudlu intrusion are spread especially in the north-western part of the intrusion and consist of aplites, plagiogranites, quartz-albite rhyolites, etc.

Quartz-diorites, in other words rocks of the second phase are also normal alkaline rocks except monzodiorite, and they belong to sodium series rocks, which are mainly controlled by fractional crystallization. Besides, except monzodiorites they are silica saturated and are characterized by predominance of Na_2O over K_2O (Table 1, an. 5, 6, 7, 8). Along with this, neither modal nor normative olivine is represented, but limited amounts of corundum are present in tonalite and granodiorite due to decreased silica content (Table 1, an. 7, 8). In monzonites the amount of normative orthoclase molecule increases up to 28.4%.

Since biotite and orthoclase spread in quartz diorites is limited, they were accumulated in the residual melt. Such and other geochemical and physical-chemical constraints caused the accumulation of potassium and related elements, such as Rb, Ba, and partially Sr, in the residual melt, i.e., monzodiorite, monzonite, and led to the crystallization of orthoclase and biotite.

Another evolutionary path of the quartz-diorites led to formation of granodiorites and granites. All of these varieties, in turn, formed corresponding derivatives, which determined the petrogenetic variations of vein rocks of different facies.

The crystallization temperature of some quartz-diorite phase derivatives was calculated by existing geothermometers based on the magnetite-ilmenite equilibrium (Lindlsey, 1983; Kawai, 1956; Lindsley, Spencer, 1982).

Moderately titanium magnetite and ilmenite are present in quartz-diorite phase rocks in tiny amount.

Moderately titanium magnetite occurs as inclusions in colored minerals such as clinopyroxene, pargasite and sometimes biotite. Sometimes it forms intergrowths with clinopyroxene, and ilmenite forms very fine sheet-like grains between the colored and felsic minerals. It can be observed in magnetite in the form of a needle-like net.

As we have already mentioned, the magnetite-ilmenite equilibrium (Lindsley and Spencer, 1982) was used to calculate the crystallization temperature and oxygen partial pressure for the quartz-diorite phase derivative rocks. The results of their chemical analyses and crystallochemical formulas are given in Table 3. As can be seen from the table, most of the derivative phases crystallized at close temperatures (t=700-770ºC) and partial pressures of oxygen (lgf_{O_2}=-13.2-15.0). So, the upper crystallization temperature limit is being observed for quartz-monzonites (t=770ºC).

Interpreting the data presented, we can conclude that the second quartz diorite phase was also formed in the upper crust as the gabbroid phase, but crustal assimilation acted together with fractionation, resulting in amphibolization, micalization, and uralization.

The impact of the Gadabay-Soyudlu intrusion on the contact and host rocks resulted in the formation of several ore-forming and host metasomatites. However, prior to this impact within the intrusion itself, the pyroxenes were mostly replaced by amphibole, epidote, magnetite, hematite, calcite, and chlorite. Lower Jurassic volcanic rocks underwent intense limonitization and secondary silicification on the northwestern flank of the intrusion, especially in the Bitdibulak area.

Based on the obtained petrological differences of the intrusion phases, it was found that at the end of the first stage of crystallization of the gabbroic melt, the presence of hydrogen sulfide caused mineralization of such elements as Co, Ni, Cr. (Table 4, an. 9-12), while the hydrothermal solutions of the quartz diorite phase had a more oxidizing environment. Consequently, they caused crystallization of hematite and maghemite. They also oxidized pyrite crystals. The formation of ore minerals such as chalcopyrite, sphalerite, galena, and pyrrhotite is also associated with the tonalite and monzonite subphases of quartz diorites.

Table 3

Chemical compsoition and crystallochemical formulas of the representative samples of the Gadabay-Soyudlu intrusion

rock / analysis	Gabbro-diorite		Quartz-diorite		Granodiorite		Quartz-bearing monzonite	
	5		6		8		9	
mineral / Components	Mt	Ilm	Mt	Ilm	Mt	Ilm	Mt	Ilm
SiO_2	0.09	0.11	0.14	0.07	0.08	0.06	0.07	0.09
TiO_2	2.10	48.60	2.38	48.84	5.20	49.25	6.38	49.26
Al_2O_3	2.35	0.12	1.23	0.18	0.58	0.26	0.78	0.34
Fe_2O_3	62.45	6.91	63.15	6.94	58.63	5.55	55.52	5.86
FeO	31.20	43.09	31.47	42.96	33.84	43.62	36.44	43.31
MnO	0.38	0.21	0.26	0.34	0.29	0.28	0.18	0.41
MgO	1.16	0.28	1.21	0.39	1.18	0.31	0.25	0.39
NiO	0.08	0.10	0.09	0.11	0.08	0.06	0.09	0.04
∑	99.81	99.42	99.93	99.83	99.88	99.39	99.71	99.70
Si	0.003	0.003	0.005	0.002	0.003	0.001	0.003	0.002
Ti	0.060	0.929	0.068	0.929	0.148	0.942	0.183	0.937
Al	0.104	0.004	0.055	0.005	0.026	0.005	0.035	0.010
Fe^{+3}	1.770	0.132	1.799	0.132	1.672	0.106	1.594	0.111
Fe^{+2}	0.983	0.916	0.996	0.908	1.072	0.927	11.63	0.916
Mn	0.012	0.004	0.005	0.007	0.009	0.006	0.006	0.009
Mg	0.065	0.010	0.068	0.015	0.067	0.012	0.014	0.015
Ni	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	0.001	0.003	0.001
Mt	93.4	-	92.5	-	84.7	-	81.1	-
Usp	6.6	-	7.5	-	15.3	-	18.9	-
Ilm	-	87.0	-	87.0	-	89	-	88.3
Hem	-	13.0	-	13.0	-	11	-	11.7
tºC	700		700		750		770	
fo_2	10^{-15}		10^{-15}		$10^{-13.4}$		$10^{-13.2}$	

Table 4

The results of mineralogical analyses of the Gadabay-Soyudlu ore deposit and manifestations

rock	pyrite		chalcopyrite		sphalerite		galena	argento chalcopyrite	cobaltite
analysis / Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fe	47.12	46.73	30.46	29.75	7.80	7.40	-	28.74	2.80
Cu	0.21	0.18	34.23	34.45	-	-	-	32.86	-
Zn	-	-	-	-	58.43	58.56	0.25	-	-
Pb	-	-	-	-	-	-	85.86	-	-
Mn	-	-	-	-	0.07	0.08	-	-	-
Ni	0.20	0.03	0.011	0.02	-	-	-	-	0.16
Co	0.26	0.64	0.012	0.04	-	-	-	-	32.36
Ag	-	-	0.06	0.10	-	-	-	3.80	-
Cd	-	-	-	-	0.20	0.28		-	-
As	-	-	0.10	0.18	-	-	-	-	45.24
Se	-	-	0.04	0.16	-	-	-	-	-
S	52.14	52.36	34.48	34.78	32.90	33.25	13.46	34.15	18.92
∑	99.93	99.94	99.39	99.48	99.40	99.52	99.66	99.55	99.70

rock	Cobaltite	millerite	
analysis / Components	10	11	12
Co	32.44	3.16	2.72
Fe	2.74	2.42	2.51
Ni	0.18	58.60	58.64
Cu	0.24	0.46	0.36
As	45.12	35.20(S)	35.25(S)
∑	99.92	99.84	99.51

Galena, sphalerite and sometimes chalcopyrite were found in barite-polymetallic veins drilled by an exploration well in the northwestern part of the Gadabay-Soyudlu intrusion.

Gold and silver in various concentrations were found in these different zones of mineralization.

Summarizing, the interpretation of conducted complex petrological, geodynamical studies and as well as a study of gold-polymetallic, gold-sulfide, copper-sulfide mineralization show that cobalt and nickel mineralization are related to the hydrothermal stage of the gabbroid phase, while gold-bearing copper-iron-sulfide mineralization is thought to be controlled by numerous hydrothermal metasomatites of the quartz-diorite phase derivatives. Derivatives of the Bajocian plagiogranite intrusion of varying intensity have undergone metasomatism. Here, kaolinization, sericitization, and secondary silicification changes are mainly observed. And in the north-eastern part of the Gadabay-Soyudlu intrusion the Callovian-Oxfordian volcanic-sedimentary rocks and limestones are scarnized. In the north-western flank of the intrusion the Bathonian dusky sedimentary rocks are intensively kaolinized, sericitized, limonitized, etc. In all contact and alteration zones quartz-diorites occur. However, in the north-western part of the intrusion in quite deep horizons derivatives such as quartz-monzonite, monzonite occur. Here, gold-bearing chalcopyrite, sphalerite and galena mineralisation has been identified in barite veins of varying orientation. Thus, in some words, we can say that, gold-bearing copper-pyrite mineralization is associated with quartz-diorite phase derivatives, whereas gold-bearing polymetallic mineralization is associated with quartz-monzonite.

Discussion

The Gadabay-Soyudlu intrusion of the Upper Jurassic – lower Cretaceous age is located in the conjunction of the Shamkir horst anticlinorium and Dashkasan synclinorium. The Lock-Garabagh-Pond Zone was formed as a result of north-directed subduction of the Mesothetics Ocean in the Early Jurassic. However, during the Permian – Early Jurassic period of the geological evolution of the zone, the intensive upheaval environment dominated. The Early Jurassic basal conglomerates overlie intensely metamorphosed basement rocks. Therefore the Early Jurassic basal conglomerates with a thickness of 250 m transgressively lay upon the intensively metamorphosed basement rocks. Quite thick (200 m) metamorphic schists of the Lias can be traced at short intervals. Volcanic

rocks of the Lower Bajocian stage also most times demonstrate inconsistences. The contact rocks of the studied Gadabay-Soyudlu intrusion consist of the Bathonian, Callovian, Oxfordian rocks. Two phases are distinguished in the intrusion, where the rocks of the first gabbroid phase such as norite, gabbro-norite, melanocratic gabbro by pyroxene thermometer have crystallized in the intrusive chamber at temperatures 800-870°C. As quartz-diorites are the most common rocks and the first derivative of the second phase, they are accepted as the main type of the second phase rocks. According to moderately titanium magnetite-ilmenite thermometer, derivatives of the second phase crystallized at 700-770°C and partial pressure of $10^{-13.2}$ – $10^{-15.0}$. Monzodiorites of this phase have crystallized at 870°C.

Petrochemical studies have established that the norites, gabbro-norites and melanocratic gabbroids are olivine normative, while the leucocratic gabbroids are already hypersthene and quartz normative. This fact and the modal mineralogical constitution demonstrate that, the first phase of the intrusion was formed under the control of fractional crystallization.

The fractional crystallization of the second phase has played the principal role in the evolution of the intrusion. From quartz-diorite melts the evolution followed two paths. In the first case normal alkali diorites gradually evolved to quartz-diorite–banatite–tonalite–granodiorite–granite. In the second case quartz-diorites evolved into quartz-monzonite-monzonite and no less into syenite.

Hydrothermal liquids of gabbroid phase caused millerite and cobaltite mineralization, while liquids of quartz-diorite derivatives are associated with the gold-bearing copper and iron pyrite, as well as with the gold-polymetallic mineralizations.

Results

As a result of complex geological and geochronological studies, it was proved that the Gadabay-Soyudlu intrusion is of the Upper Jurassic – Early Cretaceous age (138-159 Ma). The intrusion was formed within the mature volcanic arc with its volcanic complexes.

The intrusion was formed in two phases, as confirmed by its geological, petrographic, petrochemical and mineralogical characteristics. Each phase has vein rocks beside the intrusive bodies. Rock members of the gabrroid phase were formed under the control of crystallization-differentiation in magmatic chambers located in the upper part of the Earth's crust under relatively high thermobaric conditions. Increase of fugacities in the second or quartz-diorite phase, as well as assimilation of wall rocks and increase of incoherent elements concentration led to molybdenum mineralization in limited local areas bordering the gold-pyrite mineralization areas.

The petrological diversity of the phases is confirmed by the structural-optical types of feldspars.

This research paper presented important results on the thermobaric conditions and crystallisation sequence of the rocks of the Gadabay-Soyudlu intrusion phases. At the same time, the influence of fugacities, including oxygen fugacities, controlling the thermal conditions of crystallisation has been studied.

One of the most important approaches in the paper is that it interprets the processes producing ore mineralisation of both phases.

REFERENCES

Abdullaev R.N. et al. Age division of the magmatic formations in the north-eastern part of the Lesser Caucasus according to the K-Ar method. Elm. Baku, 1979, 146 p. (in Russian).

Abdullaev R.N. Mesozoic volcanism of the north-eastern part of the Lesser Caucasus. Publishing house of the Academy of Sciences of Azerbaijan SSR. Baku, 1963, 228 p. (in Russian).

Adamia Sh.A., Zakariadze G.S., Lordkipanidze M.B. The evolution of the ancient continental margin on the example of the Alpine history of the Caucasus. Geotectonics, No. 4, 1977, pp. 88-103 (in Russian).

Kawai N. Exsolution of titanomagnetites and its effect on rock-magnetism. Proceedings of the Jap. Acad., Vol. 32, No. 7, 1956, pp. 464-468.

Kerimov G.I. Petrology and ore mineralization of the Gadabay ore cluster. Publishing house of the Academy of Sciences of Azerbaijan SSR. Baku, 1963, 178 p. (in Russian).

Lindsley D.H. Pyroxene thermometry. American Mineralogist, Vol. 68, 1983, pp. 477-493.

Lindsley D. H., Spencer K.J. Fe–Ti oxide geothermometry: Reducing analyses of coexisting Ti-magnetite (Mt) and ilmenite (Ilm). EOS Transactions, American Geophysical Union, Vol. 63, No.18, 1982, 471 p.

ЛИТЕРАТУРА

Kawai N. Exsolution of titanomagnetites and its effect on rock-magnetism. Proceedings of the Jap.Acad., Vol. 32, No. 7, 1956, pp. 464-468.

Lindsley D.H. Pyroxene thermometry. American Mineralogist, Vol. 68, 1983, pp. 477-493.

Lindsley D.H., Spencer K.J. Fe–Ti oxide geothermometry: Reducing analyses of coexisting Ti-magnetite (Mt) and ilmenite (Ilm). EOS Transactions, American Geophysical Union, Vol. 63, No.18, 1982, 471 p.

Абдуллаев Р.Н. и др. Возрастное расчленение магматических образований северо-восточной части Малого Кавказа по данным K-Ar метода. Элм. Баку, 1979, 146 с.

Абдуллаев Р.Н. Мезозойский вулканизм северо-восточной части Малого Кавказа. Изд-во АН Азерб.ССР. Баку, 1963, 228 р.

Адамия Ш.А., Закариадзе Г.С., Лордкипанидзе М.Б. Эволюция древней континентальной окраины на примере альпийской истории Кавказа. Геотектоника, No. 4, 1977, с. 88-103.

Керимов Г.И. Петрология и рудоносность Кедабекского рудного узла. Изд. АН Азерб. СССР. Баку, 1963, 178 с.

Мустафаев Г.В. Мезозойские гранитоиды Азербайджана и особенности их металлогении. Элм. Баку, 1977, 234 с.

Mustafaev G.V. Mesozoic granitoids of Azerbaijan and the features of their metallogeny. Elm. Baku, 1977, 234 p. (in Russian).

Panov D.I. Stages of geological development of the Caucasus-Iranian segment of the Mediterranean belt in the Mesozoic and Cenozoic period. Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Department of geology, Publishing house of the Moscow University. Moscow, Vol. 88, No. 4, 2013, pp. 74-86 (in Russian).

Ramazanov V.G. Porphyry copper deposits of Azerbaijan. Abstract of Doctor of Geology and Mathematics dissertation, Tbilisi, 1993, 50 p. (in Russian).

Rustamov M.I. Geodynamics and magmatism of the Caspian-Caucasian segment of the Mediterranean belt in the Phanerozoic. Nafta-Press. Baku, 2019, 540 pp. (in Russian).

Sadygov E.A. Mesozoic plutonic complexes of the Lok-Garabagh zone of the Lesser Caucasus: geochemical characteristics, age and magmatic sources. Abstract of PhD dissertation, St. Petersburg, 2019, 22 p. (in Russian).

Панов Д.И. Этапы геологического развития Кавказ-Иранского сегмента Средиземноморского пояса в мезозое и кайнозое. Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический, Изд-во Моск. ун-та. Москва, Т. 88, No. 4, 2013, с. 74-86.

Рамазанов В.Г. Медно-порфировые месторождения Азербайджана. Автореф. на соиск. ученой степени д.г.-м.н., Тбилиси, 1993, 50 с.

Рустамов М.И. Геодинамика и магматизм Каспийско-Кавказского сегмента Средиземноморского пояса в фанерозое. Nafta-Press. Баку, 2019, 540 с.

Садыгов Э.А. Мезозойские плутонические комплексы Лок-Гарабагской зоны Малого Кавказа: геохимическая характеристика, возраст и магматические источники. Автореф. на соиск. ученой степени к.г.-м.н., Санкт-Петербург, 2019, 22 с.

ПЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЗДНЕЮРСКО-РАННЕМЕЛОВЫХ ИНТРУЗИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЛОК-ГАРАБАГСКОЙ ЗОНЫ

Мамедов М.Н.[1], Бабаева Г.Дж.[1], Велиев А.А.[2],
Аббасов К.Ф.[1], Сарыев Ф.Г.[1], Байрамов А.А.[2]
[1]Институт геологии и геофизики НАНА
AZ1143, г. Баку, просп. Г.Джавида, 119: musamamedov@rambler.ru
[2]Международная горнодобывающая компания Азербайджана, Баку, Азербайджан
AZ1065, Баку, Азербайджан, ул. Измира, 1033, Hayat Tower 2

Резюме. В статье на основе петрологических особенностей анализируются геологические и физико-химические условия формирования Гядабей-Соютлинского интрузива. Установлено, что позднеюрско-раннемеловые эффузивные комагматиты данного интрузива широко распространены в северо-восточной и западной частях Шамкирского антиклинория. Ранняя габброидная фаза интрузива кристаллизовалась при относительно более высокой температуре. Гидротермальные растворы в Гадирском рудопроявлении способствовали кристаллизации кобальтина и миллерита. В отличие от ранней фазы, расплав второй кварц-диоритовой фазы эволюцинировал свой состав в двух направлениях. В ранней стадии формировалась кварц-диорит–тоналит–бонатит–гранодиорит–гранитовая, а позже кварц-диорит–кварц-монцодиорит–кварц-монцосиенитовая ветви кварц-диоритовой магмы. С гидротермальными растворами этих ветвей связаны золотоносные, медные, железные колчеданные месторождения и проявления Гядабейского района. Однако установленное золотоносное барит-полиметаллическое орудение, выявленное на северо-западной окраине Гядабейского месторождения пространственно тяготеет к монцонитовой ветви кварц-диоритовой фазы. Температура и парциальное давление кристаллизации пород рассчитывались с помощью двух, пироксенового и магнетит-ильменитового, термометров. Исходя из умеренного титано-магнетит-ильменитового равновесия, присутствующего в этих породах, температуры кристаллизации дифференциатов отдельных фаз Гядабей-Соютлинского интрузива варьируются от 800 до 870°C. Парциальное давление кислорода, контролирующего процесс кристаллизации, колеблется в пределах 10^{-13}-10^{-15}, что соответствует магнетит-гематитовому буферу. Исходная известково-щелочная базальтовая магма интрузива, будучи вовлеченной в процесс кристаллизации в очагах в зависимости от активности магматических разломов в различных частях земной коры, послужила основой для формирования фаз интрузива. Остаточная часть или гидротермальные растворы каждой фазы путем термического воздействия на контактные породы интрузивных и ранее кристаллизованных комплексов горных пород способствовали образованию рудовмещающих (золото, серебро, медь, цинк, свинец, никель и др.) метасоматитов. На основе комплексных геолого-геодинамических и петрологических исследований установлено, что Гядабей-Соютлинский многофазовый интрузив формировался в зрелых палеоостроводужных условиях.

Ключевые слова: *Гядабей-Соютлинский интрузив, температура и парциальное давление кристаллизации, габброидная фаза, кварц-диоритовая фаза*

LÖK-QARABAĞ ZONASININ MƏRKƏZİ HİSSƏSİNİN GEC YURA VƏ ERKƏN TƏBAŞİR YAŞLI İNTRUZİV KOMPLEKSLƏRİNİN FORMALAŞMASININ PETROLOJİ XÜSUSUYYƏTLƏRİ

Məmmədov M.N.[1], Babayeva G.C.[1], Vəliyev A.A.[2],
Abbasov K.F.[1], Sarıyev F.H.[1], Bayramov A.Ə.[2]
[1]AMEA Geologiya və Geofizika İnstitutu
AZ1143, Bakı, H.Cavid prosp., 119: musamamedov@rambler.ru
[2]AZ1065, Bakı şəh., İzmir küç., 1033, Hayat Tower 2

Xülasə. Məqalədə petroloji xüsusiyyətlər əsasında Gədəbəy-Söyudlü intruzivinin formalaşmasının geoloji və fiziki-kimyəvi şəraiti araşdırılır. Müəyyən olunmuşdur ki, Gec Yura-Erkən Təbaşir yaşlı bu intruzivin effuziv komaqmatitləri Şəmkir horst antiklinoriumunun şimal-şərq və qərb hissəsində yayılmışdır. İntruzivin fəaliyyətinin erkən fazası nisbətən yüksək temperaturda kristallaşmışdır. Bu fazanın hidrotermal məhlulları Qədir təzəhüründə kobaltin-millerit filizləşməsinin əmələ gəlməsinə və yerləşməsinə zəmin

yaratmışdır. İkinci, kvarslı diorit fazasının diferensiatları isə iki istiqamətdə təkamül etmişdir: öncə diorit–kvars-diorit–tonalit–banatit–qranodiorit–qranit diferensiatları formalaşmışdır. Bunların hidrotermal məhlulları ilə qızıllı dəmir kolçedanı və mis kolçedanı filizləşməsinin əlaqədar olması göstərilir. İkinci halda kvarslı diorit-kvarslı monsodiorit-siyenit diferensiatları qızıllı polimetal filizləşməsi ilə əlaqədardır. Sonuncu Gədəbəy-Söyüdlü intruzivinin şimal-qərb cinahında aşkar olunmuşdur. Tədqiq olunan diferensiatların kristallaşma temperaturları və oksigenin parsial təzyiqləri iki–piroksen və maqnetit-ilmenit termometrlərindən istifadə etməklə hesablanmışdır. Bu süxurların tərkiblərində iştirak edən mötədil titanlı maqnetit-ilmenit tarazlıqları əsasında Gədəbəy-Söyüdlü çoxfazalı intruzivinin ayrı-ayrı fazalarının diferensiatlarının kristallaşma temperaturları 800-870ºC arasında dəyişir. Kristallaşma prosesinə nəzarət edən oksigenin parsial təzyiqi isə maqnetit-hematit buferinə uyğun gəlməklə 10^{-13}-10^{-15} arasında dəyişir. İntruzivin ilkin əhəngli-qələvi bazalt maqması yer qabığının müxtəlif hüdudlarında maqmadaşıyan qırılmaların aktivliyindən asılı olaraq kameralarda kristallaşma prosesinə cəlb olunmaqla intruzivin fazalarının əmələ gəlməsinə zəmin yaratmışdır. Hər fazanın qalıq hissəsi, yaxud hidrotermal məhlulları intruzivin təmas süxurlarına və onlardan əvvəl kristallaşmış süxur komplekslərinə termiki təsir edərək filizyerləşdirən metasomatitləri əmələ gətirmişdir. Kompleks geoloji-geodinamik və petroloji tədqiqatlar əsasında müəyyən olunmuşdur ki, Gədəbəy-Söyüdlü çoxfazalı intruzivi yetgin adalar qövsü şəraitində formalaşmışdır.

Açar sözlər: *Gədəbəy-Söyüdlü intruzivi, diferensiatların kristallaşma temperaturları və oksigenin parsial təzyiqləri, qabroid fazası, kvars-diorit fazası*

ANAS Transactions Earth Sciences 2 / 2021

http://www.journalesgia.com

VLF-METHOD OF GEOPHYSICAL PROSPECTING: A NON-CONVENTIONAL SYSTEM OF PROCESSING AND INTERPRETATION (IMPLEMENTATION IN THE CAUCASIAN ORE DEPOSITS)

Eppelbaum L.V.[1,2]

[1]*Department of Earth Sciences, Faculty of Exact Sciences, Tel Aviv University*
Ramat Aviv 6997801, Tel Aviv, Israel
[2]*Azerbaijan State Oil and Industry University*
20 Azadlig Ave., Baku, AZ1010, Azerbaijan

Keywords: *VLF-transmitters, temporal variations, rugged relief influence, advanced quantitative analysis, ore deposits, geological-geophysical mapping, earthquake precursors*

Summary. Investigation of the electromagnetic (EM) fields from distant VLF (very low friquency) military transmitters is one of the fastest and low-expensive geophysical methods. At present, it finds frequent application in prospecting for various deposits, search of subsurface underground water, archaeogeophysical studies and various types of geological mapping. For geophysical investigation can be utilized a few dozens of the VLF transmitters disposed in various countries. The different frequencies and angles of registered EM radiation enable to obtain additional preferences by interpretation. A depth of investigation depends on the radiowave frequency and averaged resistivity of the host medium and usually ranges from several tens to several hundred meters (last values – under very favorable conditions). Both the electric and magnetic components of EM field are used in investigation by the VLF method. Generally only the magnetic field (*H*) is employed. A wide using of the VLF-technique was limited by absence of reliable methods for elimination of the EM field time variations, rugged relief influence and procedures for quantitative interpretation of the VLF-anomalies. These problems are successfully solved and the unified methodological system is developed. For elimination of the temporal variations a special procedure based on the direct continuous filtering is proposed. The correlation technique enables to significantly reduce the rugged relief influence. For quantitative interpretation is proved a possibility to use the modern interpreting methods elaborated in magnetic prospecting for complex geological-geophysical conditions. Finally, for revealing hidden objects against the high-intensive geological noise background, an application of non-conventional statistical, informational and wavelet algorithms is suggested. The main components of the developed system were successfully tested in the Caucasian polymetallic and copper deposits.

© 2021 Earth Science Division, Azerbaijan National Academy of Sciences. All rights reserved.

1. Introduction

Investigation of the electromagnetic (EM) fields from distant Very Low Frequency (VLF) military transmitters is one of the most mobile and economical geophysical methods. At present, it finds frequent application in prospecting for the searching and localization of ore deposits, for revealing archaeological targets, in environmental geophysics (identification of rock-slide, faults and underground cavities), in military geophysics, and for some other purposes. The VLF-radiations are propagated in a spherical waveguide formed by the Earth and ionosphere where the studied frequencies (10-30 kHz) are not attenuated even at great distances from transmitter due to the channel effect (Wait, 1962). Freely and readily available primary VLF field signals anywhere around the Earth make the VLF method prompt and efficient instrument for geophysical field investigations. Location of some typical VLF-transmitters and their parameters are presented in Table 1.

The VLF wavefront is thus assumed to be plane while the primary field intensity is taken to be constant within the area of the geophysical investigations. Moreover, the VLF field variations caused by the variations of imperfectly conductive channel walls are relatively small.

Both the electrical and the magnetic components of a VLF EM field are used in geophysical investigations by the VLF method, but mainly the magnetic field (*H*) is employed. The geophysical studies in the USSR, Russia, Czech Republic and many other countries have been performed with the VLF equipment constructed on the heterodyne detection principle.

Table 1

Location, abbreviation and some characteristics of several military VLF-transmitters

Location (abbreviation)	Frequency, kHz	Power, kW
Bordeaux, France (FUO)	15.1	500
Rugby, Great Britain (GBR)	16.0	750
Kaliningrad, Russia (UGK)	16.2	?
Negeland, Norway (JXZ)	16.4	350
Nizhnii Novgorod, Russia (ROR)	17.0	315
Grimelton, Sweden (SAQ)	17.2	200
Yosamai, Japan (NDT)	17.4	500
Murmansk, Russia (UPP)	18.1	500
Le Blank, France (HWU)	18.3	200
Oxford, Great Britain (GPS)	19.6	550
North West Cape, Australia (NWC)	19.8	1000
Annapolis, USA (USS)	21.4	400
Onagawa, Japan (JJI)	22.1	?
Northwest Cape, Australia (NWC)	22.3	1000
Burlage, Germany (DHO)	23.4	800
Laulualei, Hawaii, USA (NPM)	23.4	600
Cutler, Maine, USA (NAA)	24.0	1000
Seattle, Washington, USA (NLK)	24.8	125
La Moure, North Dakota, USA (NML)	25.2	250
Pearl Harbor, Hawaii, USA (NPM)	26.1	480
Aguada, Puerto Rico, (NAU)	28.5	100

The instrument is made as an amplitude meter with a radio loop and makes it possible to measure the following VLF field characteristics: *x*-, *y*- and *z*-axis components, H_x *Hy* and H_z, respectively: the total horizontal component $H_\phi = \sqrt{H_x^2 + H_y^2}$, semi-major and semi-minor axes of the polarization ellipse, H_a and H_b; deflection of the semi-minor axis of the polarization ellipse from the vertical; and the azimuth angle corresponding to the bearing. The angles are measured by the degrees, while the other parameters are expressed on the amplitude meter scale in microvolts since their true values are directly proportional to the voltage generated by the magnetic field across the loop terminals.

Because of the light measuring equipment, the VLF method can be employed even in almost inaccessible regions such as mountainous and foothill regions. However, rugged terrain relief can introduce distortions into the observations producing so-called topographic anomalies of great intensity, making it difficult to interpret the observed fields. Additional disturbances provide presence of numerous geological inhomogeneities with different electric properties (it is typical for the mountainous regions, e.g. Caucasian region).

Depth of investigation usually ranges from several tens of meters to a few hundred meters (this parameter depends on the employed radiowave frequency and averaged resistivity of the surrounding medium). For estimation of this parameter, the following simplified formula can be used (e.g., Zhdanov and Keller, 1994):

$$\delta \approx 503\left(\frac{\rho}{f}\right)^{1/2},$$

where δ is the skin depth value (in meters), ρ is the resistivity of the medium (in Ohm·m), and *f* is the frequency of the VLF radio-wave (in Hz) (see Table 1).

The skin depth is the depth at which EM fields are attenuated to 1/*e* of its surface amplitude (*e* = 2.718) during the propagation through isotropic layer. For instance, in the permafrost regions (where ρ ~10,000 Ohm·m) the depth of investigation can reach several hundred meters.

Many investigators have been applied the VLF method for searching and localization of ore deposits (e.g., Гинзбург и др., 1981; Гордеев и др., 1981; Гинзбург, 1982; Bayrak, 2002; Basokur and Candansayar, 2003; Liu et al., 2006; Sandrin and Elming, 2006; Mohanty et al., 2011; Eppelbaum and Khesin, 2012; Sharma et al., 2014; Shendi et al., 2017), different types of geological-geophysical mapping (e.g. Fischer et al., 1983; McNeill and Lab-

son, 1991; Guerin and Benderitter, 1995; Xu, 2001; Pedersen and Oskooi, 2004; Bosch and Müller, 2005; Drahor and Berge, 2006; Santos et al., 2006; Zlotnicki et al., 2006; Al-Tarazi et al., 2008; Gürer et al., 2009; Hamdan et al., 2010; Sharma et al., 2014; Timur, 2014; Abtahi et al., 2016; Rajab, 2021) and discovering of archaeological artifacts (e.g., Ogilvi et al., 1991; Darnet et al., 2004; Drahor, 2006; Khalil et al., 2010; Tawfik et al., 2011; Pazzi et al., 2016; Simon et al., 2019).

2. Elimination of temporal VLF variations

The problem of eliminating time variations in the VLF method is crucially important since the intensity of these variations is often compatible with the intensity of the averaged VLF signal during the time of field survey. The following approaches have been used to overcome this problem.

During the initial period of VLF method, an approximated technique was used, which was based on field intensity measurements at a control point (*CP*) before and after fieldwork (Тархов, 1961). The corresponding corrections were introduced by interpolation assuming that the field intensity change was linear one. However, practical application of this method led to considerable errors.

A modification of this method is described in (Инструкция по электроразведке, 1984). The difference when the time variations have probable linear character is assumed to be 1 hour. The VLF survey is rejected if the level of variation for 1 hour exceeds 20%. This method, however, suffers from following disadvantages. Experience in field explorations in various regions indicates that the intensity changes of the VLF fields under study (even over the course of one hour) often cannot be approximated by a straight line with a sufficient accuracy. In addition, the amount of variations during this period may exceed 20%. It is also worth noting that this method neglects the effect of variation noise intensities on useful anomalies. It is obvious, however, that time variations in VLF field intensity affect the radiowave energy passing from the air into the ground. The intensity of the secondary field tends to increase or decrease, respectively (especially in the presence of anomalous objects of increased or decreased conductivity), and the variations are non-uniform. When disregarded, this fact can distort the interpretation of the results.

One western company developed an automatic attachment to a VLF receiver. Variations are eliminated by obtaining a synchronous ratio of the vertical component H_z of the VLF magnetic field to the total horizontal component H_φ. However, it was found by experimental field exploration that the H_z/H_φ ratio may vary even for observations at the same point. Quantitative interpretation of the H_z/H_φ curve presents certain difficulties. Another approach, described by this company in a recent guide for using the VLF equipment, consists of the selection of the frequency and time interval that is the most stable temporally for the area under study. Villee et al. (1992) suggested a similar method. However, this approach would benefit from improvement.

The VLF wavefront is assumed to be a plane whereas the primary field intensity is taken to be constant within the area of the detailed geophysical investigation (25÷100 km^2). The large distance from the utilized VLF transmitters (2,000 to 10,000 km) accounts for the uniformity of the primary field (Wait, 1962; Barr et al., 2000) both at control point (*CP*) and in the investigated area.

The following additive model of a geophysical field is applicable in practice for investigation by the VLF method (Eppelbaum and Mishne, 2011):

$$F_j = \sum\nolimits_j S_j\left[n_j(x), x\right] + \sum n_j(x), \qquad (1)$$

where F_j is the field observed along profile, $\sum_j S_j\left[n_j(x), x\right]$ is the sum of effects from the anomaly-forming objects and geological inhomogeneities of the section (taking into account the dependence on the VLF field variations), $\sum n_j(x)$ represents the noise of field variations in time (time dependence is omitted in Eq. (1) for simplicity).

It is known that for the VLF field the conduction currents dominate the displacement currents (Заборовский, 1963; Гордеев и др., 1981), which is the major condition for quasi-stationarity (Альпин и др., 1985). The proportionality of the secondary EM fields (both magnetic and electric) to the primary fields has been confirmed in a number of publications (e.g., Дмитриев и др., 1977; Дмитриев, 1982). Hence given the physical effect of the subvertical radiowave propagation in the ground (Гордеев и др., 1981; Olsson, 1983) and taking into account Eq. (1), the following simplified model of the VLF observations (Figure 1) can be used in practice (Эппельбаум, Мишне, 1988):

$$\left\{\begin{array}{l} H_o(t) = H(t) + B_o H(t) \\ H_j(t) = H(t) + C_j(t) \end{array}\right\}, \qquad (2)$$

where $H_o(t)$ is the VLF observation at the control point (*CP*); $H_j(t)$ is the VLF observation on the profile, $H(t)$ is the VLF primary field intensity, B and C are certain coefficients reflecting EM properties of the medium; indices "*j*" and "o" mark the observation point on the profile and *CP*, respectively.

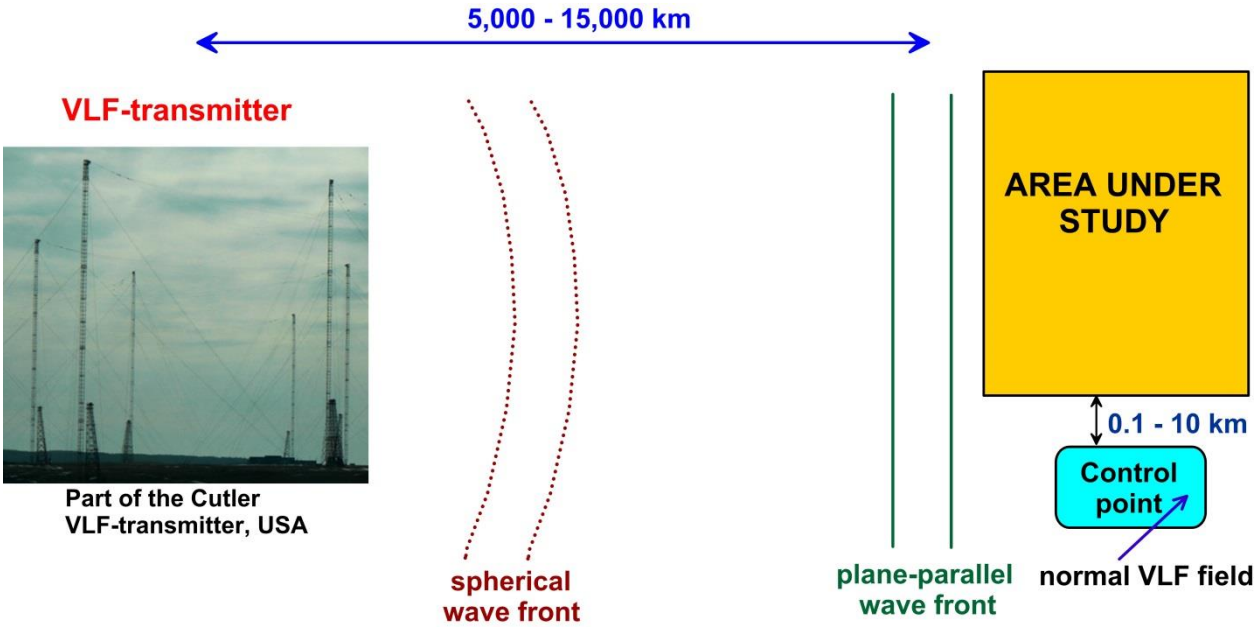


Fig. 1. Simplified scheme of temporal variations removal in the VLF method

Considering that B_o = const, this parameter which is a basic value for the studied area, can be assumed for convenience to be equal to zero. Solving Eqs. (2) in the parametric form, we obtain the values H_{clear} cleared from the temporal variations for each profile point:

$$H_{clear} = \frac{H_j(t)}{H_o(t)}\overline{H}, \qquad (3)$$

where $\overline{H}$ is a certain averaged value of the field.

Considering that B_o = const, this parameter which is a basic value for the studied area, can be assumed for convenience to be equal to zero. Solving Eqs. (2) in the parametric form, we obtain the values H_{clear} cleared from the temporal variations for each profile point:

$$H_{clear} = \frac{H_j(t)}{H_o(t)}\overline{H}, \qquad (3)$$

where $\overline{H}$ is a certain averaged value of the field.

Thus, the proposed scheme of eliminating variations in the VLF method is based on synchronous recording of the VLF observations along the profile and VLF temporal variations at *CP*. Automatic variation recordings can be carried out with a discretization interval of 0.5-1 seconds that allows accepting such procedure as continuous one. This method substantially eliminates observation distortions caused by field variations with time (both over the course of a day and at different days during a VLF-survey) by reducing observation results to the some common level (Eppelbaum and Mishne, 2011; Эппельбаум, Мишне, 1988).

It should be noted that later Bozzo et al. (1994) also noted the necessity of normalization of the field VLF measurements to the primary field observations.

3. Elimination of terrain relief influence

Many investigators have made attempts to reduce the terrain relief effect. An analytical approach was suggested by Tarkhov (1961); however, the analytical calculations proved to be too cumbersome even for a model of a uniform slope made up of homogeneous rocks and, above all, were at variance with the experimental results. Sedelnikov (1983) analyzed in detail the theoretical problem of VLF electric field distortions caused by a single mountain and a mountain range, but suggested no method for eliminating the topographic effects.

Karous's (1979) publication about the topographic influences on the vertical component of the VLF magnetic field (H_z) is evidently of interest, but no numerical results were reported. Eberle (1981) proposed simplified formulas to calculate the relief corrections for the observed EM fields; their application is, however, limited by a number of conditions, e.g., the requirement that the disturbing object and the observation profile should be in the most favorable position excitation by the primary VLF magnetic field. This requirement is seldom obtained or difficult to meet.

The second approach is based on a physical (analog) simulation of EM fields. Gordeyev et al. (1981) constructed models, which describe quantitatively the distribution of the VLF EM field over different terrain relief forms. Baker and Myers (1980) suggested an EM field "reduction" method based on their model investigations. This method, nevertheless, has the same limitations as found in Tarkhov (1961).

Gordeyev (1983) proposed a third approach. It is based on employment a graticule (chart) method to reduce the topographic effect on the total horizontal magnetic field component of the EM field of remote transmitters. It is difficult to apply at greater relief dips and it can, in some cases, impair the interpretation. This limitation is traceable to the "build-up effect" of a rectangular graticule in a complicated (relative to the observation profile) topography, which is, in addition, often characterized by different electric properties.

It should be noted that the effect of the Earth's surface topography on the radiowave propagation is a fairly important problem in radiophysics and has been investigated by quite a number of researchers. An overview of the literature suggests that this problem is still awaiting an adequate solution. A numerical calculation of radiowave scattering is a complicated electrodynamic problem even for the simplified case of diffraction by a homogeneous wedge displaying the finite conductivity (e.g., Захаров, Пименов, 1992; Ishimaru, 2017). The difficulties increase progressively for statistically inhomogeneous (i.e. real) surfaces. Pinel and Boulier (2013) emphasized that under natural conditions there is no need to find the detailed structure of a scattered field and that it is sufficient to ascertain some reflected-signal parameters averaged for the whole class of surfaces and targets. In general, these researchers have apparently come to the conclusion that wave scattering is determined largely by coordinate functions and represents a combination of wave diffraction on an arbitrary surface and the theory of probabi1ity plus mathematical statistics.

A review of the literature and results of VLF surveys leads to the following general rules:

(1) The plots of H_x (the x-axis is aligned with the observation profile) and the total horizontal magnetic field component H_φ substantially repeat the surface topography. There is a direct correlation between the increase or decrease in the recorded field intensities and positive or negative landforms, respectively.

(2) The intensity of the recorded VLF magnetic field is directly proportional to the relative elevation of observation points. The topographic anomalies caused by the local relief forms are similar to those from conductive bodies but have a smoother appearance.

(3) Where the angle between the radiowave arrival direction and that of a relief element is close to 0^o**,** the relief effect is relatively large, and where this angle is close to 90^o, it is relatively small, but in any case the relief effect is always present. Since all observations are made in the "distant" ("wave") zone, the bearing changes negligibly along the profile and the topographic anomaly is quasi-independent of the bearing change.

(4) VLF field intensity is mainly dependent on the resistivity of the rocks in the upper portion of a geological section.

The method suggested here for removing the terrain effect is simply to derive a linear least-squares relation (Eppelbaum, 1991)

$$H_{appr} = c + bh$$

approximating the observed field H as a function of elevation h (where b and c are the coefficients of a linear regression) and then to construct the residual field:

$$H_{resid} = H_{observ} - H_{appr},$$

where H_{obser} is the any of the observed components of the VLF-filed.

Measurement points indicating the obvious lateral inhomogeneities are usually disregarded. Sometimes the correlation may be not linear and the observed can be approximated by hyperbolic, polynomial and other function. However, a linear approximation is preferable since here the artificial mistakes are minimized.

The standard deviation (S.D.) of parameter b can be calculated using the following formula:

$$\text{S.D.} = \frac{\pm\left\lfloor b\left(1-r^2\right)^{1/2}\right\rfloor}{r}, \qquad (4)$$

where r is the correlation coefficient.

All the above mentioned points make it possible to apply the correlation method, developed earlier in magnetic prospecting, to the VLF method (Eppelbaum, 1991). An example of employment of the correlation in the Eastern Kur-Kol ore zone (Northern Caucasus, Russia) is presented in Fig. 2. Here the VLF-transmitter working at the frequency of 16.0 kHz (Rugby, UK) (see Table 1) was employed. The commercial pyrite zones occur in tuffs and tuffites of Middle and Upper Devonian (Fig. 2c). After removing the uneven relief influence by the aforementioned correlation method (correlation field is shown in Fig. 2a), the VLF anomaly is more clearly selected (Fig. 2b).

Fig. 3 illustrates the correlation procedure application in the VLF method in the area of the Katsdag pyrite-polymetallic deposit (the southern slope of the Greater Caucasus, Azerbaijan). The relief slope is about 40^o (which would create problems for many geophysical methods, but not for the VLF survey) and the ore bodies occur in Middle Jurassic deposits. The employed frequency was 19.6 kHz (the VLF transmitter located in Oxford (UK) was utilized; see Table 1).

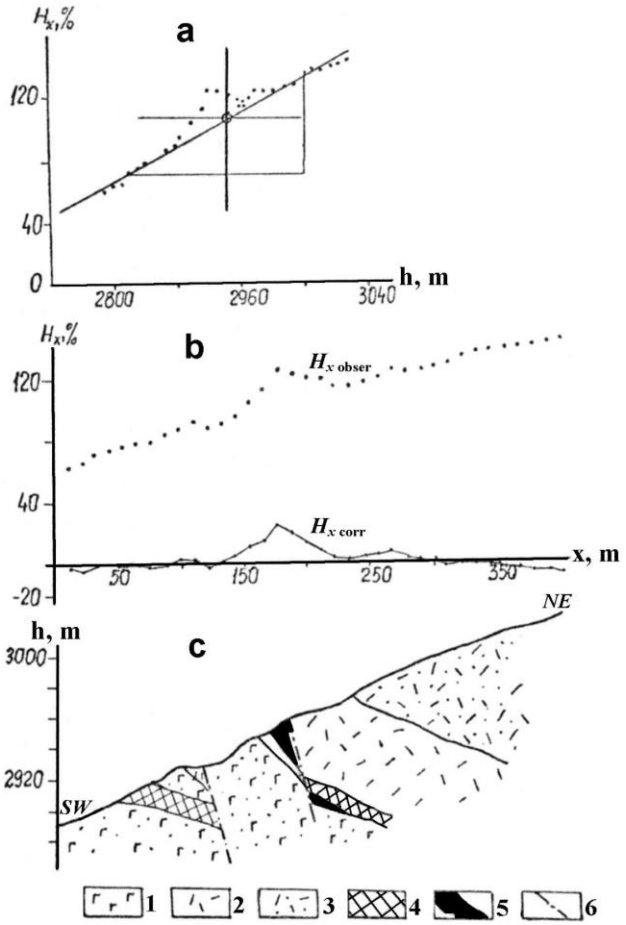


Fig. 2. Correlation technique for reducing terrain relief on the portion of Eastern Kur-Kol zone (Northern Caucasus, Russia). a) correlation field, b) observed and corrected H_x graphs, c) geological section (observed VLF anomaly and geological section are from Гордеев, 1970)
1 – tuffs, 2 – tuffites, 3 – tuff-sands, 4 – and 5 – poor and rich polymetallic ores, respectively, (6) faults

The different geological units in this area have the following resistivities (Fig. 3c): the pyrite-polymetallic ore bodies – fractions of Ohm·m; the mineralized zone (outcropping in the upper portion of the section) – l-3 Ohm·m: the sandstones – 1200-1500 Ohm·m; the clay shales – 700-1000 Ohm·m; and the liparite-dacites – 500-700 Ohm·m. These values indicate a relatively uniform background medium as far as resistivity is concerned. However, a distorting topographic effect tends to impair the visual detection of the VLF anomaly from a hidden ore body (tilted plate). The correlation coefficient *r* consists of 0.97 (the broad anomaly from a mineralized zone was neglected) (Fig. 3b). When the topographic effect is removed, a weak anomaly due to the ore body and a wide anomaly from the thick mineralized zone appear more clearly (Fig. 3a).

Following example shows application of the correlation technique on a portion of the Katekh pyrite-polymetallic deposit (southern slope of the Greater Caucasus, Azerbaijan) (Fig. 4). A frequency of 16.0 kHz was used in the investigation (the transmitter was in Rugby, Great Britain; see Table 1), and the profile azimuth was 60°. The ribbon-like band of the pyrite-polymetallic ore is located at a depth of about 60-80 m in the sandy argillaceous series of Upper Aalenian. The average resistivity of the nearly uniform surrounding medium is in the range of 700 to 900 Ohm·m; the resistivity of the massive ore body is a fraction of 1 Ohm·m. The skin depth is estimated about 110 m. Since a topographic anomaly was superimposed on a small signal from a relatively deep-seated anomalous object, it was difficult to detect the latter.

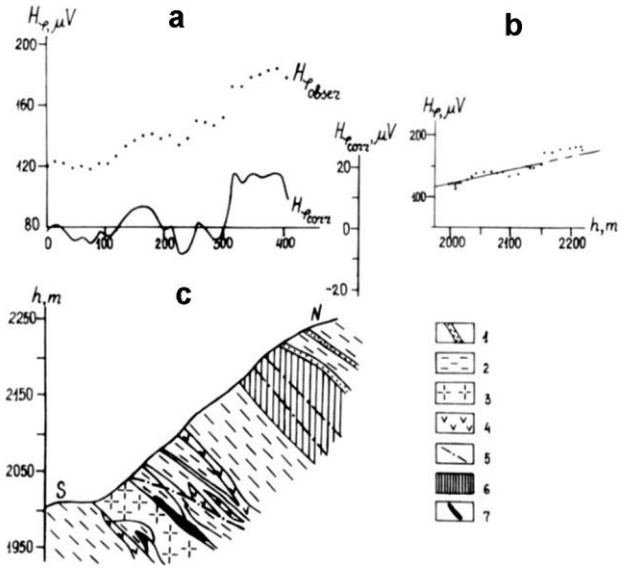


Fig. 3. Correlation technique applied for terrain relief elimination in the Katsdag pyrite-polymetallic deposit (northern Azerbaijan). a) Graphs of observed and corrected H_φ values, b) Correlation field, c) Geological section
1 – sandstone, 2 – clay shales, 3 – liparite-dacites, 4 – dioritic porphyrites, 5 – faults, 6 – ore mineralization zone, 7 – massive ore body

Two different correlations were made for the southwestern and the northeastern slope, yielding coefficients of correlation (between the relief heights and VLF intensity) of r_1 =0.988 and r_2 = 0.85. The results for the southwestern slope are (after calculation of S.D. for parameter *b* by the use of equation (4): for the southwestern slope $H_{\varphi\,\mathrm{appr}} = 84 + +(0.6 \pm 0.09)h$, and for the northeastern slope – $H_{\varphi\,\mathrm{appr}} = 105 + (0.79 \pm 0.49)h$. After removing the relief effect, a positive anomaly can clearly be seen on the northeastern slope in the $H_{\varphi\,\mathrm{corr}}$ plot (Fig. 4). This anomaly may be due to the edge effect from the deep ore body, whereas the minimum on the southwestern slope may correspond to the opposite edge

of the subhorizontal tabular ore body, since the anomaly is not large in this case (Eppelbaum, 1991).

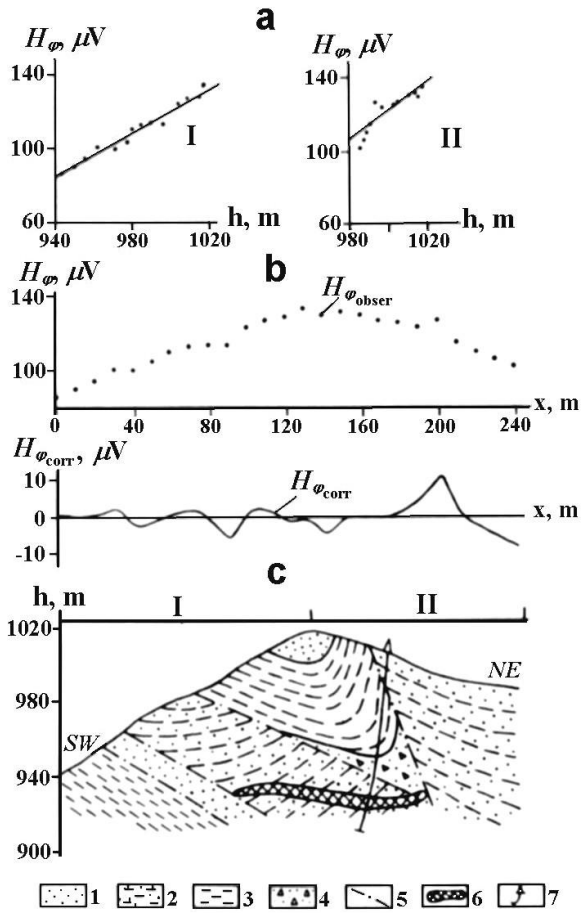


Fig. 4: Correlation technique for reducing the terrain relief effect on a portion of the Katekh pyrite-polymetallic deposit (northern Azerbaijan). a) Correlation, b) Plots of observed and corrected H_φ values, c) Geological section
1) fine and medium-grained sandstones, 2) alternating sandstone and clay shale strata, 3) clay shales, 4) brecciated zone, 5) fractures, 6) ore body, 7) prospecting borehole

The last example illustrates elimination of the terrain relief effect in the VLF-studies (f = 19.6 kHz) in the portion of the Gyzylbulagh gold-copper deposit (Agdara area, Nagorny Garabakh, Azerbaijan) (Fig. 5). Even simple visual analysis indicates that the observed VLF field (Fig. 5a) strongly correlates with the topography along the geophysical profile. The obtained correlation (without anomalous VLF points) is visualized in Fig. 5b, and the corrected VLF curve is shown in the lower part of Fig. 5a. The corrected VLF anomaly well corresponds to the known inclined ore body (Fig. 5c), while the left corrected anomaly obviously indicates an undiscovered ore body of the vertical dipping. These conclusions confirm the results of VLF physical modeling obtained from the models of two aforementioned types (Fig. 5d).

4. Advanced quantitative analysis of VLF anomalies

4.1. A brief review of available methods of quantitative analysis

An overview of the literature indicates that there are practically no reliable or rapid techniques of quantitative interpretation in the VLF method.

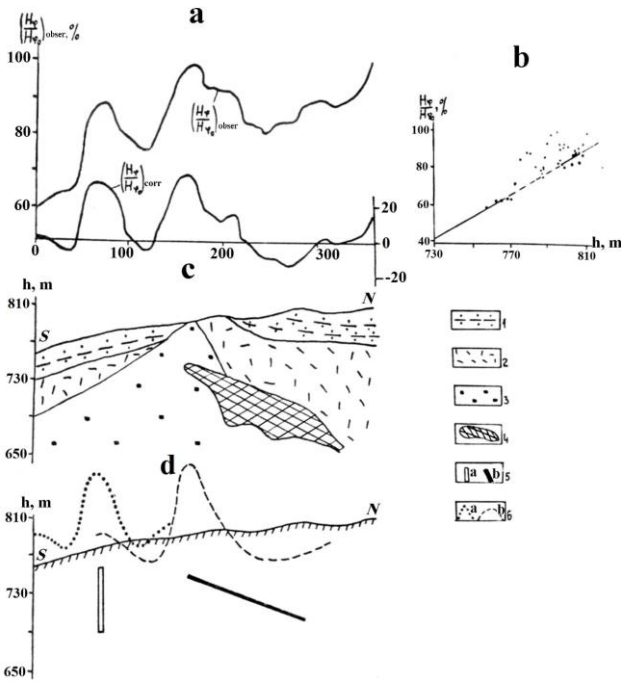


Fig. 5. Correlation technique for reducing terrain relief on the portion of the Gyzylbulagh deposit (Lesser Caucasus, Agdara area, Azerbaijan). a): Observed and corrected H_x graphs, b): Correlation field, c): geological section, d): model VLF curves
1) lavas of liparite-dacite porphitites, 2) tuffs lavas of liparite-dacite porphitites, 3) breccia zone, 4) ore body, 5) model bodies for a) vertical thin bed, b) inclined thin bed, 6) H_φ theoretical curves for 5a and 5b

The methods suggested by Tarkhov (1961) are semi-quantitative. The procedure developed by Fraser (1969) is useful primarily only for qualitative revealing anomalous targets. Karous and Hjelt (1983) proposed to apply conventional methods of linear filtering to remove various kinds of noise containing in the VLF data. Singh et al. (2020) indicate that Fraser (1969) and Karous and Hjelt (1983) techniques are insufficient ones, since many categories of noise in the VLF-method have expressed nonlinear character.

The techniques presented by Gordeyev and Sedelnikov (1974), based on calculating the anomaly extreme ratio, require knowing the zero line (or a normal field). The wrong choice of the zero line entails the substantial errors in determining the anomalous object's quantitative parameters. Moreover, these techniques are not intended for interpretation in conditions of the rugged terrain relief.

Dmitriyev et al. (1977) solved the direct problem for a number of geophysical EM methods (including the VLF method). They provide a numerical analysis of the anomalies due to bed-like bodies as a function of their electric properties, dimensions and position with respect to the Earth's surface and the observation profile. However, computational difficulties restrict the range of models to simple ones.

Zhdanov and Keller (1994) noted that the finite differences method is the most effective method of the EM field mathematical simulation. However, the expediency of its application depends on the size of the design area and the desired accuracy of the computations. For a large area of calculations or when the simulation problem needs higher accuracy, the computations exceed all possible limits even for high-performance modern computers.

Khesin et al. (1996) pointed out that some approaches developed for the magnetotelluric sounding (Kaufman and Keller, 1981; Zhdanov and Keller, 1994) could be employed in the VLF method. Basokur and Candansayar (2003) suggested to apply the same methodologies (though, these authors concluded that this interpretation could only be qualitative). However, the application of these procedures is usually limited by the extreme variations of electric properties in the (upper) part of geological section.

Gordeyev and Sedelnikov (1974) and Gordeyev et al. (1981) have presented the physical (analog) simulation of VLF curves from the models of a vertical inclined thin bed. The accuracy of the physical simulation and that of the numerical computations (for simple models) is at present approximately the same, and is roughly 8-10%.

Numerous other works, in many respects similar to those mentioned above, have dealt with the anomaly interpretation in the VLF method. For instance, Karous and Hjelt (1979) and Olsson (1980) report the calculation of plots for the vertical and horizontal components of the VLF magnetic field using the model of an inclined thin bed with the different dip angles; the depth of the upper edge of the bed varies as well. Olsson (1980), Tesmull and Crossley (1981) and Poddar (1982) computed components of the VLF fields for the different types of geoelectric sections. Miecznik (1986) calculated the magnetic components of the VLF field caused by another model of an anomalous object – conductive cylinder placed in a homogeneous medium (the cases of both **E**-polarization and **H**-polarization are discussed).

The characteristic VLF diagrams developed by Sinha (1998) can provide useful information on the vertical and inclined conductive beds in simple geological-geophysical conditions. The VLF first derivative method proposed by Djeddi et al. (1998) is based on perspective methodology (the authors suggest eliminating the topographic effect of peculiarities in the interpretation process).

Olsson (1983) solved the direct problem for an ideal conductive half-plane with different dip angles, when the half-plane is covered by variable-depth loose deposits. In addition, he proposes the techniques for a simplified interpretation of VLF data based on the utilization of the extremum points in the anomaly plot. The synthetic models presented by Pedersen and Oskooi (2004) provide better understanding of the resolving power of the VLF data. The same authors propose employing a tensor variant of VLF measurements. Santos et al. (2006) described a quantitative interpretation of VLF-EM data using 2-D models (the authors developed a 2-D regularized modeling of VLF-EM data based on a forward solution using the finite-element method) that yields practical results about the average resistivity in the survey area. Kaikkonen and Sharma (2001) performed a 2-D simulation of the noise-free and noisy media with single-body and complex models. The authors highlight the need to use reliable *a priori* information before running such a simulation.

Singh and Sharma (2016) modeled subsurface structure in terms of apparent current density distribution and compared obtained results with the inversion models for resistivity distribution computed using numerical techniques. Their study demonstrates that the results obtained using both approaches (current density and resistivity distribution) are comparable, but due to applied analytical expression, current density imaging is faster.

Singh et al. (2020) suggested the nonlinear empirical mode decomposition technique to minimize the noise from the VLF data. These authors proposed an inversion approach based on triangular grid to reduce the problem size by utilizing minimal number of model parameter and accurate model of the rugged topography.

4.2. Application of procedures developed for potential field analysis

The main equations used in the theory of alternating EM field are the Maxwell's equations:

$$\mathrm{rot}\,\mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \tag{5a}$$

$$\mathrm{rot}\,\mathbf{E} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \tag{5b}$$

$$\mathrm{div}\,\mathbf{B} = 0, \tag{5c}$$

$$\mathrm{div}\,\mathbf{D} = q. \tag{5d}$$

Here **H** and **B** are the magnetic field vectors (**H** stands for intensity and **B** for induction); **E** and **D** are the electric field vectors (**E** stands for intensity and **D** for induction); q is the charge density; **j** is the conduction current density.

Eq. (5a) can be written as (Заборовский, 1963):

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{C} = \mathbf{j}_{\text{cond}} + \mathbf{j}_{\text{disp}}, \qquad (6)$$

where **C** is the total current density; $\mathbf{j}_{\text{cond}}$ and $\mathbf{j}_{\text{disp}}$ are the conduction and displacement current densities, respectively.

It has been found that at the frequencies of 10 to 30 kHz, $\mathbf{j}_{\text{disp}} \approx 0$ (Wait, 1962). Therefore,

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j}_{\text{cond}} \qquad (7)$$

or

$$\mathbf{H} = \nu \mathbf{E}, \qquad (8)$$

where ν is the electric conductivity.

An *EM* field can be considered as quasi-stationary if it satisfies the three conditions of quasi-stationarity. Landau et al. (1984) described the common physical meaning of these conditions. Alpin et al. (1985) formulated these conditions as applied to geophysics. These requirements are as follows:

(A) Slow field variation,

(B) Closed currents,

(C) To avoid an appreciable lag in the magnetic field variations, the domain including magnetic field generating currents and observation points must not be too large.

Let us consider these conditions in more detail.

(A) The study of time variations of the VLF fields has shown that sharp changes in intensity are not characteristics of these fields. Nonetheless, these variations should be eliminated by use a special procedure during fieldworks (see section "Elimination of temporal VLF variations").

(B) This condition follows from Eq. (7), since div rot **H** = 0 and, therefore, div **j** = 0. Almost closed currents do not violate this condition.

(C) This condition can be formulated in the following way: the length of an EM wave in the ground should essentially exceed the length of the investigated targets. This condition, as a rule, is fulfilled in the prospecting of mineral deposits, and often fulfilled in the geological mapping and object analysis in environmental and military geophysics.

It is known that the fundamental solution of the Laplace equation in the 2-D case is the following function:

$$g_0(M,P) = \frac{1}{2\pi}\ln\left(\frac{1}{R_{MP}}\right), \qquad (9)$$

where R_{MP} is the distance between points M and P (M is the observation point and P is the point of the body).

The fundamental solution of the Helmholtz wave equation is a Hankel function of the first kind with the zero order $H_0^{(1)}$:

$$g_0(M,P) = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(kR_{MP}), \qquad (10)$$

where k is the wave number and i is the imaginary unit.

The function (10) is the analog of the function (9) for a Laplace equation.

Using the above correspondence, Hänl et al. (1961) and Dmitriyev (1982) proved the relationship between Green's solutions of the Laplace and Helmholtz equations. This allowed them to conclude that the results obtained in the potential theory could be extended to the Helmholtz equation.

Dmitriyev et al. (1977) indicated that the association of the singular points resulting from the VLF field anomaly plots with geometrical parameters of the anomalous bed is analogous to the well-known behavior of singular points in the potential field anomalies. Zhdanov (1988) carried out a theoretical investigation of the application of a set of Cauchy-type integral analogs to the problems of electromagnetism. It was suggested that the methods developed in potential theory for the analytical continuation, separation and quantitative interpretation could be applied to the quasi-stationary EM anomalies.

The quasi-stationarity of the EM field follows from the condition (A).

An overview of publications (Гордеев и др., 1981; Poddar, 1982; Poikonen and Suppala, 1989; Sharma and Kaikkonen, 1998; Beamish, 2000) indicates that a conductive thin bed (TB) is the most common model for the VLF technique. The analytical expressions of the fields for this model (the 2D case) are presented in Table 2.

Table 2

Comparison of analytical expressions for TB in the magnetic prospecting and the VLF method

Field	Analytical expression	
Magnetic	$Z_v = 2I2b\dfrac{z}{x^2+z^2}$	$X_v = 2I2b\dfrac{x}{x^2+z^2}$
VLF	$H_x = kH_0\dfrac{z}{x^2+z^2}$	$H_z = kH_0\dfrac{x}{x^2+z^2}$

In this table, Z_v and X_v are the vertical and horizontal magnetic field components for the vertical magnetization, respectively; H_x and H_z are the hori-

zontal and vertical VLF magnetic field components, respectively; H_0 is the VLF primary field intensity; k is the coefficient reflecting the geometry and conductivity of the anomalous body.

Evidently, Z_v is proportional to H_x, whereas X_v is proportional to H_z. Similar results were obtained for the horizontal circular cylinder (HCC) model (Eppelbaum and Khesin, 1992).

Thus, the plots of magnetic fields of VLF transmitters can be interpreted by the special methods elaborated in potential field theory (in particular, in magnetic prospecting, for conditions of the rugged terrain relief, oblique magnetization (polarization) and an unknown level of the normal field). The **E**-polarization vector, in the first approximation, is the analog of the magnetization vector (Eppelbaum and Khesin, 2012).

In this context, the advanced interpretation techniques (improved modifications of areal, characteristic point and tangents methods) presented in (Khesin et al., 1996; Eppelbaum et al., 2001; Eppelbaum, 2011, 2015; Eppelbaum and Mishne, 2011) are of practical interest in the VLF method. Application of the improved methods of tangents and characteristic point methods developed in magnetic prospecting for the model of thin bed is shown in Fig. 6.

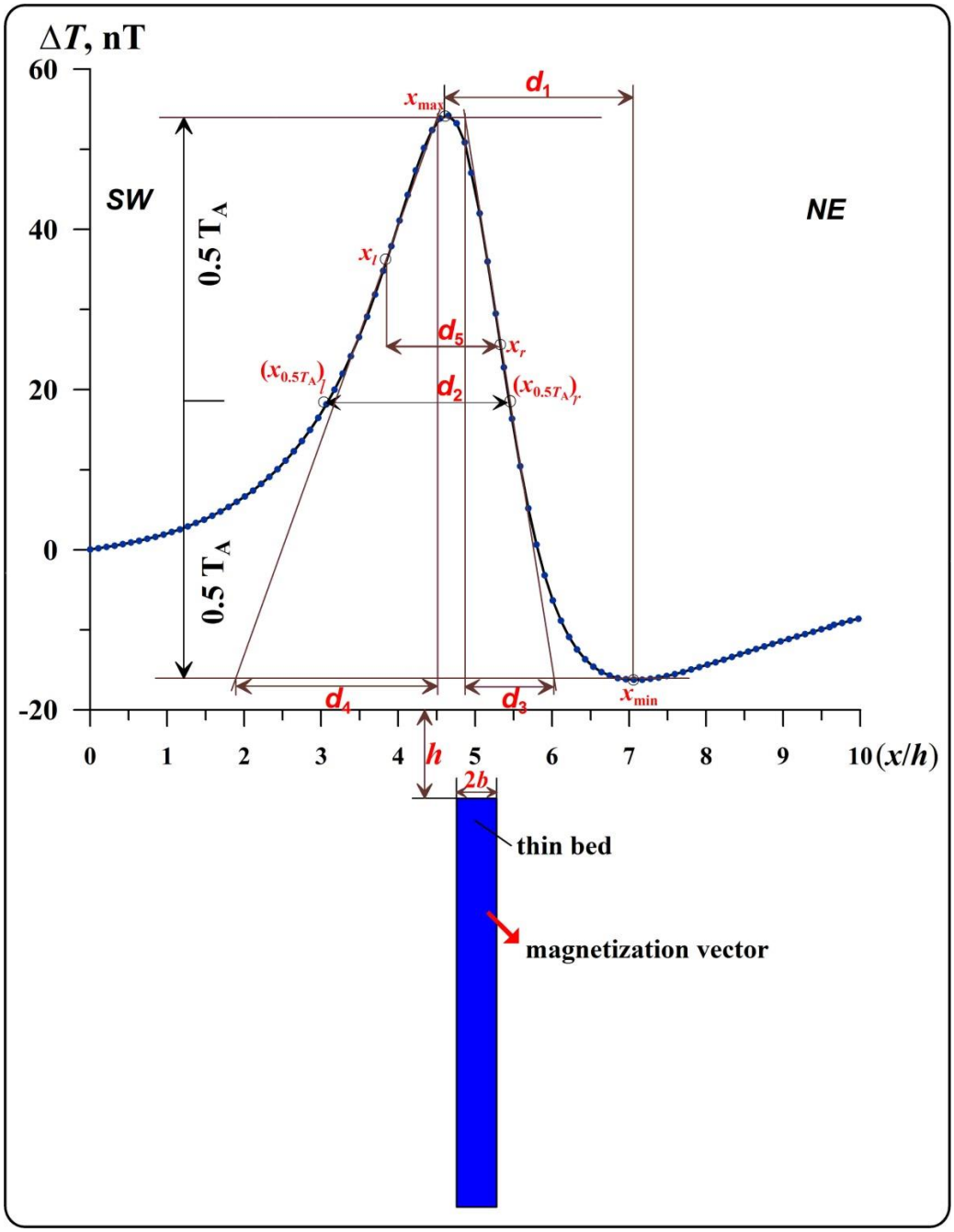


Fig. 6. Example of quantitative analysis of magnetic anomaly produced by thin bed

It should be noted that the total horizontal component of the VLF magnetic field $H_\varphi = \sqrt{H_x^2 + H_y^2}$ can be interpreted as the H_x component, since the contribution of the H_y component is usually relatively small.

The essential distinctions reflecting quasi-potential nature of the VLF EM field are as follows. In magnetic prospecting the induced magnetization vector of an inclined bed is approximately parallel to the geomagnetic field vector, irrespective of the bed dip direction, where the magnetic susceptibility does not exceed 0.1 *SI* unit. In EM prospecting by the VLF method under **E**-polarization for highly conductive objects, the equivalent vector of polarization that causes the anomalies of H_x and H_z, approaches the body axis, with a slight deviation toward the vertical for the gently sloping bodies (Гордеев и др., 1981; Poikonen and Suppala, 1989). This makes it possible to utilize the generalized angle θ derived from these anomalous components and to represent the difference in the inclination angles for the bed and the polarization vector to estimate the bed dipping α by the following empirical formulas (Eppelbaum and Khesin, 2012):

(a) for the H_x anomaly

$$\alpha = 3\theta + 90^0, \qquad (11a)$$

(b) for the H_z anomaly

$$\alpha = 3\theta - 180^0, \qquad (11b)$$

where α is the bed inclination.

For the case of observations on a sloping relief, the angle α is calculated as follows:

(a) for the H_x anomaly

$$\alpha = 3(\theta - \omega_o) + 90^0 \qquad (12a)$$

(b) for the H_z anomaly

$$\alpha = 3(\theta - \omega_o) - 180^0, \qquad (12b)$$

where ω_0 is the angle of the terrain relief inclination ($\omega_0 > 0$ when the inclination is toward the positive direction of the *x*-axis).

It should be noted that the position of the upper edge can be slightly shifted from the real upper edge downward along the bed dip. This is because the linear currents are concentrated in the upper portion of the conductive target; therefore this portion may be situated below this object's upper edge.

If anomalies are observed on an inclined profile, then the obtained parameters characterize a certain fictitious body. The transition from the fictitious body parameters to those of the real body is performed using the following expressions (the subscript "*r*" stands for a parameter of the real body) (Eppelbaum and Khesin, 2012):

$$h_r = h + x\tan\omega_0, \qquad (13)$$

$$x_r = -h\tan\omega_0 + x_0, \qquad (14)$$

where h is the depth of the upper edge occurrence, x_0 is the location of the source's projection to plan relative to the extremum having the larger magnitude.

An effective example of the VLF data analysis is presented in Fig. 7. It is necessary to underline that the anomalous magnetic *X*-component computed for the same model is very similar to the observed H_z VLF curve (their theoretical similarity is shown in Table 2). Fig. 7 clearly shows that the results agree well with the geological data.

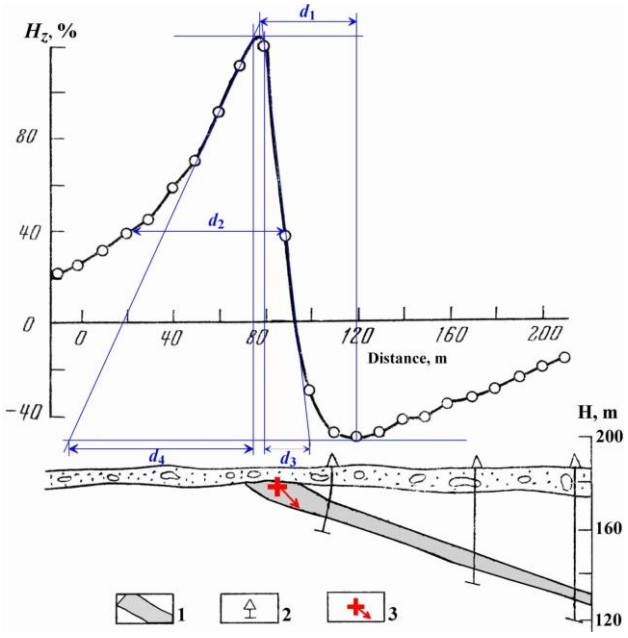


Fig. 7. Quantitative analysis of the vertical magnetic component H_z of the electromagnetic VLF field in the copper-nickel deposit (Kola Peninsula, Russia) using the improved tangent and characteristic point methods (observed curve and geological section after (Гордеев и др., 1981)).
1) copper-nickel ore body, 2) location of drilled boreholes, 3) results of quantitative analysis: cross indicates position of the upper edge of the ore body and arrow shows its dip direction

Fig. 8 illustrates the interpretation results for the H_φ curve (f = 19.6 kHz) along the profile across the Gyzylbulagh gold-pyrite deposit (Lesser Caucasus, Azerbaijan). The VLF anomaly over the ore object exposed by the prospecting boreholes is shown in the central portion of the profile. In the southwestern portion other VLF anomaly over an anticipated object is marked. In the both cases the approximation model was represented by an inclined thin bed.

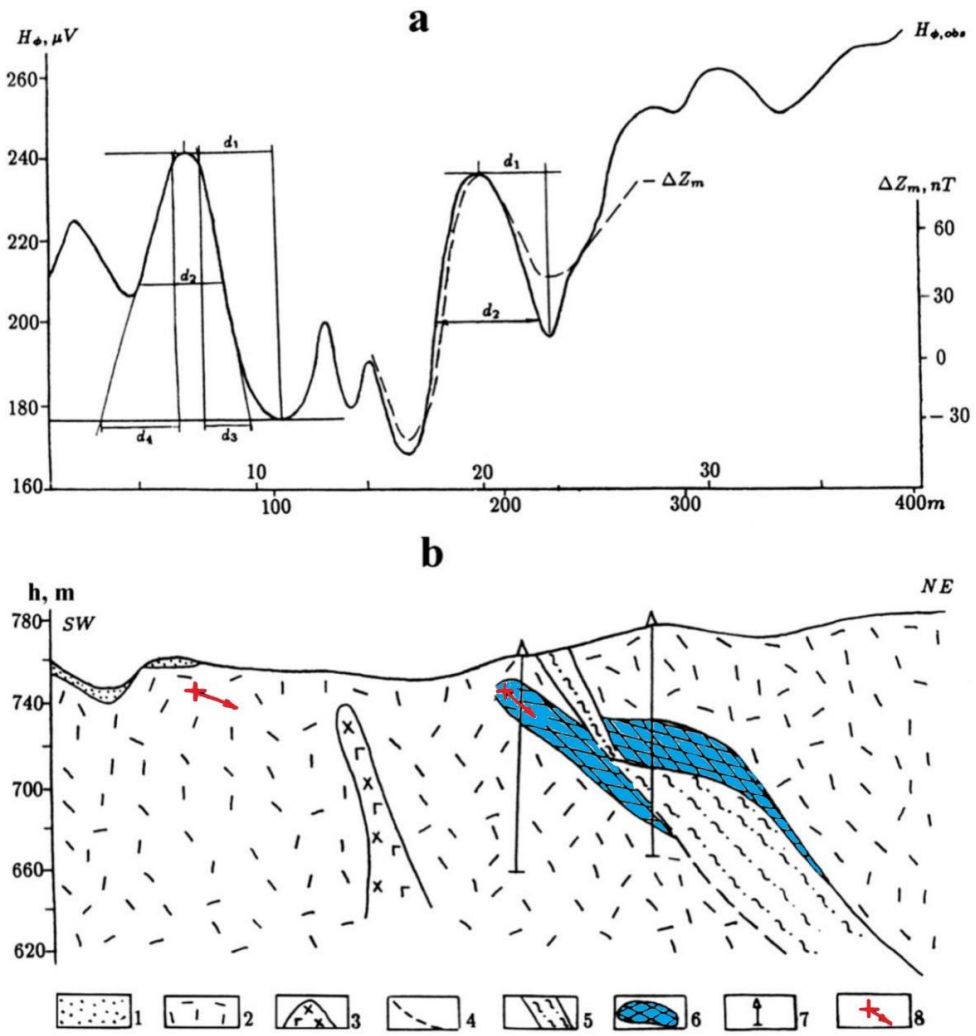


Fig. 8. Quantitative interpretation of the H_φ field in the area of the Gyzylbulagh gold-pyrite deposit (Lesser Caucasus, Azerbaijan): a) the plots of H_φ and model magnetic field ΔZ_m, b) geological section 1) loose deposits; 2) tuffs of liparite-dacitic porphyrites; 3) dike of andesite-basalts; 4) disjunctive dislocation; 5) ore body; 6) zone of boudinage; 7) prospecting wells; 8) location of the conductive bodies' upper edge and direction

As it was earlier shown, the magnetic field ΔZ was an analogue of H_x and H_φ components in the VLF method for the case of an inclined thin bed. A model magnetic field ΔZ_m due to the host medium and near-surface ore body is computed for the central part of the profile. For modeling purposes the following parameters were used: magnetization value: 300 mA/m for the host medium, and 1,000 mA/m for the anomalous (ore) body; the vector of magnetization was assumed to be vertical for the host medium (since in the VLF-method we have the quasi-vertical EM wave arrivals) and along the dipping for the orebody (VLF vector is oriented along the long body's axis). The magnetic azimuth of the selected profile was assumed to be 70°, which corresponds to the angle between the incoming VLF field and the real azimuth of the profile. It is clear from the figure that the H_φ and ΔZ_m curves are in good agreement. These calculations provided the additional proof of the similar nature of these fields.

Fig. 9 displays interpretation results in other portion of the Gyzylbulagh gold-pyrite deposit where simultaneously H_φ and H_x components (f = 19.6 kHz) were observed. The results are agreed both between themselves (H_φ and H_x) and with the available geological data obtained from "Azerbaijan Geological Assoc.".

6. Geological, environmental and other applications of VLF studies

6.1. Delineation of archaeological targets

Let us consider the following example. A detailed VLF survey was carried out near Alcala de Henares, a small town situated 20 km east of Madrid, Spain (Ogilvi et al., 1991). The main aim of this survey was localization of the air-filled underground galleries of comparatively small size occurring in the clastic sediments. One of the observed profiles is shown in Fig. 10. The underground gallery is approximated by the HCC model inscribed to the upper part of this target.

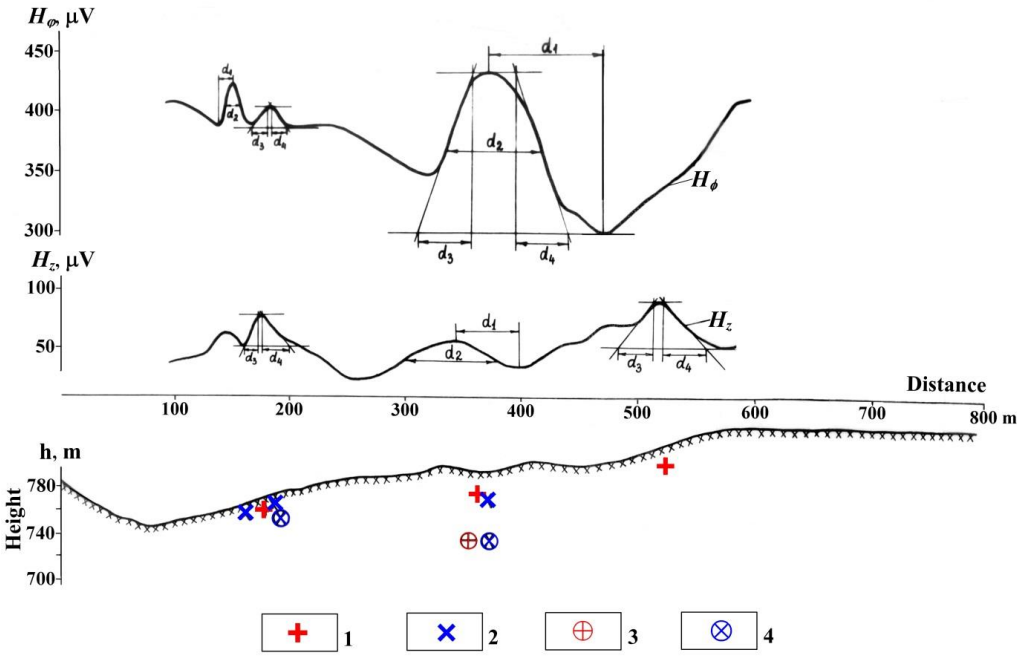


Fig. 9. Quantitative analysis of the total horizontal component H_φ and vertical component H_z of the magnetic field of VLF anomalies in the area of the Gyzylbulagh gold-pyrite deposit (Lesser Caucasus, Azerbaijan) (revised after Eppelbaum and Khesin, 2012) Positions of thin bed upper edge center by the data of H_z 1) and H_φ 2), positions of the centers of the horizontal circular cylinder by the data of H_z 3) and H_φ 4)

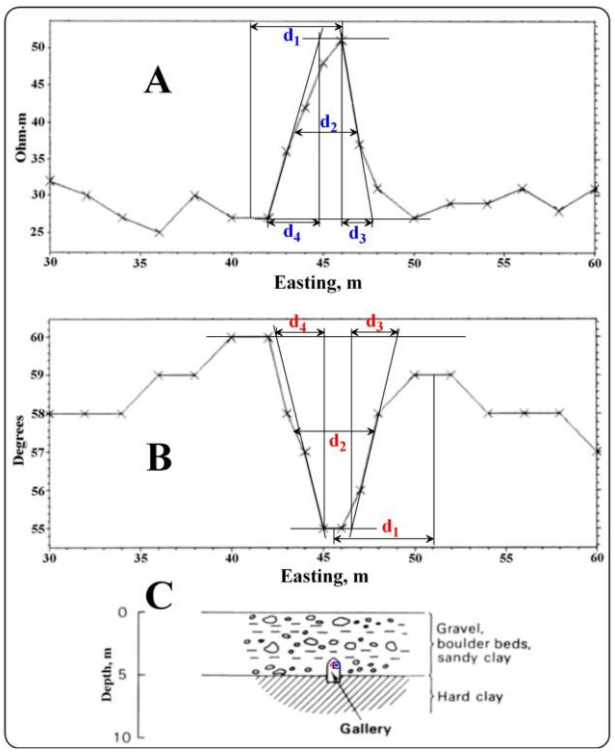


Fig. 10: Quantitative interpretation of VLF-R apparent resistivity and phase profiles, NAA transmitter (Gutler ME, USA), 24 kHz[1]. A – apparent resistivity, B – phase anomaly, C – geological section. Symbols ◈and ▣designate the determined position of HCC center for phase anomaly and apparent resistivity, respectively. Observed curves and geological section are taken from Ogilvi et al. (1991), interpretation after Eppelbaum (2007b).

[1] In the modern Reference Handbook the NAA transmitter is presented with the frequency of 25.3 kHz

Results of quantitative examination of the phase anomaly and apparent resistivity curves indicate that the obtained results have enough accuracy.

6.2. Geological mapping

6.2.1. Ring targets as example

It is well-known that interpretation of VLF data strongly depends on the kinds of geological noise in the areas under study (Jeng et al., 2007). So, here arises a problem of development of methodologies enabling to recognize the VLF signals against the strong noise background.

One of key problems of geophysical prospecting (including VLF method) is the delineation of the typical *buried* objects of various size and origin. The ways of revealing such buried objects with an *a priori* shape are illustrated below through example of identification of the ring (circular) buried targets.

The ring structures (RS) are omnipresent in the Earth's environment (Fig. 11). RS are generally classified as *Terrestrial* and *Extraterrestrial* (natural RS) or *Archaeological and Military/Engineering* (artificial RS) (Eppelbaum, 2007a). Thus, problems sometimes arise not only of the RS identification, but also of the correct target classification. A greater accuracy can be achieved by collecting more comprehensive geological (geochemical), geophysical, archaeological and engineering (military) data. In the flow chart (Fig. 11) natural RS are classified using Khain's (1995) scheme and the author's supplements and extensions (Eppelbaum, 2007a). The *Extraterrestrial* RS are associated with dropping of the

cosmic bodies. The *Terrestrial* RS are divided to tectonic, magmatic, metamorphic and erosional with the following specification. The *Archaeological* RS are presented as the buried caves, ancient squares and circus rings, the remains of fortresses and towers, the tailings of detritus and religious edifices. The detection should be coordinated with the other geophysical methods, morphological characteristics, etc. The *Military* RS are displayed as the rocket shafts, command posts and defensive installations (obviously, kinds of these RS may be significantly extended). In the latter case the VLF Remote Operative Vehicles (ROV) application has clear advantages over other identification methods.

6.2.2. Methodology of RS Delineation

The first problem in the RS analysis is to differentiate the targets from the background geological noise. Very frequently it is difficult to single out the RS in complex geological-geophysical environments, especially when the typical rectangular network of geophysical observations is used. In addition, anomalies caused by the RS can be distinguished from other geophysical field features by their location on the periphery of the anomalous bodies. For this purpose a special method has been devised to distinguish the RS structures by computing the sums of the horizontal gradients of geophysical fields and their differences (Khesin et al., 1996). It should be noted that the ROV application makes it possible to observe geophysical fields at different levels and compute difference of the horizontal gradients between them, which might be employed as an additional searching indicator (Eppelbaum, 2016).

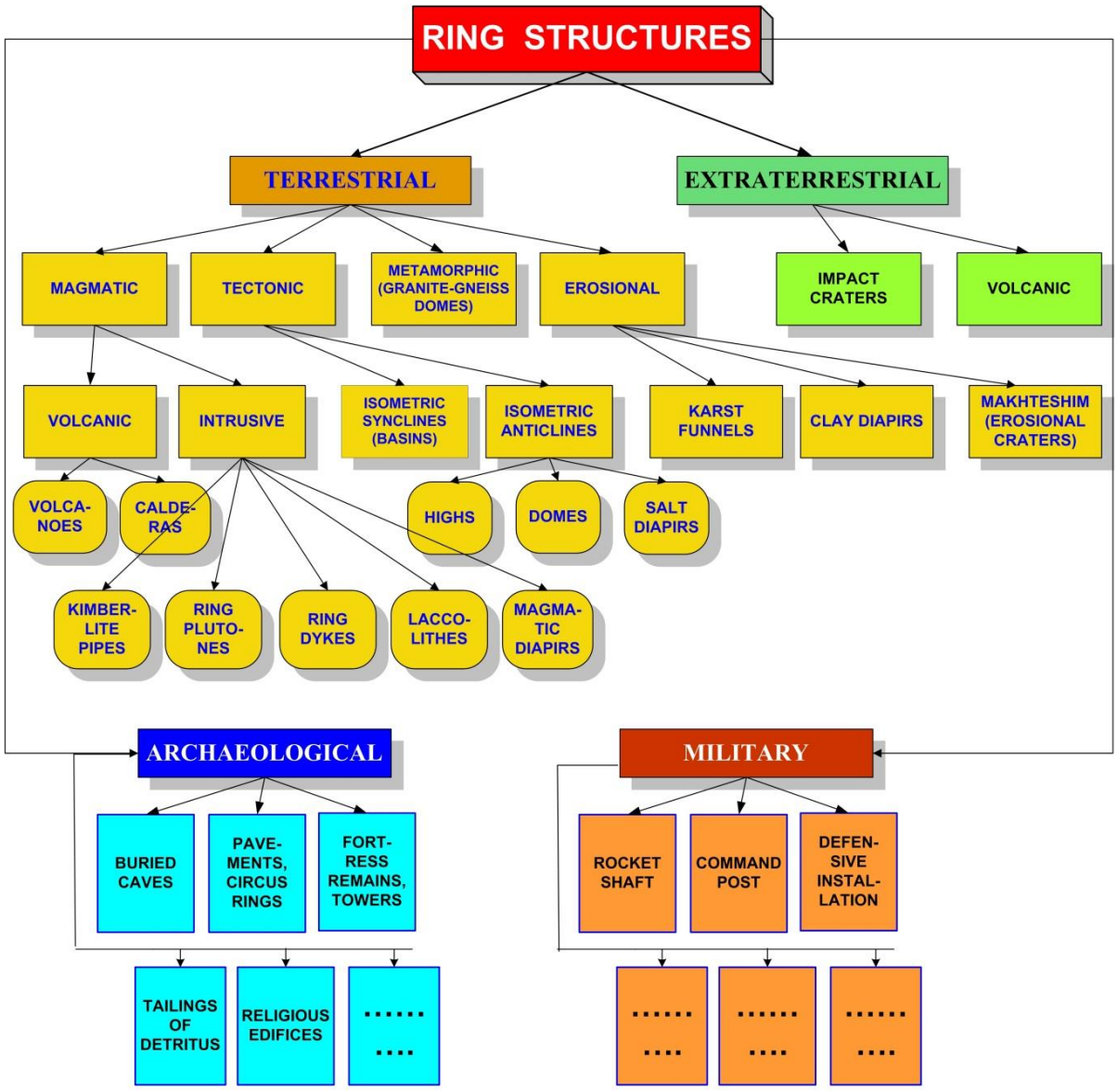


Fig. 11. Classification of ring structures in the Earth's environments (after Eppelbaum et al., 1998 and Eppelbaum, 2007a, revised and supplemented)

The apparent graticule radii drawn an interval of 45° determine the horizontal gradients (Fig. 12c). The sum of the gradients should be higher in the presence of circular features, and other signals should remain constant (an example from the magnetic prospecting is demonstrated). Here the correlation of the sum of gradients (or the average gradient) for a circle with a radius R_n, and a ring external to this circle limited by R_n and R_{n+1} radii makes it possible to determine whether the circular feature reflects ring structure (Fig. 12d). The sum of gradients inside the circle tends to zero in the absence of a centric texture. An application of this method is depicted on a model of an quasi-circular body magnetized along its dipping (Fig. 12a,b). It should be noted that this method demonstrated a better efficiency compared to other sophisticated approaches where the derivatives of high orders were calculated.

6.4. Indicators of dangerous geodynamic events at a depth

Electrical anomalies in the Earth's atmosphere have been observed many times before significant earthquakes (e.g., Pierce, 1976; Pulinets and Boyarchuk, 2004; Kachakhidze et al., 2009; Harrison et al., 2010).

Perturbations in the VLF phase and amplitude have been reported to occur before the large earthquakes (Kushida Y. and Kushida R., 2002; Hayakawa et al., 2010; Moriya et al., 2010; Rozhnoi et al., 2013). One of first studies of this effect reported about the use of the Omega navigation transmitters and claimed that 250 out of 350 earthquakes with the magnitude *M* greater than 4 were associated with phase and/or amplitude variations (Gokhberg et al., 1989).

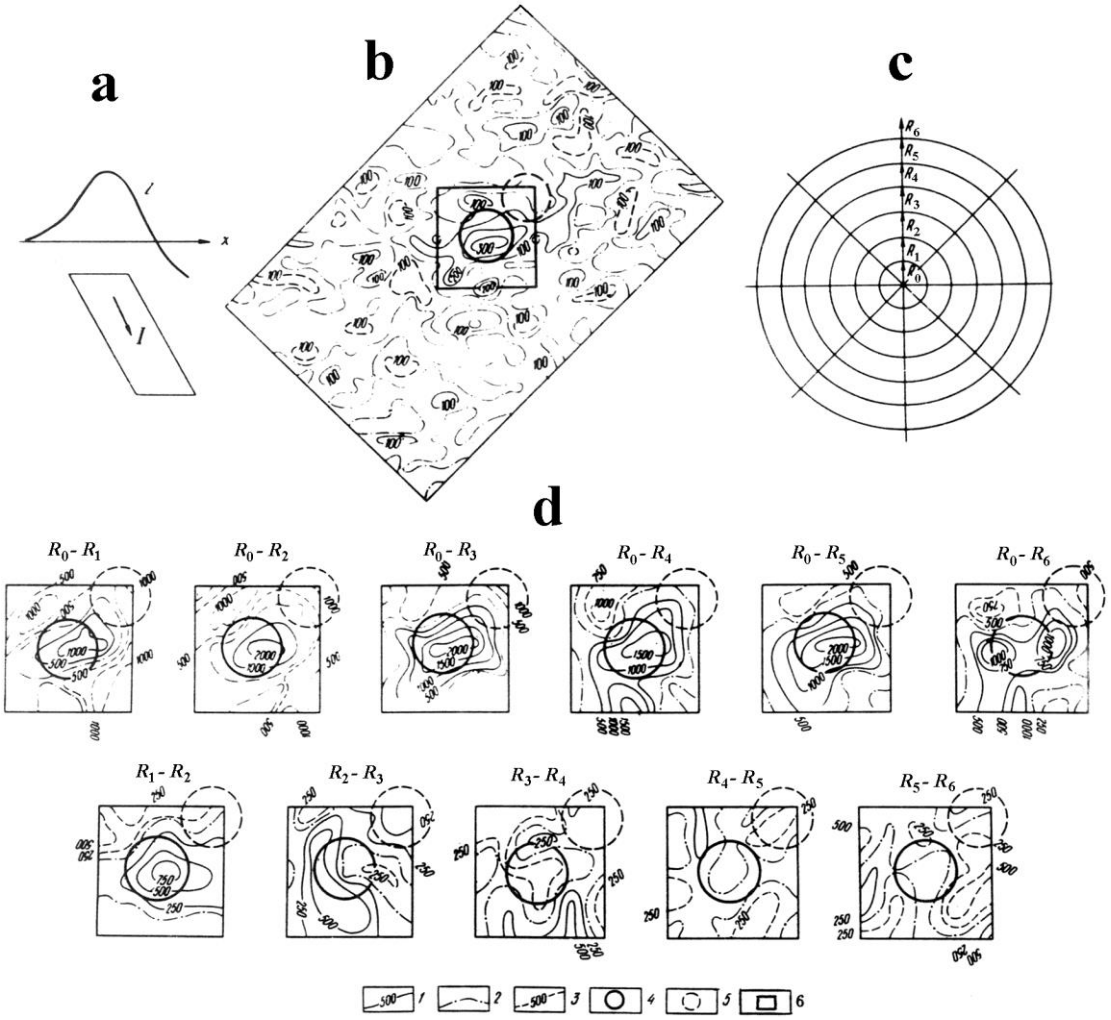


Fig. 12. Principal difference scheme for ring structure localization (on example of magnetic field processing) (modified after Khesin et al., 1996):
a) Magnetic field calculated from a model body (along profile), **b**) model field complicated by random noise (in plane), **c**) apparent graticule for ring structure selection,(**d**) singling out a model body by summing horizontal gradients of the field within apparent circular graticule zones.
Magnetic field intensity (in nanoTesla) of a model field (**b**) and the sum of its gradients (**d**) in conventional units:
1) positive, 2) zero, 3) negative; cylinder edge projection: 4) upper, 5) lower; 6) contour of the target shown in (**b**).

However, a subsequent test of the link between these variations and earthquakes concluded that the observed precursory relationship was not sufficiently statistically significant (Michael, 1997). Nevertheless, the same conclusion can be said about all other geophysical methods employed in the earthquake forecasting.

Fig. 13 indicates two negative VLF anomalies (total magnetic component H_φ was observed) at two frequencies from the VLF-transmitters occurring in Bordeaux, France (f = 15.1 kHz) (see also Table 1) and Krasnodar, Russia (f = 11.9 kHz). These observations were carried out in the Agdara area of Azerbaijan (Lesser Caucasus) before four days of earthquake with the magnitude of 4.8 with the epicenter occurring at the depth of 22 km. Besides the different employed frequencies, the VLF anomalies are characterized by the different azimuths to the transmitters, i.e. these anomalies are independent ones that increase reliability of these precursors. Interestingly to note that Smirnov's (2019) study testifies the appearing of significant *negative* Earth's electric anomalies before the dangerous geodynamic events.

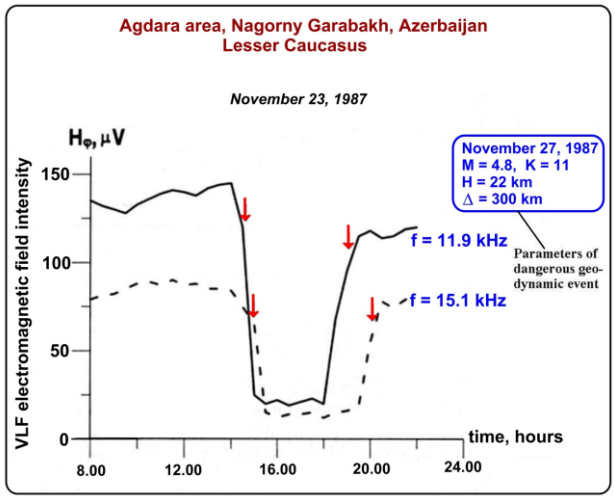


Fig. 13. VLF temporal variations as possible precursors of dangerous geodynamic events. Agdara area, Nagorny Garabakh, Azerbaijan (modified after Eppelbaum and Finkelstein, 1998)

6.5. Possible military application

An important peculiarity of a VLF ROV survey at different altitudes is the slow decrease of the VLF signal with increasing observation height over the Earth's surface (Гордеев и др., 1981; Oskooi and Pedersen, 2006; Eppelbaum and Khesin, 2012; Abtahi et al., 2016). Therefore, VLF ROV observations can effectively be applied for various military purposes (for instance, for delineation of underground tunnels and recognition of some targets shown in the right lower side of Fig. 11) (Eppelbaum, 2016).

7. Self-integration of different VLF frequencies and combination with other geophysical methods

It is known that such factors as the ambiguity of geophysical field examination, the complexity of geological scenarios and the low signal-to-noise ratio affect the possibility to developing reliable physical-geological models of subsurface structure. Presence of several dozens of the VLF transmitters in the world (part of these stations is shown in Table 1) allows to flexibly combine different frequencies, and these investigations can be integrated with other geophysical methods. Optimal variants of integration of VLF investigations with other geophysical methods for land and ROV variants for subsurface studying are shown in Fig. 14. It is necessary to note that employment of various VLF frequencies (they range from 10 to 30 kHz) which are characterized by different maximal depths of investigation δ gives additional possibilities to determine parameters of hidden anomalous body. Employment of VLF-transmitters located in the various regions of the world enables to utilize different azimuths from the emitting VLF stations that can also be used as an additional interpretation procedure.

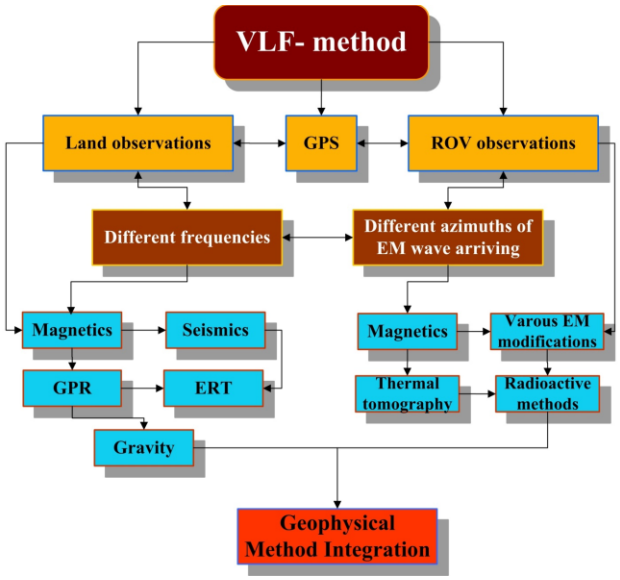


Fig. 14. Scheme of the VLF self-integration and combining with other geophysical methods

Application of the effective methodologies for geophysical method integration by the use of the theory of information and modern wavelet approach are described in detail in Eppelbaum et al. (2011), Alperovich et al. (2013), Eppelbaum (2014a, 2014b), Eppelbaum et al. (2014), Eppelbaum (2019, 2020). For instance, the modern wavelet methodologies include application of such effective procedures as 'matching pursuit combined with the wavelet

packet dictionaries', 'diffusion maps', 'coherence portraits', 'complex Gaussian and Morlet wavelets', 'integrated polarization angle', 'curvelet transform', 'best classifiers' (here only a small part of the available approaches is listed). Employment of the aforementioned methodologies enables to recognize the hidden anomalous targets even under conditions of high ratios of the VLF "*noise*/*anomalous signal*".

Conclusions

It can be concluded that a successive system of the VLF method processing and interpretation has been developed. This system includes following components: removing temporal EM variations, elimination of rugged relief influence and advanced quantitative analysis of VLF anomalies observed under complex physical-environmental conditions (besides traditional parameters determined in magnetic prospecting, an angle of dipping for the anomalous bodies of non-spherical form can also be calculated). The developed system has been effectively approved on the VLF data observed in the Caucasian ore deposits (mainly in the polymetallic and gold-copper deposits of Azerbaijan). VLF investigations can also be applied for localization of archaeological targets and different types of subsurface mapping (example of ring structure delineation is shown in detail). A separate attention is paid to carrying out VLF surveys using the Remote Operative Vehicles. The possibility to utilize the VLF observations as possible precursors of the dangerous geodynamic events at a depth is displayed. Different schemes of the VLF method integration are shortly described.

REFERENCES

Abtahi S., Pedersen L., Kamm J., Kalscheuer T. Extracting geoelectrical maps from vintage very- low-frequency airborne data, tipper inversion, and interpretation: a case study from northern Sweden. Geophysics, Vol. 81, No. 5, 2016, pp. B135-B147.

Alperovich L., Eppelbaum L., Zheludev V., Dumoulin J., Soldovieri F., Proto M., Bavusi M., Loperte A. A new combined wavelet methodology applied to GPR and ERT data in the Montagnole experiment (French Alps). Journal of Geophysics and Engineering, Vol. 10, No. 2, 025017, 2013, pp. 1-17.

Alpin L.M., Dayev D.S., Karinsky A.D. Theory of fields employed in geophysical prospecting. Nedra. Moscow, 1985, 407 p. (in Russian).

Al-Tarazi E., Abu-Rajab J.A., Al-Naqa A., El-Waheidi M. Detecting leachate plumes and groundwater pollution at Ruseifa municipal landfill utilizing VLF-EM method. Jour. of Applied Geophysics, Vol. 65, 2008, pp. 121-131.

Baker H.A., Myers S.O. A topographic correction for VLF-EM profiles based on model studies. Geoexploration, Vol. 18, 1980, pp. 135-144.

Barr R., Llanwyn Jones D., Rodger C.J. ELF and VLF radio waves. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 62, 2000, pp. 1689-1718.

Basokur A.T., Candansayar M.E. Enhancing VLF data for qualitative interpretation: An example of massive chalcopyrite exploration. The Leading Edge, Vol. 22, No. 6, 2003, pp. 568-570.

Bayrak M. Exploration of chrome ore in Southwestern Turkey by VLF-EM. Journal of the Balkan Geophysical Society, Vol. 5, No. 2, 2002, pp. 35-46.

Beamish D. Quantitative 2D VLF data interpretation. Journal of Applied Geophysics, Vol. 45, No. 1, 2000, pp. 33-47.

Bosch F.P. and Müller I. Improved karst exploration by VLF-EM-gradient survey: comparison with other geophysical methods. Near Surface Geophysics, Vol. 3, No. 4, 2005, pp. 299-310.

Bozzo E., Lombardo S., Merlanti F. VLF prospecting: observations about field experiments. Annali di Geofisica, Vol. 37, No. 5, 1994, pp. 1215-1227.

Darnet M., Sailhac P., Marquis G. Geophysical investigation of antique iron furnaces: insights from modelling magnetic and VLF data. Near Surface Geophysics, Vol. 2, 2004, pp. 93-99.

Djeddi M., Baker H.A., Tabbagh A. Interpretation of VLF-EM anomalies of 3D structures by using linear filtering techniques. Annali Di Geofisica, Vol. 41, No. 2, 1998, pp. 151-163.

ЛИТЕРАТУРА

Abtahi S., Pedersen L., Kamm J., Kalscheuer T. Extracting geoelectrical maps from vintage very- low-frequency airborne data, tipper inversion, and interpretation: a case study from northern Sweden. Geophysics, Vol. 81, No. 5, 2016, pp. B135-B147.

Alperovich L., Eppelbaum L., Zheludev V., Dumoulin J., Soldovieri F., Proto M., Bavusi M., Loperte A. A new combined wavelet methodology applied to GPR and ERT data in the Montagnole experiment (French Alps). Journal of Geophysics and Engineering, Vol. 10, No. 2, 025017, 2013, pp. 1-17.

Al-Tarazi E., Abu-Rajab J.A., Al-Naqa A., El-Waheidi M. Detecting leachate plumes and groundwater pollution at Ruseifa municipal landfill utilizing VLF-EM method. Jour. of Applied Geophysics, Vol. 65, 2008, pp. 121-131.

Baker H.A., Myers S.O. A topographic correction for VLF-EM profiles based on model studies. Geoexploration, Vol. 18, 1980, pp. 135-144.

Barr R., Llanwyn Jones D., Rodger C.J. ELF and VLF radio waves. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 62, 2000, pp. 1689-1718.

Basokur A.T., Candansayar M.E. Enhancing VLF data for qualitative interpretation: An example of massive chalcopyrite exploration. The Leading Edge, Vol. 22, No. 6, 2003, pp. 568-570.

Bayrak M. Exploration of chrome ore in Southwestern Turkey by VLF-EM. Journal of the Balkan Geophysical Society, Vol. 5, No. 2, 2002, pp. 35-46.

Beamish D. Quantitative 2D VLF data interpretation. Journal of Applied Geophysics, Vol. 45, No. 1, 2000, pp. 33-47.

Bosch F.P. and Müller I. Improved karst exploration by VLF-EM-gradient survey: comparison with other geophysical methods. Near Surface Geophysics, Vol. 3, No. 4, 2005, pp. 299-310.

Bozzo E., Lombardo S., Merlanti F. VLF prospecting: observations about field experiments. Annali di Geofisica, Vol. 37, No. 5, 1994, pp. 1215-1227.

Darnet M., Sailhac P., Marquis G. Geophysical investigation of antique iron furnaces: insights from modelling magnetic and VLF data. Near Surface Geophysics, Vol. 2, 2004, pp. 93-99.

Djeddi M., Baker H.A., Tabbagh A. Interpretation of VLF-EM anomalies of 3D structures by using linear filtering techniques. Annali Di Geofisica, Vol. 41, No. 2, 1998, pp. 151-163.

Drahor M.G. Integrated geophysical studies in the upper part of Sardis archaeological site, Turkey. Jour. of Applied Geophysics, Vol. 59, No. 3, 2006, pp. 205-223.

Dmitriyev V.I. (Ed.). Computing mathematics and computer methods in exploration geophysics. Geophysicist's manual. Nedra. Moscow, 1982, 222 p. (in Russian).

Dmitriyev V.I., Baryshnikova I.A., Zakharov E.V. Anomalous electromagnetic fields of geological bodies. Nedra. Leningrad, 1977, 168 p. (in Russian).

Drahor M.G. Integrated geophysical studies in the upper part of Sardis archaeological site, Turkey. Jour. of Applied Geophysics, Vol. 59, No. 3, 2006, pp. 205-223.

Drahor M.G., Berge M.A. Geophysical investigations of the Seferihisar geothermal area, Western Anatolia, Turkey. Geothermics, Vol. 35, No. 3, 2006, pp. 302-320.

Eberle D. A method of reducing terrain relief effects from VLF-EM data. Geoexploration, Vol.19, No. 2, 1981, pp. 103-114.

Electrical prospecting instruction. USSR Ministry of Geology. Nedra. Moscow, 1984, 134 p. (in Russian).

Eppelbaum L.V. Examples of terrain corrections in the VLF-method in the Caucasian region, USSR. Geoexploration, Vol. 28, 1991, pp. 67-75.

Eppelbaum L.V. Localization of ring structures in Earth's environments. Jour. of the Archaeological Soc. of the Slovakian Acad. of Sci., Spec. Issue: 'Archaeological. Prospecting', Vol. XLI, 2007a, pp. 145-148.

Eppelbaum L.V. Revealing of subterranean karst using modern analysis of potential and quasi-potential fields. Proceed. of the 2007 SAGEEP Conference, Vol. 20, Denver, USA, 2007b, pp. 797-810.

Eppelbaum L.V. Study of magnetic anomalies over archaeological targets in urban conditions. Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 36, No. 16, 2011, pp. 1318-1330.

Eppelbaum L.V. Four color theorem and applied geophysics. Applied Mathematics, Vol. 5, No. 4, 2014a, pp. 358-366.

Eppelbaum L.V. Estimating informational content in geophysical observations on example of searching economic minerals in Azerbaijan. ANAS Proceedings. The sciences of Earth, Nos. 3-4, 2014b, pp. 31-40.

Eppelbaum L.V. Quantitative interpretation of magnetic anomalies from bodies approximated by thick bed models in complex environments. Environmental Earth Sciences, Vol. 74, No. 7, 2015, pp. 5971-5988.

Eppelbaum L.V. Remote Operated Vehicles geophysical surveys in air, land (underground) and submarine archaeology: General peculiarities of processing and interpretation. Trans. of the 12th EGU Meet., Geophysical Research Abstracts, Vol. 18, EGU2016-10055, Vienna, Austria, 2016, pp. 1-7.

Eppelbaum L.V. Geophysical potential fields: geological and environmental applications. Elsevier. Amsterdam – N.Y., 2019, 465 p.

Eppelbaum L. Theories of probability, information and graphs in applied geophysics. In: (K. Kyamakya, Ed.) Prime archives in applied mathematics, Vide Leaf. 2020, pp. 1-35.

Eppelbaum L.V., Alperovich L., Zheludev V., Pechersky A. Application of informational and wavelet approaches for integrated processing of geophysical data in complex environments. Proceed. of the 2011 SAGEEP Conference, Charleston, South Carolina, USA, Vol. 24, 2011, pp. 24-60.

Eppelbaum L.V. and Finkelstein M.I. Radon emanation, magnetic and VLF temporary variations: removing components not associated with dynamic processes. Collection of Selected Papers of the XXVI General Assembly of the European Seismological Commission (Tel Aviv, Israel), 1998, pp. 122-126.

Eppelbaum L.V., Khesin B.E. VLF-method: elimination of noises and quantitative interpretation. Collection of papers. Regional Symposium on Electromagnetic Compatibility "1992 – From a Unified Region to a Unified World", Section "LF to ULF" Electromagnetics and the Earth, 5.2.1, IEEE Publ., Tel Aviv, 1992, pp. 1-6.

Drahor M.G., Berge M.A. Geophysical investigations of the Seferihisar geothermal area, Western Anatolia, Turkey. Geothermics, Vol. 35, No. 3, 2006, pp. 302-320.

Eberle D. A method of reducing terrain relief effects from VLF-EM data, Geoexploration, Vol. 19, No. 2, 1981, pp. 103-114.

Eppelbaum L.V. Examples of terrain corrections in the VLF-method in the Caucasian region, USSR. Geoexploration, Vol. 28, 1991, pp. 67-75.

Eppelbaum L.V. Localization of ring structures in Earth's environments. Jour. of the Archaeological Soc. of the Slovakian Acad. of Sci., Spec. Issue: 'Archaeological. Prospecting', Vol. XLI, 2007a, pp. 145-148.

Eppelbaum L.V. Revealing of subterranean karst using modern analysis of potential and quasi-potential fields. Proceed. of the 2007 SAGEEP Conference, Vol. 20, Denver, USA, 2007, pp. 797-810.

Eppelbaum L.V. Study of magnetic anomalies over archaeological targets in urban conditions. Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 36, No. 16, 2011, pp. 1318-1330.

Eppelbaum L.V. Four color theorem and applied geophysics. Applied Mathematics, Vol. 5, No. 4, 2014a, pp. 358-366.

Eppelbaum L.V. Estimating informational content in geophysical observations on example of searching economic minerals in Azerbaijan. ANAS Proceedings. The sciences of Earth, Nos. 3-4, 2014b, pp. 31-40.

Eppelbaum L.V. Quantitative interpretation of magnetic anomalies from bodies approximated by thick bed models in complex environments. Environmental Earth Sciences, Vol. 74, No. 7, 2015, pp. 5971-5988.

Eppelbaum L.V. Remote Operated Vehicles geophysical surveys in air, land (underground) and submarine archaeology: General peculiarities of processing and interpretation. Trans. of the 12th EGU Meet., Geophysical Research Abstracts, Vol. 18, EGU2016-10055, Vienna, Austria, 2016, pp. 1-7.

Eppelbaum L.V. Geophysical potential fields: geological and environmental applications. Elsevier, Amsterdam – N.Y., 2019, 465 p.

Eppelbaum L. Theories of probability, information and graphs in applied geophysics. In: (K. Kyamakya, Ed.) Prime archives in applied mathematics, Vide Leaf. 2020, pp. 1-35.

Eppelbaum L.V., Alperovich L., Zheludev V., Pechersky A. Application of informational and wavelet approaches for integrated processing of geophysical data in complex environments. Proceed. of the 2011 SAGEEP Conference, Charleston, South Carolina, USA, Vol. 24, 2011, pp. 24-60.

Eppelbaum L.V. and Finkelstein M.I. Radon emanation, magnetic and VLF temporary variations: removing components not associated with dynamic processes. Collection of Selected Papers of the XXVI General Assembly of the European Seismological Commission (Tel Aviv, Israel), 1998, pp. 122-126.

Eppelbaum L.V., Khesin B.E. VLF-method: elimination of noises and quantitative interpretation. Collection of papers. Regional Symposium on Electromagnetic Compatibility "1992 □ From a Unified Region to a Unified World", Section "LF to ULF" Electromagnetics and the Earth, 5.2.1, IEEE Publ., Tel Aviv, 1992, pp. 1-6.

Eppelbaum L.V., Khesin B.E. Geophysical studies in the Caucasus. Springer. Dordrecht-N.Y., 2012, 411 p.

Eppelbaum L.V., Khesin B.E., Itkis S.E. Prompt magnetic investigations of archaeological remains in areas of infrastructure development: Israeli experience. Archaeological Prospection, Vol. 8, No. 3, 2001, pp. 163-185.

Eppelbaum L.V., Livshits Ya., Flexer A., Ben-Avraham Z. Integrated geological-geophysical analysis of Ring Structures phenomenon in the Eastern Mediterranean. Trans. of the Conf. of Israel Geological Soc., Annual Meet., Mizpe-Ramon, Israel, 1998, p.25.

Eppelbaum L.V., Khesin B.E. Geophysical studies in the Caucasus. Springer. Dordrecht-N.Y., 2012, 411 p.

Eppelbaum L.V., Khesin B.E., Itkis S.E. Prompt magnetic investigations of archaeological remains in areas of infrastructure development: Israeli experience. Archaeological Prospection, Vol. 8, No. 3, 2001, pp. 163-185.

Eppelbaum L.V., Livshits Ya., Flexer A., Ben-Avraham Z. Integrated geological-geophysical analysis of Ring Structures phenomenon in the Eastern Mediterranean. Trans. of the Conf. of Israel Geological Soc., Annual Meet., Mizpe-Ramon, Israel, 1998, p.25.

Eppelbaum L.V., Mishne L.R. Some theoretical aspects of optimal filtration of geophysical signals with dependent noises. Deposited in VINITI, USSR Academy of Sciences, No. 6034-B88, 1988, pp. 1-10 (in Russian).

Eppelbaum L.V., Mishne A.R. Unmanned airborne magnetic and VLF investigations: effective geophysical methodology of the near future. Positioning, Vol. 2, No. 3, 2011, pp. 112- 133.

Eppelbaum L.V., Zheludev V., Averbuch A. Diffusion maps as a powerful tool for integrated geophysical field analysis to detecting hidden karst terranes. ANAS Proceedings. The sciences of Earth, Nos. 1-2, 2014, pp. 36-46.

Fischer G., Le Quang B.V., Muller L. VLF ground surveys, a powerful tool for the study of shallow two-dimensional structures. Geophysical Prospecting, Vol. 31, 1983, pp. 977-991.

Fraser D.C. Contouring of VLF-EM data. Geophysics, Vol. 34, No. 6, 1969, pp. 958-967.

Ginzburg S.N. VLF-method for searching and prospecting of pyrite-polymetallic deposits. Prospecting and protection of mineral resources, No. 9, 1982, pp. 39-44 (in Russian).

Ginzburg S. et al. Underground geophysical investigations in ore deposits of Belokan-Zakatala ore field. Unpublished Report of TzNIGRI (Central Research Inst. of Geol. Prospecting for Base and Precious Metals), The funds of TzNIGRI, Moscow, 1981, 238 p. (in Russian).

Gokhberg M.B., Gufeld I.L., Rozhnoy A.A., Marenko V F., Yampolsky V.S., Ponomarev E.A. Study of seismic influence on the ionosphere by super long wave probing of the Earth-ionosphere waveguide. Physics of Earth and Planet. Inter., Vol. 57, 1989, pp. 64-67.

Gordeyev S.G. On the problem of relief influence in the VLF-method. Proceed. of TSNIGRI, Vol. 89, 1970, pp. 188-195 (in Russian).

Gordeyev S.G. Method of accounting for the relief influence on magnetic fields of remote transmitters. Proceed. of TsNIGRI, Vol. 179, 1983, pp. 56-60 (in Russian).

Gordeyev S.G., Sedelnikov E.S. On the interpretation of the VLF method results on the basis of the conductive bed modeling. Proceedings of TSNIGRI, Vol. 116, 1974, pp. 88-99 (in Russian).

Gordeyev S.G., Sedelnikov E.S., Tarkhov A.G. Electric prospecting by the radio comparing and bearing method (VLF). Nedra. Moscow, 1981, 132 p. (in Russian).

Guerin R., Benderitter Y. Shallow karst exploration using MT-VLF and DC resistivity methods. Geophysical Prospecting, Vol. 43, No. 5, 1995, pp. 635-653.

Gürer A., Bayrak M., Gürer O.F. A VLF survey using current gathering phenomena for tracing buried faults of Fethiye–Burdur Fault Zone, Turkey. Journal of Applied Geophysics, Vol. 68, No. 3, 2009, pp. 437-447.

Hamdan H., Kritikakis G., Andronikidis N., Economou N., Manoutsoglou M., Vafidis A. Integrated geophysical methods for imaging saline karst aquifers. A case study of Stylos, Chania, Greece. Jour. of the Balkan Geophysical Soc., Vol. 13, No. 1, 2010, pp. 1-8.

Hänl H., Maue A.W., Westpfahl K. Theory of diffraction. Springer-Verlag. Berlin, 1961, 218 p. (in German).

Eppelbaum L.V., Mishne A.R. Unmanned airborne magnetic and VLF investigations: effective geophysical methodology of the near future. Positioning, Vol. 2, No. 3, 2011, pp. 112- 133.

Eppelbaum L.V., Zheludev V., Averbuch A. Diffusion maps as a powerful tool for integrated geophysical field analysis to detecting hidden karst terranes. ANAS Proceedings. The sciences of Earth, Nos. 1-2, 2014, pp. 36-46.

Fischer G., Le Quang B.V., Muller L. VLF ground surveys, a powerful tool for the study of shallow two-dimensional structures. Geophysical Prospecting, Vol. 31, 1983, pp. 977-991.

Fraser D.C. Contouring of VLF-EM data. Geophysics, Vol. 34, No. 6, 1969, pp. 958-967.

Gokhberg M.B., Gufeld I.L., Rozhnoy A.A., Marenko V F., Yampolsky V.S., Ponomarev E.A. Study of seismic influence on the ionosphere by super long wave probing of the Earth-ionosphere waveguide. Physics of Earth and Planet. Inter., Vol. 57, 1989, pp. 64-67.

Guerin R., Benderitter Y. Shallow karst exploration using MT-VLF and DC resistivity methods. Geophysical Prospecting, Vol. 43, No. 5, 1995, pp. 635-653.

Gürer A., Bayrak M., Gürer O.F. A VLF survey using current gathering phenomena for tracing buried faults of Fethiye–Burdur Fault Zone, Turkey. Journal of Applied Geophysics, Vol. 68, No. 3, 2009, pp. 437-447.

Hamdan H., Kritikakis G., Andronikidis N., Economou N., Manoutsoglou M., Vafidis A. Integrated geophysical methods for imaging saline karst aquifers. A case study of Stylos, Chania, Greece. Jour. of the Balkan Geophysical Soc., Vol. 13, No. 1, 2010, pp. 1-8.

Harrison R.G., Aplin K.L., Rycroft M.J. Atmospheric electricity coupling between earthquake regions and the ionosphere. Jour. Atmos. Sol. Terrest. Phys., Vol. 72, No. 5-6, 2010, pp. 376-381.

Hayakawa M., Kasahara Y., Nakamura T., Muto F., Horie T., Maekawa S., Hobara Y., Rozhnoi A.A., Solovieva M., Molchanov O.A. A statistical study on the correlation between lower ionospheric perturbations as seen by subionospheric VLF/LF propagation and earthquakes. Jour. Of Geophys. Research, Vol. 115, A9, 2010, pp. 1-9.

Ishimaru A. Electromagnetic wave propagation, radiation, and scattering: from fundamentals to applications. 2nd Ed. Wiley. USA, 2017, 940 p.

Jeng Y., Lin M.J., Chen C.S., Wang Y.H. Noise reduction and data recovery for a VLF-EM survey using a nonlinear decomposition method. Geophysics, Vol. 72, No. 5, 2007, pp. F223-F235.

Kachakhidze N., Kachakhidze M., Kereselidze Z., Ramishvili G. Specific variations of the atmospheric electric field potential gradient as a possible precursor of Caucasus earthquakes. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., Vol. 9, 2009, pp. 1221-1226.

Kaikkonen P., Sharma S.P. A comparison of performances of linearized and global nonlinear 2-D inversion of VLF and VLF-R electromagnetic data. Geophysics, Vol. 66, No. 2, 2001, pp. 462-475.

Karous M. Effect of relief in EM-data methods with very distant source. Geoexploration, Vol. 17, 1979, pp. 33-42.

Karous M., Hjelt S.E. Determination of apparent current density from VLF measurements. Dept. of Geophys., University of Gulu, No. 89, 1979, 1-9 p.

Karous M., Hjelt S.E. Linear filtering of VLF dip-angle measurements. Geophysical Prospecting, Vol. 31, No. 5, 1983, pp. 782-794.

Kaufman A.A., Keller G.V. The magnetotelluric method. Elsevier. Amsterdam, 1981, 596 p.

Khalil M.A., Abbas A.M., Santos F.A.M., Mesbah H.S.A., Massoud U. VLF-EM study for archaeological investigation of the labyrinth mortuary temple complex at Hawara area, Egypt. Near Surface Geophysics, Vol. 8, 2010, pp. 203-212.

Harrison R.G., Aplin K.L., Rycroft M.J. Atmospheric electricity coupling between earthquake regions and the ionosphere. Jour. Atmos. Sol. Terrest. Phys., Vol. 72, No. 5-6, 2010, pp. 376-381.

Hayakawa M., Kasahara Y., Nakamura T., Muto F., Horie T., Maekawa S., Hobara Y., Rozhnoi A.A., Solovieva M., Molchanov O.A. A statistical study on the correlation between lower ionospheric perturbations as seen by subionospheric VLF/LF propagation and earthquakes. Jour. of Geophys. Research, Vol. 115, A9, 2010, pp. 1-9.

Ishimaru A. Electromagnetic wave propagation, radiation, and scattering: from fundamentals to applications. 2nd Ed. Wiley. USA, 2017, 940 p.

Jeng Y., Lin M.J., Chen C.S., Wang Y.H. Noise reduction and data recovery for a VLF-EM survey using a nonlinear decomposition method. Geophysics, Vol. 72, No. 5, 2007, pp. F223-F235.

Kachakhidze N., Kachakhidze M., Kereselidze Z., Ramishvili G. Specific variations of the atmospheric electric field potential gradient as a possible precursor of Caucasus earthquakes. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., Vol. 9, 2009, pp. 1221-1226.

Kaikkonen P., Sharma S.P. A comparison of performances of linearized and global nonlinear 2-D inversion of VLF and VLF-R electromagnetic data. Geophysics, Vol. 66, No. 2, 2001, pp. 462-475.

Karous M. Effect of relief in EM-data methods with very distant source. Geoexploration, Vol. 17, 1979, pp. 33-42.

Karous M., Hjelt S.E. Determination of apparent current density from VLF measurements. Dept. of Geophys., University of Gulu, No. 89, 1979, 1-9 p.

Karous M., Hjelt S.E. Linear filtering of VLF dip-angle measurements. Geophysical Prospecting, Vol. 31, No. 5, 1983, pp. 782-794.

Kaufman A.A., Keller G.V. The magnetotelluric method. Elsevier. Amsterdam, 1981, 596 p.

Khain V.E. Main problems of the modern geology. Nauka. Moscow, 1995, 348 p. (in Russian).

Khalil M.A., Abbas A.M., Santos F.A.M., Mesbah H.S.A., Massoud U. VLF-EM study for archaeological investigation of the labyrinth mortuary temple complex at Hawara area, Egypt. Near Surface Geophysics, Vol. 8, 2010, pp. 203-212.

Khesin B.E., Alexeyev V.V., Eppelbaum L.V. Interpretation of geophysical fields in complicated environments. Kluwer Academic Publisher (Springer). Ser.: Advanced Approaches in Geophysics, Dordrecht - London – Boston, 1996, 368 p.

Kushida Y., Kushida R. Possibility of earthquake forecast by radio observations in the VHF band. Jour. of Atmos. Elect., Vol. 22, 2002, pp. 239-255.

Landau L.D., Lifshitz E.M., Pitaevskii L.P. Electrodynamics of Continuous Media. Pergamon Press. Oxford, 1984, 460 p.

Liu H., Liu J., Yu C., Ye J., Zeng Q. Integrated geological and geophysical exploration for concealed ores beneath cover in the Chaihulanzi goldfield, northern China. Geophysical Prospecting, Vol. 54, No. 5, 2006, pp. 605-621.

McNeill J.D., Labson V.F. Geological mapping using VLF radio fields. In: (Nabighian, M.C., Ed.) Geotechnical and Environmental Geophysics, Review and Tutorial. Vol. 1. Society of Exploration, Tulsa, 1991, pp. 191-218.

Michael A.J. Testing prediction methods: Earthquake clustering versus the Poisson model. Geophysical Research Lett., Vol. 24, No. 15, 1997, pp. 1891-1894.

Miecznik S. Conducting cylinder in the field of a plane electromagnetic wave. Techn. Poszuk. Geol., 25, No. 3, 1986, 16-22 (in Polish).

Mohanty W.K., Mandal A., Sharma S.P., Gupta S., Misra S. Integrated geological and geophysical studies for delineation of chromite deposits: a case study from Tangarparha, Orissa, India Chromite exploration at Tangarparha. Geophysics, Vol. 76, No. 5, 2011, pp. B173-B185.

Khesin B.E., Alexeyev V.V., Eppelbaum L.V. Interpretation of geophysical fields in complicated environments. Kluwer Academic Publisher (Springer). Ser.: Advanced Approaches in Geophysics, Dordrecht - London – Boston, 1996, 368 p.

Kushida Y., Kushida R. Possibility of earthquake forecast by radio observations in the VHF band. Jour. of Atmos. Elect., Vol. 22, 2002, pp. 239-255.

Landau L.D., Lifshitz E.M. Electrodynamics of continuous media. Pergamon Press. Oxford, 1984, 460 p.

Liu H., Liu J., Yu C., Ye J., Zeng Q. Integrated geological and geophysical exploration for concealed ores beneath cover in the Chaihulanzi goldfield, northern China. Geophysical Prospecting, Vol. 54, No. 5, 2006, pp. 605-621.

McNeill J.D., Labson V.F. Geological mapping using VLF radio fields. In: (Nabighian, M.C., Ed.) Geotechnical and Environmental Geophysics, Review and Tutorial. Vol. 1. Society of Exploration, Tulsa, 1991, pp. 191-218.

Michael A.J. Testing prediction methods: Earthquake clustering versus the Poisson model. Geophysical Research Lett., Vol. 24, No. 15, 1997, pp. 1891-1894.

Mohanty W.K., Mandal A., Sharma S.P., Gupta S., Misra S. Integrated geological and geophysical studies for delineation of chromite deposits: a case study from Tangarparha, Orissa, India Chromite exploration at Tangarparha. Geophysics, Vol. 76, No. 5, 2011, pp. B173-B185.

Moriya T., Mogi T., Takada M. Anomalous pre-seismic transmission of VHF-band radio waves resulting from large earthquakes, and its statistical relationship to magnitude of impending earthquakes. Geophysical Jour. Intern., Vol. 180, 2010, pp. 858-870.

Ogilvy R.D., Cuadra A., Jackson P.D., Monte J.L. Detection of an air-filled drainage gallery by the VLF resistivity method. Geophysical Prospecting, Vol. 39, No. 6, 1991, pp. 845-859.

Olsson O. VLF-Anomalies from a perfectly conducting half-plane below an overburden. Geophysical Prospecting, 28, No. 3, 1980, pp. 415-434.

Olsson O. Computation of VLF response over half-plane and wedge models. Geophysical Prospecting, Vol. 31, No. 1, 1983, pp. 171-191.

Oskooi B., Pedersen L.B. Resolution of airborne VLF data. Jour. of Applied Geophysics, Vol.58, No. 2, 2006, pp. 158-175.

Pazzi V., Tapete D., Cappuccini L., Fanti R. An electric and electromagnetic geophysical approach for subsurface investigation of anthropogenic mounds in an urban environment. Geomorphology, Vol. 273, 2016, pp. 335-347.

Pedersen L.B., Oskooi B. Airborne VLF measurements and variations of ground conductivity. Surveys in Geophysics, Vol. 25, 2004, pp. 151-181.

Pierce E.T. Atmospheric electricity and earthquake prediction. Geophysical Research Lett., Vol.3, No. 3, 1976, pp. 185-188.

Pinel N., Boulier C. Electromagnetic wave scattering from random rough surfaces: asymptotic models. Wiley. USA, 2013, 265 p.

Poddar M. Very low-frequency electromagnetic response of a perfectly conducting half-plane in a layered half-space. Geophysics, Vol. 47, 1982, pp. 1059-1067.

Poikonen A., Suppala I. On modeling airborne very low-frequency measurements. Geophysics, Vol. 54, No. 12, 1989, pp. 1596-1606.

Pulinets S. and Boyarchuk K. Ionospheric precursors of earthquakes. Springer. Berlin – Heidelberg, 2004, 315 p.

Rajab J.A. Mapping the near-surface geoelectrical structure of the Mottled Zone using the very low frequency–electromagnetic method. Jour. of Applied Geophysics, Vol. 184 (104240), 2021, pp. 1-12.

Rozhnoi A., Solovieva M., Hayakawa M. VLF/LF signals method for searching of electromagnetic earthquake pre-

Moriya T., Mogi T., Takada M. Anomalous pre-seismic transmission of VHF-band radio waves resulting from large earthquakes, and its statistical relationship to magnitude of impending earthquakes. Geophysical Jour. Intern., Vol. 180, 2010, pp. 858-870.

Ogilvy R.D., Cuadra A., Jackson P.D., Monte J.L. Detection of an air-filled drainage gallery by the VLF resistivity method. Geophysical Prospecting, Vol. 39, No. 6, 1991, pp. 845-859.

Olsson O. VLF-Anomalies from a perfectly conducting half-plane below an overburden. Geophysical Prospecting, 28, No. 3, 1980, pp. 415-434.

Olsson O. Computation of VLF response over half-plane and wedge models. Geophysical Prospecting, Vol. 31, No. 1, 1983, pp. 171-191.

Oskooi B., Pedersen L.B. Resolution of airborne VLF data. Jour. of Applied Geophysics, Vol. 58, No. 2, 2006, pp. 158-175.

Pazzi V., Tapete D., Cappuccini L., Fanti R. An electric and electromagnetic geophysical approach for subsurface investigation of anthropogenic mounds in an urban environment. Geomorphology, Vol. 273, 2016, pp. 335-347.

Pedersen L.B., Oskooi B. Airborne VLF measurements and variations of ground conductivity. Surveys in Geophysics, Vol. 25, 2004, pp. 151-181.

Pierce E.T. Atmospheric electricity and earthquake prediction. Geophysical Research Lett., Vol. 3, No. 3, 1976, pp. 185-188.

Pinel N., Boulier C. Electromagnetic wave scattering from random rough surfaces: asymptotic models. Wiley. USA, 2013, 265 p.

Poddar M. Very low-frequency electromagnetic response of a perfectly conducting half-plane in a layered half-space. Geophysics, Vol. 47, 1982, pp. 1059-1067.

Poikonen A., Suppala I. On modeling airborne very low-frequency measurements. Geophysics, Vol. 54, No. 12, 1989, pp. 1596-1606.

Pulinets S. and Boyarchuk K. Ionospheric precursors of earthquakes. Springer. Berlin – Heidelberg, 2004, 315 p.

Rajab J.A. Mapping the near-surface geoelectrical structure of the Mottled Zone using the very low frequency–electromagnetic method. Jour. of Applied Geophysics, Vol. 184 (104240), 2021, pp. 1-12.

Rozhnoi A., Solovieva M., Hayakawa M. VLF/LF signals method for searching of electromagnetic earthquake precursors. In: (M. Hayakawa, Ed.) Earthquake Prediction Studies: Seismo Electromagnetics, TERRAPUB. Tokyo, 2013, pp. 31-48.

Sandrin A., Elming S.A. Geophysical and petrophysical study of an iron oxide copper gold deposit in northern Sweden. Ore Geology Reviews, Vol. 29, No. 1, 2006, pp. 1-18.

Santos F.A.M., Mateus A., Figueiras J., Goncalves M.A. Mapping groundwater contamination around a landfill facility using the VLF-EM method – A case study. Journal of Applied Geophysics, Vol. 60, No. 2, 2006, pp. 115-125.

Sedelnikov E.S. The effect of topography on the field of a distant source of alternating electromagnetic field. Izvestiya of the USSR Acad. of Sci., Ser: Physics of the Solid Earth, No.7, 1983, pp. 102-106 (in Russian).

Sharma S.P., Kaikkonen P. Two-dimensional non-linear inversion of VLF-R data using simulated annealing. Geophysical Journal Inter., Vol. 133, No. 3, 1998, pp. 649-668.

Sharma S.P., Biswas A., Baranwal V.C. Very low-frequency electromagnetic method: a shallow subsurface investigation technique for geophysical applications. In: (Sengupta D., Ed.) Recent trends in modelling of environmental contaminants", Springer. 2014, 119-141.

Shendi E.-A., Aziz A., Mamoun K., Gamal M. The effectiveness of the very low frequency electromagnetic method (VLF‑EM) in the exploration of sulphide mineralization in arid environments, case study from South Sinai Peninsula, Egypt. Environmental Earth Sciences, Vol. 76, No. 22, 2017, pp. 1-11.

cursors. In: (M. Hayakawa, Ed.) Earthquake Prediction Studies: Seismo Electromagnetics, TERRAPUB. Tokyo, 2013, pp. 31-48.

Sandrin A., Elming S.A. Geophysical and petrophysical study of an iron oxide copper gold deposit in northern Sweden. Ore Geology Reviews, Vol. 29, No. 1, 2006, pp. 1-18.

Santos F.A.M., Mateus A., Figueiras J., Goncalves M.A. Mapping groundwater contamination around a landfill facility using the VLF-EM method – A case study. Journal of Applied Geophysics, Vol. 60, No. 2, 2006, pp. 115-125.

Sharma S.P., Kaikkonen P. Two-dimensional non-linear inversion of VLF-R data using simulated annealing. Geophysical Journal Inter., Vol. 133, No. 3, 1998, pp. 649-668.

Sharma S.P., Biswas A., Baranwal V.C. Very low-frequency electromagnetic method: a shallow subsurface investigation technique for geophysical applications. In: (Sengupta D., Ed.) Recent trends in modelling of environmental contaminants", Springer. 2014, 119-141.

Shendi E.-A., Aziz A., Mamoun K., Gamal M. The effectiveness of the very low frequency electromagnetic method (VLF‑EM) in the exploration of sulphide mineralization in arid environments, case study from South Sinai Peninsula, Egypt. Environmental Earth Sciences, Vol. 76, No. 22, 2017, pp. 1-11.

Singh A., Maurya S.K., Sharma, S.P. Forward modeling and inversion of very low frequency electromagnetic data over rugged topography using 2d triangular elements. In: (Biswas, A. and Sharma, S.P., Eds.) Advances in modeling and interpretation in near surface geophysics, 2020, pp. 97-120.

Singh A., Sharma S.P. Interpretation of very low frequency electromagnetic measurements in terms of normalized current density over variable topography. Jour. of Applied Geophysics, Vol. 133, 2016, pp. 82-91.

Sinha A.K. Recent developments in quantitative interpretation of VLF-EM data. In: (Eds. Roy K.K. et al.) Deep electromagnetic exploration, Narosa Publ. House. New Delhi, India, 1998, pp. 599-606.

Simon F.-X., Tabbagh A., Donati J.S., Sarris A. Permittivity mapping in the VLF–LF range using a multi-frequency EMI device: first tests in archaeological prospection. Near Surface Geophysics, Vol. 17, No. 1, 2019, pp. 27-41.

Smirnov S. Negative anomalies of the Earth's electric field as earthquake precursors. Geosciences, Vol. 10, No. 10, 2019, pp. 1-7.

Tawfik M., Farag K.S., Ibraheem M. The efficiency of (VLF-EM) method in detecting buried old tunnels in the Egyptian Nile Delta. Trans. Of the 73rd EAGE Conf. & Exhib., Vienna, Austria, SP04, 2011, pp. 1-3.

Tesmull F.A., Crossley D.I. Inversion of VLF-data for simple lateral inhomogeneties. Geological Survey of Canada, No. 81-15, 1981, pp. 79-86.

Timur E. Magnetic susceptibility and VLF-R investigations for determining geothermal blowout contaminated area: a case study from Alaşehir (Manisa/Turkey). Environmental Earth Sciences, Vol. 72, 2014, pp. 2497-2510.

Xu L.-B. Application of the very low frequency (VLF) electromagnetic method in the Zhuyuan copper deposit, Henan Province. Chinese Geology, Vol. 28, No. 11, 2001, pp. 25-28 (in Chinese with English abstract).

Villee M.A., Chouteau M., Palacky G.J. Effect of temporal and spatial variations of the primary signal on VLF total-field surveys. Geophysics, Vol. 57, No.1, 1992, pp. 97-105.

Wait J.R. Introduction to the theory of VLF propagation. Proceedings of the Inst. Of Radio Engineers (IEEE), Vol. 50, 1962, pp. 1624-1647.

Zhdanov M.S. Integral transforms in geophysics. Springer. Berlin – Heidelberg, 1988.

Singh A., Maurya S.K., Sharma, S.P. Forward modeling and inversion of very low frequency electromagnetic data over rugged topography using 2d triangular elements. In: (Biswas, A. and Sharma, S.P., Eds.) Advances in modeling and interpretation in near surface geophysics, 2020, pp. 97-120.

Singh A., Sharma S.P. Interpretation of very low frequency electromagnetic measurements in terms of normalized current density over variable topography. Jour. of Applied Geophysics, Vol. 133, 2016, pp. 82-91.

Sinha A.K. Recent developments in quantitative interpretation of VLF-EM data. In: (Eds. Roy K.K. et al.) Deep electromagnetic exploration, Narosa Publ. House. New Delhi, India, 1998, pp. 599-606.

Simon F.-X., Tabbagh A., Donati J.S., Sarris A. Permittivity mapping in the VLF–LF range using a multi-frequency EMI device: first tests in archaeological prospection. Near Surface Geophysics, Vol. 17, No. 1, 2019, pp. 27-41.

Smirnov S. Negative anomalies of the Earth's electric field as earthquake precursors. Geosciences, Vol. 10, No. 10, 2019, pp. 1-7.

Tarkhov A.G. Principles of geophysical prospecting by radio comparing and bearing method (VLF). Gosgeoltekhizdat. Leningrad, 1961, 216 p. (in Russian).

Tawfik M., Farag K.S., Ibraheem M. The efficiency of (VLF-EM) method in detecting buried old tunnels in the Egyptian Nile Delta. Trans. Of the 73rd EAGE Conf. & Exhib., Vienna, Austria, SP04, 2011, pp. 1-3.

Tesmull F.A., Crossley D.I. Inversion of VLF-data for simple lateral inhomogeneties. Geological Survey of Canada, No. 81-15, 1981, pp. 79-86.

Timur E. Magnetic susceptibility and VLF-R investigations for determining geothermal blowout contaminated area: a case study from Alaşehir (Manisa/Turkey). Environmental Earth Sciences, Vol. 72, 2014, pp. 2497-2510.

Xu L.-B. Application of the very low frequency (VLF) electromagnetic method in the Zhuyuan copper deposit, Henan Province. Chinese Geology, Vol. 28, No. 11, 2001, pp. 25-28 (in Chinese with English abstract).

Villee M.A., Chouteau M., Palacky G.J. Effect of temporal and spatial variations of the primary signal on VLF total-field surveys. Geophysics, Vol. 57, No.1, 1992, pp. 97-105.

Wait J.R. Introduction to the theory of VLF propagation. Proceedings of the Inst. Of Radio Engineers (IEEE), Vol. 50, 1962, pp. 1624-1647.

Zaborovsky A.I. Electric prospecting. Gostoptekhizdat. Moscow, 1963, 423 p. (in Russian).

Zakharov E.V., Pimenov Y.V. Numerical analysis of radiowave diffraction. Radio and Communication. Moscow, 1982, 184 p. (in Russian).

Zhdanov M.S. Integral transforms in geophysics. Springer. Berlin – Heidelberg, 1988.

Zhdanov M.S. The analogues of the Cauchy type integral for the theory of geophysical fields. Nauka. Moscow, 1984, 328 p. (in Russian).

Zhdanov M.S., Keller G.V. The geoelectrical methods in geophysical exploration, Elsevier. Amsterdam, 1994, 873 p.

Zlotnicki J., Vargemezis G., Mille A., Bruère F., Hammouya G. State of the hydrothermal activity of Soufriere of Guadeloupe volcano inferred by VLF surveys. Jour. of Applied Geophysics, 2006, Vol. 58, No. 4, pp. 265-279.

Zhdanov M.S., Keller G.V. The geoelectrical methods in geophysical exploration, Elsevier. Amsterdam, 1994, 873 p.

Zlotnicki J., Vargemezis G., Mille A., Bruère F., Hammouya G. State of the hydrothermal activity of Soufriere of Guadeloupe volcano inferred by VLF surveys. Jour. Of Applied Geophysics, 2006, Vol. 58, No. 4, pp. 265-279.

Hänl H., Maue A.W., Westpfahl K. Theorie der beugung. Springer-Verlag. Berlin, 1961, 218 p.

Miecznik S. Ciala Cylindryezne w Polo Plaskey Fali Electromagnetycznei. Techn. Poszuk. Geol., 25, No. 3, 1986, 16-22.

Альпин Л.М., Даев Д.С., Каринский А.Д. Теория полей, применяемых в разведочной геофизике. Недра. Москва, 1985, 407 с.

Гинзбург С.Н. Метод СДВР для поисков и разведки колчеданно-полиметаллических месторождений. Разведка и охрана недр, No. 9, 1982, с. 39-44.

Гинзбург С. и др. Подземные геофизические исследования на рудных месторождениях Белокан-Закатальского рудного поля. Отчет ЦНИГРИ (Центральный Научно-Исслед. Ин-т Цветных и Благородных Металлов). Фонды ЦНИГРИ. Москва, 1981, 238 с.

Гордеев С.Г. К вопросу о влиянии рельефа местности в методе радиокип при измерении поля СДВ. Труды ЦНИГРИ, вып. 89, 1970, с. 188-195.

Гордеев С.Г. Способ учета влияния рельефа на магнитное поле удаленной радиостанции. Труды ЦНИГРИ, вып. 179, 1983, с 56-60.

Гордеев С.Г., Седельников Е.С. К вопросу интерпретации результатов метода СДВР на основе моделирования проводящих пластов. Труды ЦНИГРИ, вып. 116, 1974, с. 88-99.

Гордеев С.Г., Седельников Е.С., Тархов А.Г. Электроразведка методом радиокип. Недра. Москва, 1981, 132 с.

Дмитриев В.И. (ред.). Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике. Справочник геофизика. Недра. Москва, 1982, 222 с.

Дмитриев В.И., Барышникова И.А., Захаров Е.В. Аномальные электромагнитные поля пластовых тел. Недра. Ленинград, 1977, 168 р.

Жданов М.С. Аналоги интеграла типа Коши в теории геофизических полей. Наука. Москва, 1984, 328 с.

Заборовский А.И. Электроразведка. Гостоптехиздат. Москва, 1963, 423 с.

Захаров Е.В., Пименов Ю.В. Численный анализ дифракции радиоволн. Радио и Связь. Москва, 1982, 184 с.

Инструкция по электроразведке. Министерство Геологии СССР. Недра. Москва, 1984, 134 с.

Седельников Е.С. Влияние рельефа на поле удаленного источника переменного электромагнитного поля. Известия АН СССР, Сер: Физика твердой земли, No. 7, 1983, с. 102-106.

Тархов А.Г. Основы геофизической разведки методом радиокип. Госгеолтехиздат, Ленинград. 1961, 216 с.

Хаин В.Е. Основные проблемы современной геологии. Недра. Москва, 1995, 348 с.

Эппельбаум Л.В., Мишне Л.Р. Некоторые теоретические аспекты оптимальной фильтрации геофизических сигналов с зависимыми помехами. Депонировано в ВИНИТИ, Акад. Наук СССР, № 6034-В88, 1988, 10 с.

МЕТОД СДВР: УЛУЧШЕННАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ (ОПРОБОВАНИЕ НА РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ КАВКАЗА)

Эппельбаум Л.В.[1,2]
[1]*Кафедра наук о Земле, Факультет точных наук, Тель-Авивский университет*
Рамат-Авив 6997801, Тель-Авив, Израиль
[2]*Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности,*
AZ1010, Баку, Азербайджан, просп. Азадлыг, 20

Резюме. Исследование электромагнитных (ЭМ) полей удаленных военных передатчиков сверхнизкочастотного (СНЧ) диапазона является одним из самых мобильных и недорогих геофизических методов. В настоящее время этот метод находит применение при поисках различных месторождений, разведке приповерхностных подземных вод, археологических исследованиях и геологическом картировании. Для геофизических исследований может быть использовано несколько десятков СНЧ-передатчиков, находящихся в разных регионах мира. Различные частоты и углы прихода регистрируемого ЭМ-излучения позволяют получить дополнительные преимущества при интерпретации. При исследовании методом СДВР (в западных публикациях используется аббревиатура VLF) используются как электрическая, так и магнитная составляющие ЭМ поля. Обычно предпочтение отдается магнитной компоненте ЭМ поля (*H*). Широкое использование метода СДВР ограничивалось отсутствием надежных методов устранения временных вариаций ЭМ поля, влияния сильнопересеченного рельефа и процедур количественной интерпретации СДВР-аномалий. Эти проблемы были успешно решены и объединены в единую методическую систему. Для исключения влияния вариаций во времени была разработана специальная фильтрационная процедура. Корреляционный метод позволяет кардинально снизить влияние пересеченного рельефа местности. Для количественной интерпретации аномалий СДВР доказана возможность использования современных методов, разработанных в магниторазведке для сложных геолого-геофизических условий. Наконец, для выявления скрытых объектов на фоне интенсивных геологических помех было предложено использование оригинальных статистических, информационных и вейвлет-алгоритмов. Главные компоненты разработанной интерпретационной системы были успешно применены на полиметаллических и медных месторождениях Кавказа.

Ключевые слова*: СДВ-передатчики, устранение временных вариаций, устранение влияния пересеченного рельефа, улучшенная количественная интерпретация, рудные месторождения, геолого-геофизическое картирование, предвестники землетрясений*

FUDR METODU: İŞLƏNİLMƏ VƏ İNTERPRETASİYANIN TƏKMİLLƏŞDİRİLMİŞ SİSTEMİ (QAFQAZIN FİLİZ YATAQLARINDA SINAQLANDIRMA)

Eppelbaum L.V.[1,2]
[1]*Təl-Əviv Universiteti, Dəqiq elmlər fakültəsi, Təl-Əviv, İsrail*
Ramat-Əviv 6997801, Təl-Əviv, İsrail
[2]*Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti*
AZ 1010, Bakı, Azərbaycan, Azadlıq prosp., 20

Xülasə. İfrat aşağı tezlik (İAT) diapazonuna malik uzaqlaşdırılmış hərbi otürücü sahələrinin elektromaqnit (EM) tədqiqi ən mobil və ucuz geofiziki üsullardan biridir. Hazırda bu üsul müxtəlif yataqların axtarışında, səthəyaxın yeraltı suların kəşfiyyatında, arxeoloji tədqiqatlarda və geoloji xəritələnmədə tətbiqini tapmışdır. Geofiziki tətqiqatlar üçün dünyanın müxtəlif regionlarında yerləşmiş onlarla İAT - ötürücülərdən istifadə oluna bilər. Müxtəlif tezliklər və qeyd olunan EM – şüalanmanın gəlmə bucağı təfsirdə əlavə üstünlük əldə etməyə imkan verir. FUDR (Qərb nəşrlərində VLF abbreviaturasından istifadə olunur) üsulu ilə tədqiqatda EM sahəsinin həm elektrik, həm də maqnit tərtibçilərindən istifadə olunur

Adətən EM sahəsinin maqnit komponentinə (H) üstünlük verilir. FUDR üsulunun geniş istifadəsi EM sahəsinin müvəqqəti variasiyalarının aradan qaldırılmasının etibarlı üsulların olmaması, relyefin kəskin dərə-təpəliyinin təsiri və FUDR anomaliyaların miqdari təfsirinin proseduru ilə məhdudlaşmışdır. Bu problemlər uğurla həll edilmiş və vahid metodik sistemdə birləşdirilmişdir. Zamanda variasiyaların təsirini istisna etmək üçün xüsusı filtrasiya proseduru hazırlanmışdır. Korrelyasiya üsulu ərazinin dərə-təpəliyinin təsirini əsaslı azaltmağa imkan verir. FUDR anomaliyalarının miqdari təfsiri üçün mürəkkəb geoloji-geofiziki şəraitlərdə maqnit kəşfiyyatında hazirlanmış müasir üsullardan istifadənin mümkünlüyü sübut edilmişdir. Nəhayət, intensiv geoloji əngəllər fonunda gizlin obyektlərin aşkar olunması üçün orijinal statistik, informasion və veyvlet-alqoritmlərdən istifadə edilməsi təklif edilmişdir. Hazirlanmış interpretasiya sisteminin əsas komponentləri Qafqazın polimetal və mis yataqlarında müvəffəqiyyətlə tətbiq edilmişdir.

Açar sözlər**:** *FUD-ötürücülər, müvəqqəti variasiyaların aradan qaldırılması, dağ-təpəli relyefin təsirinin qaldırılması, təkmilləşdirilmiş miqdari təfsir, filiz yataqları, geoloji-geofiziki xəritələnmə, zəlzələlərin müjdəçiləri*

ANAS Transactions Earth Sciences 2 / 2021

http://www.journalesgia.com

QUALITATIVE ASSESSMENT OF COMPRESSIONAL STRESSES WITHIN THE SOUTH CASPIAN MEGADEPRESSION AND THEIR IMPACT UPON STRUCTURE FORMATION AND HYDROCARBON GENERATION

Gurbanov V.Sh.[1], Narimanov N.R.[2], Nasibova G.J.[2], Mukhtarova Kh.Z.[2], Narimanov R.N.[2], Huseynova Sh.M.[1]

[1]Institute of Oil and Gas of Azerbaijan National Academy of Sciences
9, F.Amirov str., Baku, Azerbaijan, AZ 1000: vaqifqurbanov@mail.ru, huseynova_shalala@yahoo.com
[2]Azerbaijan State Oil and Industry University
34, Azadlig ave., Baku, Azerbaijan, AZ1010: gultar_nasibova_1@yahoo.com, mukhtarova.khuraman@mail.ru, rustam.narimanov@asoiu.edu.az, nariman.narimanov40@asoiu.edu.az

Keywords: *volcanism, compressive stresses, Absheron archipelago, oil, gas*

Summary. As a result of convergence of the Iranian and Anatolian plates the South Caspian marginal continental basin had already been formed in the end of the Eocene. The South Caspian mega-depression (SCMD) is partitioned into a series of structural units of various scale that have certain evolutionary autonomy against uncompensated subsidence of the depression. In the article from west to east the following structural elements of the SCMD have been considered: the Kur and Gabyrry interfluvial depression, the Lower Kur and the Baku archipelago depressions, the western half of the Absheron-Balkhan residual subduction zone, represented in Azerbaijan mainly by the Absheron archipelago, and the Turkmen shelf owing to the Godin massif by its formation. Based on dimension ratios of local uplifts within the structural elements of SCMD we tried to assess qualitatively the compressional stresses in these areas, their trend and impact upon a number of geological processes. For this purpose, isomorphic maps of the abovementioned structural units, charts reflecting the morphology of local uplifts have been constructed and analyzed. The research results made it possible to establish a direct relationship between compressional stresses, structure formation, mud volcanism and oil and gas content. It is established that the South Caspian depression has been developed as an uncompensated sedimentary basin surrounded by collision and residual subduction zones, subjected to intense compressional stresses and characterized by subsidence and deposition. There is direct relation between the extent of mud volcanism and intensity of compressional stresses in the structural units under study: the former one is the indicator of the latter one. Absence of mud volcanism on the Godin massif is associated with absence of the favorable paleogeographic environment and compressional stresses. Compressional stresses in the intermountain depressions have positive impact upon their oil and gas content, that is, compressional stresses, mud volcanism and hydrocarbon generation are associated with geostructural units.

© 2021 Earth Science Division, Azerbaijan National Academy of Sciences. All rights reserved.

Introduction

Study of the geodynamic environment of the formation of the South Caspian depression (CSD), which is the central water area segment of the South Caspian mega-depression (SCMD), and the geodynamic chart of the lithospheric plates surrounding it (Fig. 1) indicates that till the end of the Miocene the water area of the South Caspian was one of the deepest depressions of the Thetis ocean, located between the Iranian and Eurasian plates. As a result of convergence of the Iranian and Anatolian plates the South Caspian marginal continental basin had already been formed in the end of the Eocene (Гамкрелидзе, 1982).

The Greater and Lesser Caucasus collisions were subjected to upheaval and convergence in the Late Miocene, caused by formation of two subduction zones in the region. One of them is oriented north-

wards beneath the Greater Caucasus, whereas the second one – southwards beneath the Lesser Caucasus (Зоненшайн и др., 1990; Ахмедов, 1987). Such a geodynamic environment puts the SCMD under the great compressional stresses (Fig. 2).



Fig. 1. Geodynamic borderlines (in red) and force line directions (the black arrows) between lithospheric plates within the central segment of the Mediterranean folding belt (after N.R. Narimanov)

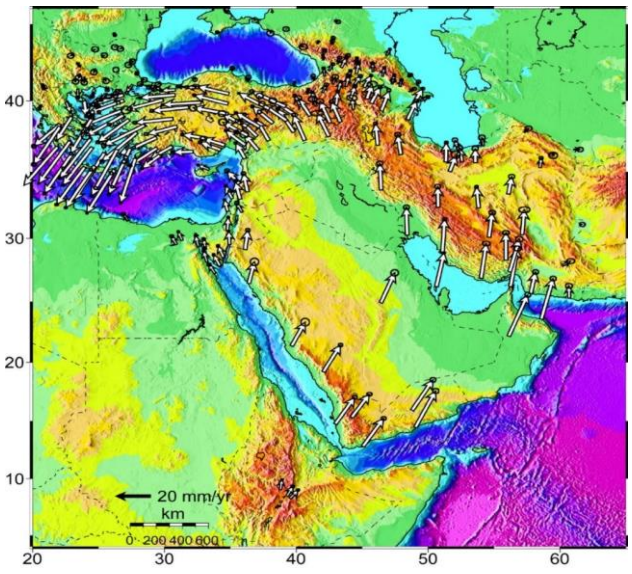


Fig. 2. Map showing decimated GPS velocities relative to Eurasia (Reilinger et al., 2006).

Velocity fields from wide-scale GPS surveys clearly show north-northwestward movement of the Earth crust of Azerbaijan and adjacent area of Caucasus.

The most prominent feature of the velocity field is the velocity drop at survey points perpendicular to the Greater Caucasus nappe (GCN) (i.e., KURD and MERD and BILE and SHIK). The survey points indicate velocity drop all along the GCN. We consider movement of the Earth surface north-northeastward as a cause for stress accumulation in this nappe. Additionally, there is potentially horizontal movement within the Kur depression and the Lesser Caucasus from west to east, i.e. along the mountain belt.

Taking into account that the South Caspian depression is subjected to compressional stresses from south, west and north (Fig.3), compressional stresses of various extents develop in each of its structural units as a function of thickness of the sedimentary cover, its lithologic composition, depth of the basement and other factors. As a result, the local uplifts of various shape and size are formed in them. Thus, by studying morphological properties and relations of local uplifts that evolved in each of the SCMD structural units it is possible to qualitatively assess intensity of compressional stresses in the area and establish their impact direction. It should be noted, that F.A.Kadirov, R.T.Safarov studied deformation of the earth crust in Azerbaijan and bordering areas using GPS (Кадиров, Сафаров, 2013). Meanwhile, distribution, trending and intensity of the compressional stresses within the SCMD are qualitatively defined as described below.



Fig. 3. The main impact directions of compressional stresses in the South Caspian depression (after N.R. Narimanov)

Objectives

Based on dimension ratios of local uplifts in the Kur-Gabyrry interfluvial depression, Absheron, Baku archipelagos, the Lower Kur depression and the Turkmen shelf of the SCMD, authors tried to assess qualitatively and study the trend of compressional stresses in these areas and their impact upon a number of geological processes. For this, isomorphic maps of the abovementioned structural units, charts reflecting the morphology of local uplifts have been constructed and analyzed.

Methods

It is known that folds complicated by mud volcanism refer to diapir structures. They developed in the regions of the mobile Pacific and Alpine-Himalayan fold belts, where compressional stresses are widespread (Рахманов, 1987; Алиев и др., 2015; Кадиров и др., 2014). When diapir folds are formed, they are isometric if not subjected to compressional stresses. Nevertheless, if the evolution of the diapir is however slightly affected by compressional stresses, then a short brachyfold is formed, and if more strongly affected, a long brachy- or linear folds are formed. That is why the morphology of diapir and other fold types is a function of intensity of compressional stresses that affect them during their evolution. The proposed method for a qualitative assessment of the intensity of compressional stresses in this area is based on the analysis of the morphology of diapir and other folds.

Being the final stage of mud diapir evolution in the sedimentary cover, mud volcanism is associated with high shale content of the sedimentary cover rich in organic matter (OM), deep heat flow and high intensity of compressional stresses in the region.

Results

Since the Kur-Gabyrry interfluvial depression, situated in the west-north-west of the SCMD, is formed in the area where the Greater and Lesser Caucasus collisions are the closest to each other, impact of compressional stresses developed therein upon folding is greater. The isomorphic map drawn for the structural unit under consideration (Fig. 4) shows general orientation of contours from west-north-west to east-south-east, relatively dense breadthways contours and their greater values (7.0-3.4). All this indicates highly developed compressional stresses in the area. The morphological chart also depicts prevalence of long brachyfolds and their west-north-west – east-south-east orientation (Fig. 4).

Linear arrangement of a large number of salsas, gryphons, mud volcanoes of the Kur-Gabyrry interfluvial depression alongside Caucasus range, their genetic relation (Рахманов, 1987) to overthrusts in particular indicate the major role of compressional stresses in evolution of the uplifts themselves. Distribution of various fault types, mud volcanoes of different forms, on the other hand, can be assessed as a result of activity of compressional stresses. So there are a lot of large-amplitude overthrusts that complicate the structural and tectonic pattern of the region. However, the reservoir rocks on the footwalls screened by the hanging walls may have preserved their oil and gas potential. Only 2 uplifts out of 17 local ones in the Kur-Gabyrry interfluvial depression are complicated by mud volcanoes. However, there are over 100 gryphons, salsas and mud hills in the area (Рахманов, 1987; Алиев и др., 2015). A low number of mud volcanoes is associated with relatively little thickness (11-13 km) of the sedimentary cover with low shale content. The isomorphic map (Fig. 4) of the depression shows that the intensity of developed compressional stresses is high enough and isoline values vary between 3.4 and 7.0. The background of compressional stresses in that case is high. The table shows that 3 local uplifts out of 17 are oil bearing, the rest are potentially hydrocarbon bearing (Нариманов, 2005a,b).

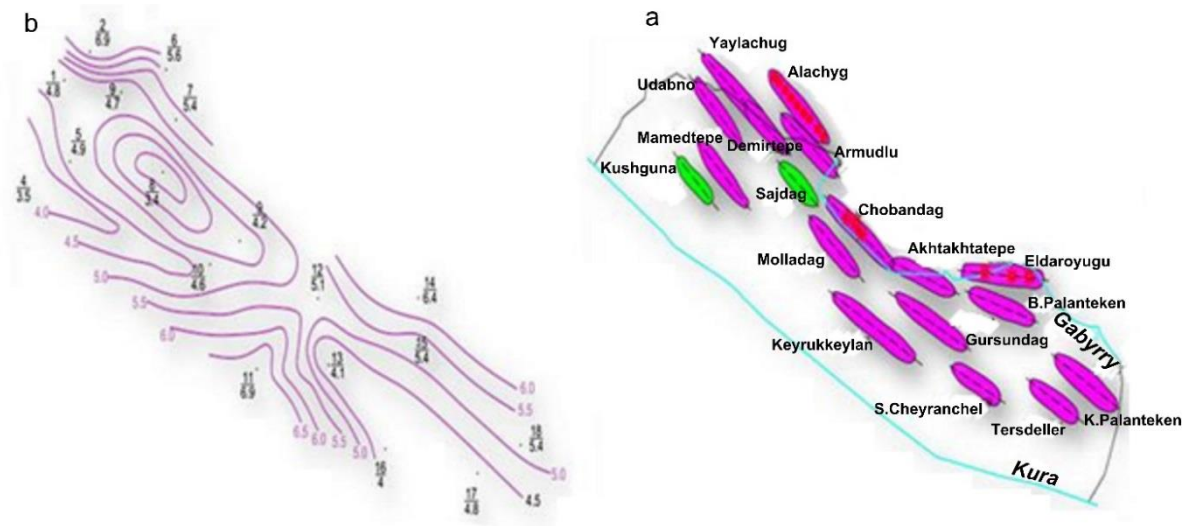


Fig. 4. a – isomorphic map, b – morphology and attitude of local uplifts of the Kur-Qabirry interfluvial depression

Table

Local uplifts of the structural units of the South Caspian mega-depression with proved oil and gas content

N	Number of folds	Oil and gas				
		Oil bearing	Gas bearing	Oil and gas bearing	Potentially hydrocarbon bearing	Mud volcanoes
1		Kur-Gabyrry interfluvial depression				
	17	3	-	-	14	2
2		Absheron oil and gas bearing province				
	51	21	4	7	19	53
3		Oil and gas bearing province of the Baku Archipelago				
	21	3	1	3	14	13
4		Lower Kur oil and gas bearing province				
	17	10	2	2	3	10
5		Godin massif				
	14	-	-	-	-	1

The Lower Kur depression is wider than the Kur-Gabyrry interfluvial depression and since it is remote from the Greater and Lesser Caucasus, Talysh collision zones, impact of compressional stresses developed in them is less than that in the Kur-Gabyrry depression. The isomorphic map (Fig. 5) drawn for this area depicts relatively dense isolines in the north with mainly long brachyfolds evolved, and rarer isomorphic lines in the south with short brachymorphic local uplifts, all of which indicate intense compressional stresses in the north part of the Lower Kur depression than that in the south part (Fig. 5 a, b). 10 out of 15 local uplifts under consideration are complicated by mud volcanoes (Table), numerous salsas and gryphons have evolved here. The isomorphic map of the depression (Fig. 5, a) shows that its isolines are not regularly spaced and their values vary between 2.3 and 4.9. This is indicative of relatively even areal distribution of compressional stresses. However, the isoline values suggest that the intensity of compressional stresses increases from the central part of the area northward. This is possibly caused by adjacency of the northern part of the Lower Kur depression to Alat-Langabiz tectonic zone with relatively intense compressional stresses. In the depression 10 out of 17 local uplifts are oil bearing, 2 – gas bearing, the rest are potentially hydrocarbon bearing (Table). Despite relatively weak compressional stresses in the Lower Kur depression in comparison with the Kur-Gabyrry interfluve, numerous mud volcanoes and higher oil and gas potential of the former one are associated with relatively greater thickness of the sedimentary cover (9-20 km) and wide-spread pelitic facies the source rocks composed of. Due to continuous uncompensated subsidence of the basin the source rocks have been buried into more favorable temperature and pressure environment.

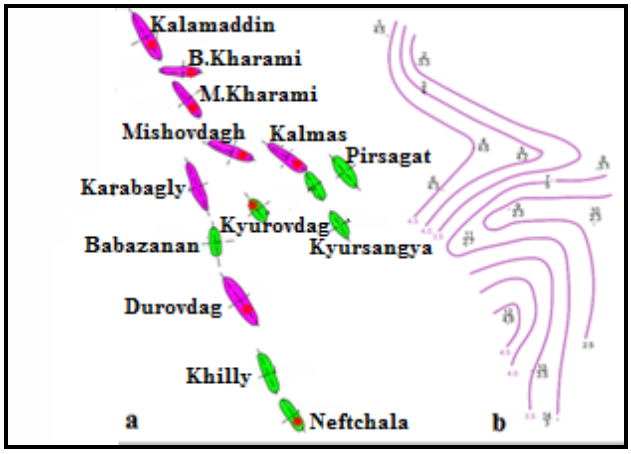


Fig. 5. a – morphology of the local uplifts; b – isomorphic map of the Lower Kura depression

Compressional stresses in Baku Archipelago had an impact on evolution of local uplifts, as well as upon formation of a regional uplift of sublongitudinal orientation that constitutes the western slope of the South Caspian basin and is located between the Lower Kur depression and Baku Archipelago (Фейзуллаев и др., 2016). Compressional stresses in the Baku Archipelago are of the east-northeastern trend. Active buckling and bending mechanisms of folding had an impact upon formation of mainly brachyfolds and that is indicated by density of contours on isomorphic maps. It is a common knowledge that mud volcanoes indicate actual compressional stresses, since, as mentioned above, mud volcanism is widespread in the Alpine-Himalayan fold belt and along the western mobile subduction zone of the Pacific basin, where compressional stresses are well-developed (Алиев и др., 2015). The structural units studied in the article refer to the SCMD situated in the central segment of the Alpine-Himalayan fold belt. As a rule, regions complicated by mud volcanism mostly have higher oil and gas potential. One

may infer that compressional stresses in negative geostructural units of regions with active geodynamic and tectonic environment constitute an entity with mud volcanism and hydrocarbon potential. From that perspective, 13 out of 21 local uplifts of the Baku Archipelago are complicated by mud volcanoes, 3 – oil bearing, 1 – gas bearing, 3 – oil and gas bearing, the rest refer to potentially hydrocarbonaceous structures (Table). Isoline values on the isomorphic map that depicts intensity of compressional stresses in the Baku Archipelago vary between 2.5 and 6.1 (Fig. 6).

From geodynamic point of view the Absheron-Balkhan structural mega-saddle that makes up the north-northeastern slope of the SCD is a structural and tectonic manifestation of non-classical subduction zone. It is a common knowledge that the residual or non-classical subduction takes place here due to the South Caspian microplate sliding beneath the Middle Caspian block (Ахмедов, 1987; Фейзуллаев и др., 2016; Перспективы нефтегазоносности…, 2015). It should be noted that in such cases buildup of compressional stresses is more intense than a linear movement between the plates. Compressional stresses that impact the Absheron-Balkhan structural mega-saddle in the sublongitudinal direction (Fig. 2) are relatively more intense than those within the SCD. The low intensity of compressional stresses in SCD is related to the mentioned collisions in the west and east of the Absheron-Balkhan residual subduction that prevent the normal flow of the process within the latter one from completion and turning into collision (Фейзуллаев и др.,, 2016). Nevertheless, structural and tectonic layout of the region, complication of the structural mega-saddle by overthrusts, even nappes and latitudinal tectonic strike-slip faults, sublatitudinal orientation of local uplifts suggest intense enough compressional stresses of sublongitudinal trend (Fig. 7). Comparison of isomorphic maps of the areas under investigation reveals that isoline values of the Absheron isomorphic map cover wider range (2.1-9.0) and the lines are more densely drawn. Predominant formation of the widespread mud volcanoes in the Absheron Archipelago on the structures situated along the mega-saddle axis indicates relatively more intense compressional stresses in the archipelago. There are 53 mud volcanoes on 51 structure of the Absheron Archipelago, that means that some folds are complicated by 2 mud volcanoes. Isoline values of the archipelago's isomorphic map ranging between 2.1-9.0 imply more intense compressional stresses relative to the Baku Archipelago. As mentioned above, this is caused by the Absheron-Balkhan structural mega-saddle being, from geodynamic point of view, a residual subduction. From table 21 folds out of 51 within the archipelago are oil bearing, 4 – gas bearing, 7 – oil and gas bearing, the rest are potentially hydrocarbon bearing. Thus, 32 local uplifts within this structural unit are hydrocarbon bearing and 19 are prospective (Нариманов, 2005a,b).

a) b)

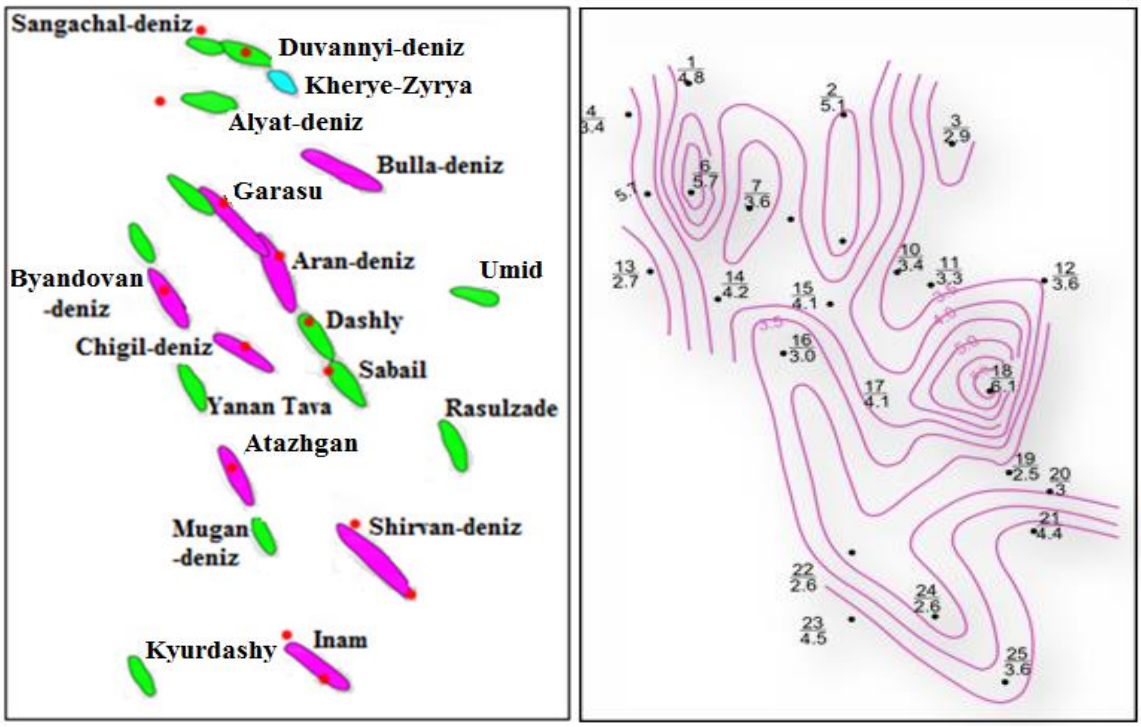
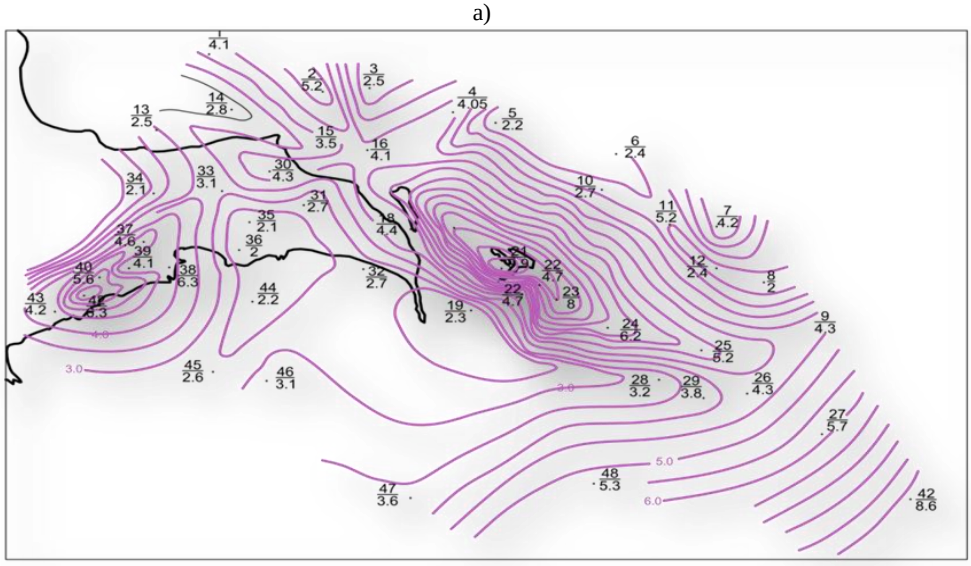


Fig. 6. a – isomorphic map; b – morphology and attitude of the local uplifts of the Baku Archipelago

a)



b)

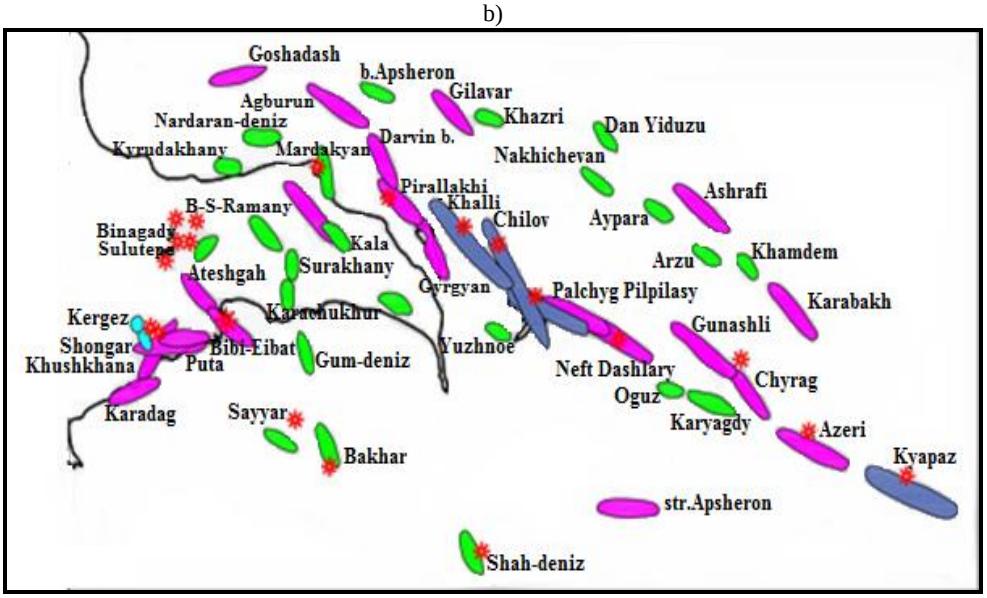


Fig. 7. a – isomorphic map; b – morphology and attitude of the local uplifts for the Azerbaijani part of the Absheron-Balkhan structural mega-saddle (Absheron Ridge)

The Godin massif that constitutes the basement of the Turkmen shelf is the hypsometrically considerably uplifted block of the crystalline basement and its sedimentary cover is represented by the late Mesozoic, mainly the Cenozoic rocks.

Most probably one of the reasons that caused uplifting of Godin massif was the geostatic pressure drop developed by the sedimentary cover on and around the massif under compressional stresses within the SCD. Relatively high geostatic pressure gradient developed between the sedimentary layers accumulated on and around the Godin massif allows us to suppose the impact of the gradient upon its vertical movement. The continental denudational environment of the massif had mainly lasted from the Paleozoic to the Late Cretaceous. By the end of Cretaceous its isostatic attitude corresponded to the one of the South Caspian seafloor and continued to evolve under the same paleogeographic environment. Accumulation started from the Late Cretaceous. Thickness of the sedimentary cover is just 8-10 km (Лебедев, 1987), whereas it is 25 km and above in the SCD which is westwards. Since the relatively higher hypsometric level of the crystalline basement of the Godin massif screens off compressional stresses developed in the SCD sedimentary cover directed towards the former one, its local uplifts have mainly been formed through bending. The local uplifts are relatively little developed and of the brachy- and isometric shape, scattered around the area with no pattern observed in their attitude. This case is described on the isomorphic map drawn for the area with very rare isolines and their low values (Fig. 8).

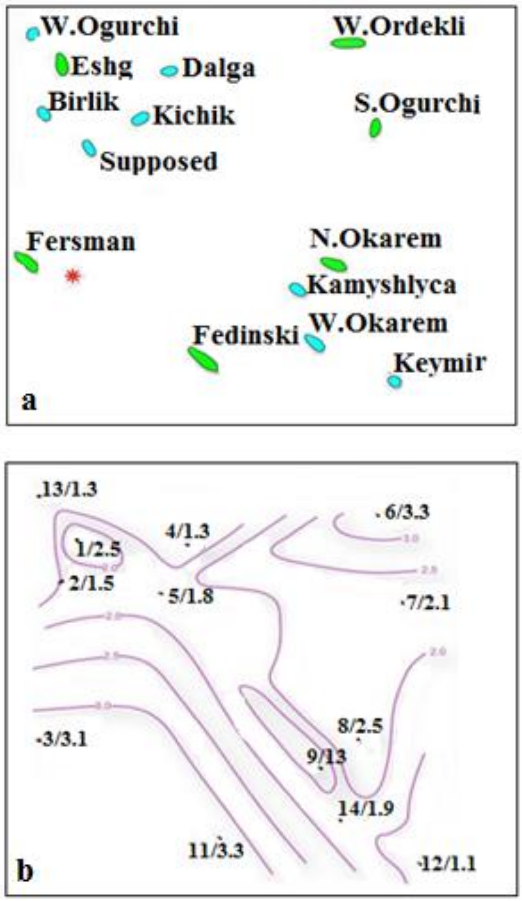


Fig. 8. a – morphology and attitude of the local uplifts; b – isomorphic map of the Turkmen shelf

The isomorphic map (Fig. 8b) shows isoline values ranging from 1.3 to 3.3. There is no mud volcanism on the Godin massif. There is only one mud volcano associated with a deep fault in the southern edge (Лебедев, 1987). Regarding oil and gas content of the local uplifts referring to the Godin massif of the Turkmen shelf – there have been no hydrocarbon fields discovered until now. This is the reason why all of the local uplifts discovered on the Godin massif refer to a group with unknown hydrocarbon potential (Narimanov, 2005 a,b). Relatively thin sedimentary cover of the area and the unfavorable paleogeographic environment for organic matter to develop, as well as absence of compressional stresses prevent from voicing an objective opinion on the oil and gas content of the area.

Since the deposition process taking place under compressional stresses within the space surrounding the massif had a positive impact upon formation of the sedimentary cover, increase in geostatic pressure caused more rapid subsidence of the megagraben-like seafloor (Буряковский и др., 1991). With the exception of the Godin massif of the Turkmen shelf this situation, having increased compressional stresses in the basin, intensified plicated dislocation in the sedimentary cover through buckling (Мамедов и др., 1995).

Evolution of the Greater and Lesser Caucasus collisions and their convergence causes intensification of compressional stresses along the slopes of the South Caspian megadepression. The Iranian plate undergoing bending deformation formed favorable conditions for formation of the western slope of the South Caspian depression, thus promoting its geographical isolation from the Kur depression (Фейзуллаев и др., 2016).

Great thickness (over 14 km) of the Miocene-Quaternary sediments of mainly shaly content paved the way for formation of diapir structures and most of them have been complicated by mud volcanoes. That is why, with the exception of the SCD Godin massif, the folding process in the Oligocene-Pliocene sediments happens due to expelling rheologically active Oligocene-Miocene depositional complexes towards the core of the folds that evolved in the underlying layers. It is well-known that the majority of the local uplifts of the Baku and Absheron archipelagos, pre-Elborz depression started their evolution no later than the end of the Miocene. From this aspect we can infer that 2500-3000 m thick Middle and Upper Miocene sediments generated there the geostatic pressure necessary for triggering the bending mechanism (Буряковский и др., 1991). However, long and short brachyforms of the majority of folds developed in the sedimentary layer indicate simultaneous involvement of an even more intensive buckling mechanism along with the bending in their formation. This is caused by rheologically more active Oligocene-Quaternary sediments and intensification of compressional stresses during the geologic period under consideration. In this connection, in the Baku Archipelago as a model, one can see that the rate of folding processes is a function of time and it commonly increases. This case is clearly seen from the variation of the evolution rate of some folds of the Baku Archipelago through geological time (Буряковский и др., 1991).

The studied local uplifts of the Baku Archipelago show that they developed simultaneously with deposition. This is typical of diapir structures. However, it should be noted that the fold evolution rate was not constant during the evolution period. Thus, whereas their evolution rate grows from the north-west to the south-east in Pliocene, to the contrary dramatic rate increase is observed in Quaternary from the south-east towards the north-west. This situation shows increase of the fold evolution rate north-westwards through geologic time. This is, naturally, associated with distribution properties of compressional stresses in the Baku Archipelago where mud volcanoes are wide-spread and this shows their attenuation in southwards.

Varying evolution rate for local uplifts is typical of other units of the SCMD (Lower Kur depression, Absheron Archipelago etc.) as well.

Mud volcanism wide-spread in the Alpine-Himalayan fold and mobile Pacific belts are associated with subduction and collision zones where compressional stresses are widely developed (Алиев и др., 2015). This shows that mud volcanoes can be considered as an indicator of compressional stresses, i.e. they are indicators of compressional stresses built up in the thick sedimentary cover of clayey content. A compressional stress environment has established in the SCMD since the Upper Miocene and has had a direct impact upon the deposition process. The rate of the latter one in the sedimentary basin varies as a function of time and space (Буряковский и др., 1991).

According to Buryakovski et al., while the deposition rate in the central part of the South Caspian is 0.4 mm/year, it is 3-4 mm/year on its shelf and 6 mm/year in the mouth of the Kur River (Мамедов и др., 1995). However, it is well-known that the thickness of the Pliocene deposits alone reaches 6-7 km towards the center of the South Caspian depression. This is typical of the layers lying above as well. At the same time, thickness of the Middle and Upper Miocene deposits grows towards the western slope of the depression (Ягубов и др., 1971), despite the thickness of the deposits lying above decreasing in the same direction and they bend in the form of a regional uplift. This is caused by Paleogene-Miocene deposits forced out underneath the Lower Pliocene deposits (Буряковский и др., 1991). This process occurred no later than in the Lower Pliocene. Besides, this is confirmed by decreased thickness of the Lower Pliocene deposits towards the crestal part of the abovementioned regional uplift, i.e. this regional uplift extending in sublongitudinal direction started its evolution during formation of the Lower Pliocene sediments. These factors show that compressional stresses of sublatitudinal trend established in the western slope of the SCD have been active in the Baku Archipelago and the central part of the South Caspian since the end of the Upper Miocene. Presence of these stresses causes agglomeration of the non-compacted deposits in the central, that is, deeper part of the basin even these days. Periodic transportation of the deposits accumulated on the continental slope of the South Caspian basin as turbidity currents towards the center of the basin is a special case of this process. As we can see, just that very case causes increase in the thickness of the Miocene-Quaternary deposits towards the deeper part of the basin, in spite of the deposition rate being relatively weak in the deeper part rather than in other parts (Мамедов и др., 1995). At the same time, as already mentioned, since the complex graben shape of the basin's crystalline basement is more susceptible to compressional stresses, this increases its subsidence rate even more and causes formation of syndepositional brachyform diapir type structures complicated by mud volcanoes before inversion.

Thus, despite being surrounded by active collision zones and being a negative geostructural unit, the South Caspian depression is still evolving as an inter-mountain non-compensated basin with intense subsidence and sedimentation.

Complex graben-like structure of the crystalline basement of the South Caspian basin, resulting from complication by non-uniformly scaled dense faults and deep fractures networks, increases its susceptibility to compressional stresses and growing geostatic pressure. Geostatic pressure also has a positive effect on the intensity of compressional stresses and, as a result, the seafloor is subject to more rapid subsidence. This led to establishing of an environment favorable for evolution of mainly syndepositional diapir folds in the sedimentary cover and it is well-known that such folds are of great hydrocarbon potential. This is due to the fact that the formation of mud diapirs is associated with the high content of clay in the section and generation of hydrocarbons in high-quality source-rock under corresponding temperature and pressure.

Based on high clay content of sedimentary cover in the SCD, particularly of its Oligocene-Quaternary section, and, in this connection, widespread mud diapirism and volcanism, we can come to the conclusion that the sedimentary complexes of the abovementioned intervals should be rich enough in organic matter (OM). To study that we tried to clarify percentage variation of OM in rock complexes and its relation to geodynamic environment (Ягубов и др., 1971; Нариманов, 2003). Build-up of compressional stresses in the SCD, burial rate of deposits, tectonic and seismic activity, complication of the basement by faults have considerable impact on hydrocarbon generation and their accumulations. Meanwhile, it is well-known that oil and gas generation can only be provided by favorable temperature and pressure environment and deposition process associated with continuous subsidence of a sedimentary basin. The average deposition rate from the Later Mesozoic to Oligocene in the South Caspian basin was 50 m/mln.year and this process occurred in oceanic environment in absence of compressional stresses (Соколов, 1985). In Oligocene – Later Miocene the region, already in marginal marine environment, is described as having seen the onset of compressional stresses and the deposition rate was 135 m/mln.year. This rate provides accumulation of the OM up to 2% in potential source rock

(Feyzullayev et al., 2002). The deposition rate in Pliocene-Quaternary reaches 1400-1600 m/mln.year. This rate establishes necessary conditions for accumulation of up to 10-15% of OM in potential source rock. As one can see, the deposition rate in the SCD, which was delimited by collision and residual subduction zones in Pliocene-Quaternary, and amount of OM accumulated in mainly clayey deposits, are directly related to compressional stresses. Potential source rock layers of the Upper Cretaceous, Maykop and Productive Series (PS) are the main rocks capable of generating commercial oil and gas in Mesocenozoic sediments. However, it should be taken into consideration that the PS has not completely subsided into the main hydrocarbon generation zone that is the reason why the hydrocarbons it generated could not fully saturate its reservoir rocks. This situation allows us to make an assumption that the PS reservoir rocks have been saturated not only by hydrocarbons generated by PS sediments, but by Oligocene-Miocene deposits even more so. On the other hand, catagenetic maturation of OM, along with the formation temperature, depends on dynamic processes accompanied by mud volcanism that causes additional heat flow (Feyzullayev et al., 2002), i.e., compressional stresses are one of the driving forces of dynamocatagenesis in hydrocarbon generation. As we can see, in geodynamically and tectonically active intermountain depressions compressional stresses, mud volcanism and oil and gas content are closely associated processes.

As to the Godin massif of the Turkmen shelf, in spite of the relatively high temperature gradient, absence of compressional stresses and dynamocatagenesis due to weak tectonic activity in the sedimentary cover the possible source rocks has low hydrocarbon generation potential. On the other hand, here paleogeographic environment shows that at shallow depths high water and deposit mobility cannot be considered as a favorable setting for enough OM accumulation. However, compressional stresses in sedimentary layers surrounding the Turkmen shelf and the Godin massif and, in association with that, tectonic processes could cause migration of the part of fluids to the Turkmen shelf and the Godin massif.

Correlation of the extreme value differences of the isomorphic curves for the SCMD structural units under consideration enables establishing the structural units with more intense compressional stresses. From this point of view the Absheron-Balkhan residual subduction zone tectonically represents a structural mega-saddle and long brachy- and linear folds have developed in its Azerbaijan segment. At the same time, here the extreme value differences of the isomorphic curves are greater than on the other structural units and is 6.9. This shows that the extreme value differences of the isomorphic curves for the SCMD structural units are directly related to the intensity of compressional stresses. On the other hand, it's well-known that the greater extent of compressional stresses is typical of subduction and collision zones. Thus we can conclude that based on an isomorphic map of any area it is possible to qualitatively assess the extent of development and distribution properties of compressional stresses.

Conclusions

The South Caspian depression has been evolving as an uncompensated hydrocarbon bearing basin surrounded by collision and residual subduction zones, subjected to intense compressional stresses and characterized by subsidence and deposition.

There is direct relation between the extent of mud volcanism and intensity of compressional stresses in the structural units under study: the former one being the indicator of the latter one. Absence of mud volcanism on the Godin massif is associated with absence of the favorable paleogeographic environment and compressional stresses.

Compressional stresses in the intermountain depressions have positive impact upon their oil and gas content, that is, compressional stresses, mud volcanism and hydrocarbon generation are associated with geostructural units.

It is possible to qualitatively assess compressional stresses within the geodynamically and tectonically active intermountain depressions using an isomorphic map of the area.

REFERENCES

Akhmedov A.H. The mechanism of formation of the South Caspian megadepression and basic patterns of its tectonic evolution. Oil and gas, No. 3, 1987, p. 25-30 (in Russian).

Aliyev Ad.A., Guliyev I.S., Dadashov F.H., Rahmanov R.R. World mud volcanoes atlas. Nafta-Press. Baku, 2015, 323 p. (in Russian).

Aliyev I.A., Bagir-zadeh F.M., Bunyat-zadeh Z.A. et al. The map of the oil and gas fields and prospect structures of Azerbaijan SSR. Institute of Geology after Academician Gubkin I.M. Academy of Sciences of the Azerbaijan SSR.

ЛИТЕРАТУРА

Feyzullayev A.A., Huseynov D.A. Oil and gas generation specifics within the Baku Archipelago. Azerb. Oil Industry, No. 4, 2002, p. 1-5.

Mamedov P.Z., Babayev D. South Caspian Megatrough Seismic stratigraphy. Presented at the AAGP International Conference Exhibition, Nice, France, September, 1995, p.14.

Reilinger R., McClusky S., Vernant P. et al. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions: eastern Mediterranean active tec-

Head Office of Geodesy and mapping of the Council of ministers of the USSR. Moscow, 1985 (in Russian).

Buryakovski L.D., Djafarov I.S., Karimov V.Y. Exploration of offshore oil and gas fields. Nedra. Moscow, 1991, 232 p. (in Russian).

Feyzullayev A.A., Gadirov F.A., Gadirov A.H. Tectonic and geophysical model of the South Caspian in connection with oil and gas content. Earth physics, No. 5, 2016, pp. 1-11 (in Russian).

Feyzullayev A.A., Huseynov D.A. Oil and gas generation specifics within the Baku Archipelago. Azerb. Oil Industry, No. 4, 2002, p. 1-5.

Gamkrelidzeh I.P. Mobilism and problems of tectonics of Caucasus. In: Problems of geodynamic of Caucasus. Nauka. Moscow, 1982, p.4-8 (in Russian).

Kadirov F.A., Guliyev I.S., Feyzullayev A.A., Safarov R.T., Mammadov S.K., Babayev G.R., Rashidov T.M. Deformations of the earth crust in Azerbaijan based on the GPS data and their impact upon seismicity and mud volcanism. Earth physics, No. 6, 2014, pp. 99-107. (in Russian).

Kadirov F.A., Safarov R.T. Deformation of the Earth crust of Azerbaijan and the adjacent territories based on GPS measurement data. ANAS proceedings. The sciences of Earth, No. 1, 2013, p. 47-55 (in Russian).

Lebedev L.I. The Caspian Sea, geology and oil and gas content. Nauka. Moscow, 1987, 296 p. (in Russian).

Mamedov P.Z, Babayev D. South Caspian Megatrough Seismostratigraphy. Presented at the AAGP International Conference Exhibition, Nice, France, September, 1995, p.14.

Narimanov N.R. Geodinamic setting of margins of the South Caspian megadepression. Azerbaijan geologist, No. 10, 2005a, pp. 26-32. (in Russian).

Narimanov N.R. Geodynamic aspects of structure formation in the South Caspian depression. Baku, Azerb. Oil Industry, No. 9, 2005b, pp. 14-21 (in Russian).

Narimanov N.R. Geodynamic aspects of formation of the sedimentary mantle of the South Caspian depression. Oil and gas geology, No. 6, 2003, pp. 26-31. (in Russian).

Oil and gas prospects of the Turkmen shelf of the South Caspian megadepression. http://www. Oilgas.gov.tm/compositiona/ 19 08.11.2015. (in Russian).

Rahmanov R.R. Mud volcanoes and their importance in predicting gas and oil content of the depths. Nedra. Moscow, 1987, 176 p. (in Russian).

Reilinger R., McClusky S., Vernant P. et al. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions: eastern Mediterranean active tectonics. J. Geophys. Res., Vol. 111, No. B5, B05411, 2006, https://doi.org/10.1029/2005JB004051.

Sokolov B.A. Evolutionary and geodynamic criteria for assessment of oil and gas content of the depths. Nedra. Moscow, 1985, 168 p. in Russian).

Yagubov A.A., Alizade A.A., Zeynalov M.M. Azerbaijan SSR mud volcanoes. Atlas. Baku, 1971, 257 p. (in Russian).

Zonenshayn L.P., Kuzmin M.I., Natapov L.M. The plate tectonics of the USSR. Vol. 2. Nedra. Moscow, 1990, 334 p. (in Russian).

tonics. J. Geophys. Res., Vol. 111, No. B5, B05411, 2006, https://doi.org/10.1029/2005JB004051.

Алиев А.И., Багир-Заде Ф.М., Буниат-Заде З.А. и др. Карта месторождений нефти и газа и перспективных структур Азерб.ССР. Институт Геологии им. акад.И.М. Губкина АН Аз.ССР. Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, Москва, 1985.

Алиев Ад.А., Гулиев И.С., Дадашов Ф.Г., Рахманов Р.Р. Атлас грязевых вулканов мира. Nafta-Press. Баку, 2015, 323 с.

Ахмедов А.Г. Механизм образования Южно-Каспийской мегавпадины и основные закономерности ее тектонического развития. Нефть и газ, No. 3, 1987, с. 25-30.

Буряковский Л.Д., Джафаров И.С., Керимов В.Ю. Поиски и разведка морских месторождений нефти и газа. Недра. Москва, 1991, 232 с.

Гамкрелидзе И.П. Мобилизм и проблемы тектоники Кафказа. В кн.: Проблемы геодинамики Кавказа. Наука. Москва, 1982, с.4-8.

Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. Кн. 2. Недра. Москва, 1990, 334 с.

Кадиров Ф.А., Гулиев И.С., Фейзуллаев А.А., Сафаров Р.Т., Маммадов С.К., Бабаев Г.Р., Рашидов Т.М. Деформации земной коры в Азербайджане по GPS-данным и их влияния на сейсмичность и грязевой вулканизм. Физика Земли, No. 6, 2014, с. 99-107.

Кадиров Ф.А., Сафаров Р.Т. Деформация земной коры Азербайджана и сопредельных территорий по данным GPS-измерений. Изв. НАН Азербайджана, Науки о Земле, No. 1, 2013, с. 47-55.

Лебедев Л.И. Каспийское море, геология и нефтегазоносность. Наука. Москва, 1987, 296 с.

Нариманов Н.Р. Геодинамическая обстановка обрамления Южно-Каспийской мегавпадины. Azərbaycan Geoloqu, No.10, 2005a, с. 26-32.

Нариманов Н.Р. Геодинамические аспекты структурообразования в Южно-Каспийской впадине. Баку, Азерб. нефтяное хозяйство, No. 9, 2005b, с. 14-21.

Нариманов Н.Р. Геодинамические аспекты формирования осадочного чехла Южно-Каспийской впадины. Геология нефти и газа, No. 6, 2003, с. 26-31.

Перспективы нефтегазоносности Туркменского шельфа Южно-Каспийской мегавпадины. http://www. Oilgas.gov.tm/compositiona/19 08.11.2015.

Рахманов Р.Р. Грязевые вулканы и их значение в прогнозировании газонефтеносности недр. Недра. Москва, 1987, 176 с.

Соколов Б.А. Эволюционно-геодинамические критерии оценки нефтегазоносности недр. Недра. Москва, 1985, 168 с.

Фейзуллаев А.А., Кадиров Ф.А., Кадиров А.Г. Тектоно-геофизическая модель Южного Каспия в связи с нефтегазоносностью. Физика Земли, No. 5, 2016, с. 1-11.

Якубов А.А., Ализаде А.А., Зейналов М.М. Грязевые вулканы Азербайджанской ССР. Атлас. Баку, 1971, 257 с.

КАЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ СЖИМАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЮЖНО-КАСПИЙСКОЙ МЕГАВПАДИНЕ, ИХ ВЛИЯНИЕ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И ГЕНЕЗИС УГЛЕВОДОРОДОВ

Гурбанов В.Ш.[1], Нариманов Н.Р.[2], Насибова Г.Д.[2],
Мухтарова Х.З.[2], Нариманов Р.Н.[2], Гусейнова Ш.М.[1]
[1]Институт нефти и газа НАН Азербайджана
AZ 1000, Баку, Азербайджан, ул. Ф.Амирова,9, Баку, Азербайджан: vaqifqurbanov@mail.ru, huseynova_shalala@yahoo.com
[2] Азербайджанский Государственный Университет нефти и промышленности
AZ1010, просп. Азадлыг, 34, Баку, Азербайджан: gultar_nasibova_1@yahoo.com, mukhtarova.khuraman@mail.ru, rustam.narimanov@asoiu.edu.az, nariman.narimanov40@asoiu.edu.az

Резюме. Изучение геодинамических условий образования Южно-Каспийской впадины (ЮКВ), являющейся центральным сегментом акватории Южно-Каспийской мегавпадины (ЮКМВ), показывает, что до конца миоцена акватория Южного Каспия была одной из самых глубоких впадин океана Тетис, расположенной между Иранской и Евразийской плитами. В результате сближения Иранской и Анатолийской плит уже в конце эоцена сформировался Южно-Каспийский окраинный континентальный бассейн. Южно-Каспийская мегавпадина расчленена на ряд разновеликих структурных элементов, автономно развивающихся на фоне некомпенсированного прогибания ее ложа. В статье с запада на восток рассмотрены следующие структурные элементы ЮКМВ: впадина междуречья Куры и Габырры, Нижнекуринская впадина, впадина Бакинского архипелага, западная половина Абшерон-Прибалханской остаточной субдукции, представленной на территории Азербайджана преимущественно Абшеронским архипелагом, и Туркменский шельф, обязанный своим образованием массиву Година. На основе соотношений размеров локальных поднятий в пределах рассмотренных структурных элементов ЮКВМ авторы попытались дать качественную оценку сжимающих напряжений в этих областях, их тенденции и влияния на ряд геологических процессов. С этой целью были построены и проанализированы изоморфные карты указанных структурных единиц, отражающие морфологию локальных поднятий. Результаты исследований позволили установить прямую зависимость между сжимающими напряжениями, структурообразованием, грязевым вулканизмом и нефтегазоносностью. Дана качественная оценка интенсивности сжимающих напряжений по отдельным структурным элементам и установлен характер влияния этих напряжений на структурообразование и нефтегазоносность в пределах рассмотренных структурных элементов. Установлено, что Южно-Каспийская впадина развивалась как некомпенсированный бассейн, окруженный зонами коллизии и остаточной субдукции, подверженный интенсивным напряжениям сжатия и характеризующийся погружением и осадконакоплением. Между степенью развития грязевого вулканизма и интенсивностью сжимающих напряжений в пределах исследуемых структурных единиц существует прямая зависимость: первая является индикатором второй. Отсутствие грязевого вулканизма на массиве Година связано с отсутствием благоприятной палеогеографической обстановки и напряжений сжатия. Таким образом, напряжения сжатия в межгорных впадинах положительно влияют на их нефтегазоносность, то есть напряжения сжатия, грязевой вулканизм и образование углеводородов связаны с геоструктурными единицами.

Ключевые слова: *грязевой вулканизм, сжимающие напряжения, Абшеронский архипелаг, нефть, газ*

CƏNUBİ XƏZƏR MEQAÇÖKƏKLİYİNDƏ SIXILMA GƏRGİNLİKLƏRİNİN İNTENSİVLİYİNİN KEYFİYYƏTCƏ QİYMƏTLƏNDİRİLMƏSİ, ONLARIN STRUKTURƏMƏLƏGƏLMƏ PROSESLƏRİNƏ VƏ KARBOHİDROGENLƏRİN GENEZİSİNƏ TƏSİRİ

Qurbanov V.Ş.[1], Nərimanov N.R.[2], Nəsibova G.C.[2],
Muxtarova X.Z.[2], Nərimanov R.N.[2], Hüseynova Ş.M.[1]
[1]AMEA-nın Neft və Qaz Institutu
AZ 1000, Bakı şəh., F.Əmirov küç., 9: vaqifqurbanov@mail.ru, huseynova_shalala@yahoo.com
[2]Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti
AZ1010, Bakı şəh., Azadlıq prosp., 34, Bakı, Azərbaycan: gultar_nasibova_1@yahoo.com, mukhtarova.khuraman@mail.ru, rustam.narimanov@asoiu.edu.az, nariman.narimanov40@asoiu.edu.az

Xulasə. Cənubi Xəzər meqaçökəkliyinin (CXMÇ mərkəzi seqmenti olan Cənubi Xəzər hövzəsinin (CXH) formalaşmasının geodinamik şəraitinin tədqiqi göstərir ki, Miosenin sonuna qədər o, İran və Avrasiya plitələri arasında yerləşən və Tetis okeanının ən dərin çökəkliklərindən biri olmuşdur. İran və Anadolu plitələrinin yaxınlaşması nəticəsində artıq Eosenin sonunda Cənubi Xəzər kontinent kənarı hövzə kimi formalaşmışdır. Cənubi Xəzər meqaçökəkliyi yatağının kompensasiya olunmamış çökməsi fonunda avtonom şəkildə inkişaf edən bir sıra müxtəlifölçülü struktur elementlərə bölünür. Məqalədə qərbdən şərqə doğru CXMÇ-nin aşağıdakı struktur elementləri nəzərdən keçirilir: Kür və Qabırrı çaylararası çökəkliyi, Aşağı Kür çökəkliyi, Bakı arxipelaqı çökəkliyi, Azərbaycan ərazisində əsasən Abşeron arxipelaqı ilə təmsil olunan Abşeron-Balxanyanı qalıq subduksiyasının qərb hissəsi, Qodin massivinin hesabına yaranan Türkmənistan şelfi. CXMÇ-nin nəzərdən keçirilən struktur elementləri daxilində yerli qalxımların ölçülərinin müqayisəsi əsasında, müəlliflər bu ərazilərdə sıxılma gərginliklərini, onların xarakterini və geoloji proseslərə təsirini keyfiyyətcə qiymətləndirməyə çalışmışlar. Bu məqsədlə baxılan struktur elementlər daxilində yerləşən qalxımların morfologiyasını əks etdirən xəritələr qurulmuş və təhlil edilmişdir. Tədqiqat nəticəsində sıxılma gərginlikləri, strukturəmələgəlmə, palçıq vulkanizmi və neft-qazlılıq arasında birbaşa əlaqənin olduğu müəyyən edilmişdir. Müəlliflər tərəfindən CXMÇ-nin ayrı-ayrı struktur elementləri üzrə sıxılma gərginliklərinin intensivliyi keyfiyyətcə qiymətləndirilmiş və həmin gərginliklərin strukturların formalaşmasına və neft-qazlılığa təsiri müəyyən edilmişdir. Beləliklə, Cənubi Xəzər hövzəsi toqquşma və qalıq subduksiya zonaları ilə əhatə olunmuş, intensiv sıxılma gərginliklərinə, gömülməyə və çöküntütoplanmaya məruz qalan, kompensasiya olunmayan hövzə kimi inkişaf etmişdir. Tədqiq olunan struktur vahidlərdə palçıq vulkanizminin inkişaf dərəcəsi ilə sıxılma gərginliklərinin intensivliyi arasında birbaşa əlaqə mövcuddur: birincisi ikincinin göstəricisidir. Qodin massivində palçıq vulkanizminin olmaması əlverişli paleocoğrafi şəraitin və sıxılma gərginliklərinin olmaması ilə əlaqələndirilir. Dağlararası hövzələrdə sıxılma gərginlikləri neft-qazlılığa müsbət təsir göstərir, yəni sıxılma gərginlikləri, palçıq vulkanizmi və karbohidrogenlərin əmələ gəlməsi geostruktur vahidlərlə bağlıdır.

Açar sözlər: *palçıq vulkanizmi, sıxılan gərginliklər, Abşeron arxipelaqı, neft, qaz*

ANAS Transactions Earth Sciences 2 / 2021

http://www.journalesgia.com

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД В ПРИСКВАЖИННОЙ ЗОНЕ СРЕДНЕЭОЦЕНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТАРСДАЛЛЯР

Пашаев Н.В., Пашаева Ш.В.

Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности
AZ1010, Баку, Азербайджан, просп. Азадлыг, 34: namat.pashayev@mail.ru

A STUDY OF THE STRESS STATE OF ROCKS IN THE NEAR-WELLBORE ZONE OF THE MIDDLE EOCENE SEDIMENTS IN THE TARSDALLAR DEPOSIT

Pashayev N.V., Pashayeva Sh.V.
Azerbaijan State Oil and Industry University
34, Azadlig ave., Baku, Azerbaijan, AZ1010: namat.pashayev@mail.ru

Keywords: *lateral pressure, radial and azimuthal stress, wellbore zone, drilling mud, temperature stress*

Summary. The goal of geophysical well logging (GWL) is to assess the physical properties of rocks composing the studied section.

The solution of this problem is complicated by the fact that the properties of rocks in the wellbore zone differ from the unaltered part of the rock mass as a result of mechanical collapse of rock integrity during the drilling, redistribution of tension in the wellbore zone, and the formation of a permeable zone as a result of absorption of drilling mud into the reservoir. The research depth of most GWL methods does not extend beyond the limits of the permeability zone. The permeability zone differs from the unaltered part of the formation (beyond the wellbore wall) due to its physical properties. They affect the readings of GWL methods, distorting them in comparison with the results of measurements on models of homogeneous media. In this sense, it is of considerable interest to assess the stress state of rocks near the wellbore and the impact of this state on the physical characteristics of the rocks.

The paper provides recommendations on the necessity of stress state accounting of the near-wellbore zone to reduce errors in the quantitative interpretation of GWL data and to obtain reliable results. The analytical calculations of stresses are carried out to assess changes in the stress state of rocks in the near-wellbore zone over time. A numerical implementation of the approach and examples comparing the proposed approach with practical examples are given.

© 2021 Earth Science Division, Azerbaijan National Academy of Sciences. All rights reserved.

Введение

В каждом массиве горных пород существует поле естественных напряжений. Оно в основном обусловлено действием силы тяжести и тектоническими силами.

Необходимость изучения естественных напряжений обуславливается их существенным влиянием на устойчивость горных пород и их физико-механическими свойствами (Knez, 2014; Shiming He et al., 2017).

Строгая зависимость между величиной всестороннего напряжения и геостатической нагрузкой наблюдается лишь в песчано-глинистых породах, в то время как в других породах отмечаются случаи наличия значительных горизонтальных напряжений, иногда превосходящих вертикальные (Савич и др., 1969; Манаков, 2014). Это связано с остаточными напряжениями в породах, обусловленными взаимодействием горного и пластового давлений. Если допустить, что напряженно-деформационное состояние горных пород всецело зависит от внешней нагрузки, т.е. от геостатического давления, то здесь следовало бы ожидать постоянства порового давления, чего на самом деле не бывает (Гусейн-заде и др., 1992; Сейтмуратов и др., 2014). Особый интерес в этом плане с точки зрения промысловой геофизики и бурения скважин представляет перераспределение напряжений.

Теоретические и методические аспекты

В окрестности скважин при вертикальной выработке кругового сечения скважины в среде возникают радиальные и азимутальные напряжения.

Следует отметить, что азимутальное и радиальное напряжения создают так называемый боковой распор, действующий на породы вблизи стенок скважины.

Величина бокового распора с момента выработки в массиве горных пород меняется во времени вследствие релаксационных процессов. Установившееся состояние напряженности в пласте наступает после вскрытия пласта через определенное время, зависящее от типа пород и в частности от степени их пластичности (Аксельрод, Пашаев, 1991; Ковалев, 2014).

В окрестностях нефтяных и газовых скважин одновременно с горным действует давление столба промывочной жидкости, пластового флюида, потока фильтрации и пр. Оценивая роль фильтрации, следует учесть обстоятельство, что с течением времени образуются зоны проникновения, создающие дополнительное напряжение, имеющее, скорее всего, кратковременный характер. Поэтому для данной задачи достаточно ограничиться рассмотрением избыточных напряжений, а также давления промывочной жидкости.

Вокруг заполненной жидкостью скважины радиальное и азимутальное распределение напряжений имеет вид (Савич и др., 1969; Коптев, 1971):

$$\sigma_r = \sigma_{cp} \cdot H \frac{\vartheta}{1-\vartheta}\left(1 - \frac{r_c}{R^2}\right) + \sigma_{\text{пж}} H_{\text{пж}} \frac{{r_c}^2}{R^2} \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_{cp} \cdot H \frac{\vartheta}{1-\vartheta}\left(1 + \frac{r_c}{R^2}\right) - \sigma_{\text{пж}} H_{\text{пж}} \frac{{r_c}^2}{R^2} \ , \quad (2)$$

где $H_{\text{пж}}$– высота столба промывочной жидкости, r_c – радиус скважины, R – текущий радиус, H – глубина скважины, ϑ – коэффициент Пуассона, $\sigma_{\text{пж}}$ – удельный вес промывочной жидкости.

Величины этих напряжений на стенках скважины зависят от глубины залегания пластов и удельного веса промывочной жидкости, используемой при бурении. Поэтому рассмотрение распределения напряжений в прискважинной зоне целесообразно проводить с учетом влияния этих факторов. Это необходимо в связи с тем, что количественные значения напряжений тесно связаны с величиной горного давления и свойствами промывочной жидкости (Аксельрод, Пашаев, 1991).

Практическая значимость

Количественная оценка влияния удельного веса промывочной жидкости и глубины залегания на упругое состояние среды осуществляется с использованием теоретических формул расчета (1) и (2) для конкретных геологических условий.

При выборе района исследования предпочтение отдавалось скважинам с наиболее полными каротажными и лабораторными данными. Исходя из этого, были отобраны вулканогенно-осадочные отложения среднего эоцена в Тарсдаллярском месторождении, расположенном в Среднекуринской впадине.

Проведенными в 1983 г. поисково-разведочными работами на площади было открыто нефтяное месторождение, являющееся на сегодняшний день единственным объектом разработки междуречья Куры и Габырры.

Оновным нефтегазоносным горизонтом здесь является средний эоцен, отложения которого представлены карбонатной и туфогенно-осадочной фацией.

Многообразие минерального состава вулканогенно-осадочных пород, сложность их пустотного пространства, представленного порами и кавернами разного размера, которые сообщаются между собой тонкими капилярами и трещинами, предопределили необходимость совместного анализа данных керна и результатов современных комплексов ГИС специфично для этого типа пород.

По данным ГИС и керна установлено, что в целом туфогенные породы среднего эоцена характеризуются пористостью, изменяющейся в пределах 1.5%-26.6%, карбонатностью от 0% до 25% и глинистостью от 11.6% до 29%. Известняки характеризуются наибольшей плотностью ($\delta_{\text{ср}}$=2.68 г/см^3) и наименьшей пористостью ($к_п$=4.9%). Они отличаются также высокими значениями скорости ($v_{\text{р}}^{\text{ср}} = 3240\text{м/сек}$). В разрезе среднего эоцена выделяются аргиллиты с более низкой плотностью ($\delta_{\text{ср}}$=2.23 г/см^3), открытой пористостью ($К_п$=15.5%), скоростью продольных волн 2700м/сек, относительной проницаемостью $0.001 \cdot 10^{-15}$м^2 и карбонатностью 50,76%.

Как показал анализ, среднеэоценовый туфогенный коллектор имеет здесь сложную структуру пустотного пространства, что обусловленно развитием различных по генезису пор и трещин. Общее пустотное пространство исследованных пород-коллекторов представлено, во-первых, первичными матричными межзерновыми порами; во-вторых, вторичными порами, образованными в результате аутигенного преобразования туфогенного материала, и, в третьих, сетью вторичных микро- и макротрешин, обеспечивающих фильтрационные свойства вулканогенно-осадочных пород.

Недостатком некоторых (несущих) основных методов ГИС является глубина исследования, которая не превышает десятков сантиметров. Принимая во внимание вышесказанное, учет напряженного состояния горных пород в прискважинной зоне является необходимым (Манаков, 2014).

Для количественной оценки влияния плотности промывочной жидкости и глубины залегания на поведение пород при условиях упругого состояния, используя теоретические формулы (1) и (2), произведены расчеты для среднеэоценовых отложений площади Тарсдалляр. На рис.1 представлено распределение напряжений в прискважинной зоне по двум скважинам на исследуемом месторождении.

Как следовало ожидать, увеличение удельного веса промывочной жидкости ведет к снижению влияния скважины и аномальное распределение напряжений несколько сглаживается. Например, в скважине № 5 при удельном весе промывочной жидкости $1.8 \cdot 10^3$кг/м^3 азимутальная и радиальная составляющие напряжений на стенках скважины для случая, когда $R/r_c=1$, соответственно равны значениям 51 и 45 МПа. На такой же глубине в скважине № 26 удельный вес промывочной жидкости равен $1.5 \cdot 10^3$кг/м^3, значения азимутальных и радиальных составляющих изменялись и составляли соответственно 58.5 и 37.5 МПа (табл.1)

Как видно, затухание прискважинных напряжений, приводящих к упругим деформациям, происходит достаточно быстро и на расстоянии 2-2.5 радиусов скважины ими уже можно пренебречь. В то же время в ближней зоне, т.е. в слое r_c - $2r_c$, напряжения могут быть значительными. По мере удаления вглубь массива напряжение σ_θ уменьшается, а σ_r увеличивается, асимптотически приближаясь к σ_θ и σ_r в ненарушенном массиве. Таким образом, мощность кольца повышенных напряжений вокруг скважины практически составляет примерно два радиуса скважины.

Согласно приведенным расчетам, было также установлено, что общая тенденция увеличения концентрации напряжений с глубиной усложняется неоднородностью строения массивов и известным явлением концентрации напряжений вокруг скважин. Возрастание величины напряжений с глубиной в общем случае пропорционально горному давлению, однако характер этого изменения в пласте в радиальном направлении от стенки скважины вглубь массива имеет более резкий характер для больших глубин (рис. 1).

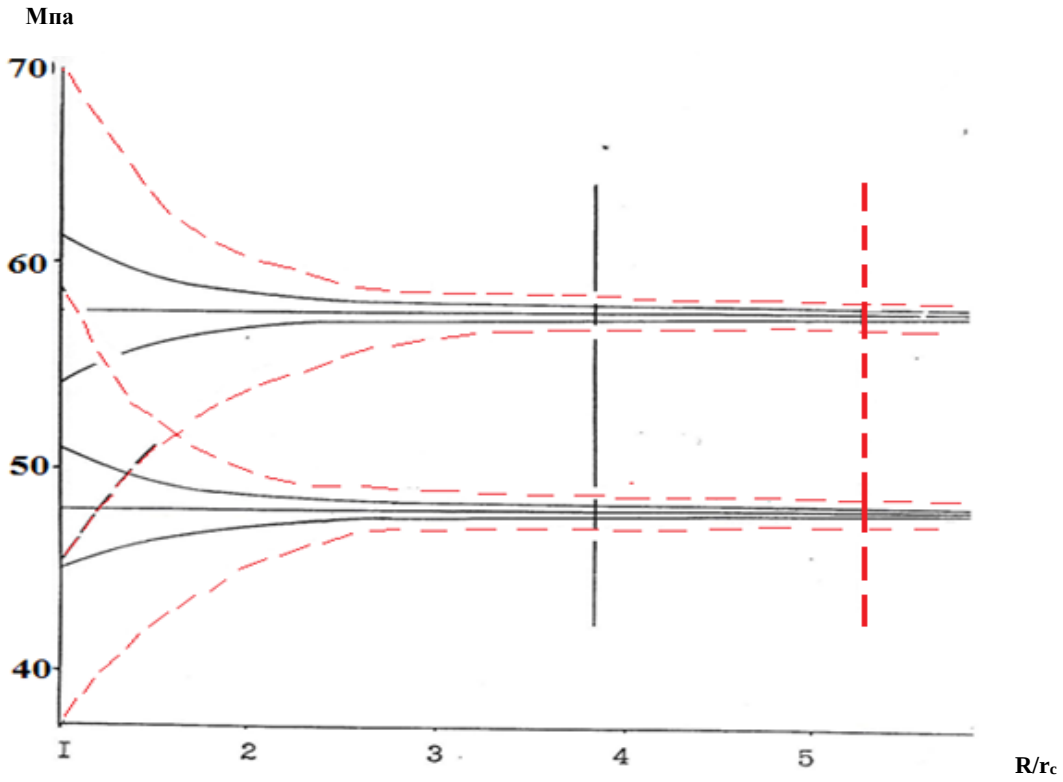


Рис. 1. Распределение напряжений в прискважинной зоне:
вертикальные линии показывают границы аномальной зоны для соответствующих значений удельного веса промывочной жидкости

_ _ _ - при $\sigma_{пж}= 1.5*10^3$ кг/м^3 (скв. №26)

____ - при $\sigma_{пж}= 1.8*10^3$ кг/м^3 (скв. №5)

Таблица 1

Площадь Тарсдалляр								
Скважина №5, $\delta_{ПЖ} = 1.8 \cdot 10^3$кг/м^3					Скважина №26, $\delta_{ПЖ} = 1.5 \cdot 10^3$кг/м^3			
$\frac{R}{r_c}$	H=2500 м		H=3000 м		H=2500 м		H=3000 м	
	σ_r(МПа)	σ_θ(МПа)	σ_r(МПа)	σ_θ(МПа)	σ_r(МПа)	σ_θ(МПа)	σ_r(МПа)	σ_θ(МПа)
1	45.00	51.00	54.00	61.20	37.50	58.50	45.00	70.20
2	47.25	48.75	56.70	58.50	45.37	50.63	54.45	60.75
3	47.65	48.35	57.17	58.02	46.81	49.17	56.17	59.01
4	47.81	48.18	57.37	57.82	47.34	48.66	56.81	58.39
5	47.88	48.12	57.45	67.74	47.58	48.42	57.09	58.10
6	47.97	48.08	57.50	57.69	47.71	48.28	57.26	57.94

Помимо этих напряжений, у стенки скважины могут возникать дополнительные напряжения, появляющиеся из-за разности температур породы и циркулирующей промывочной жидкости.

Разность температур между стенками скважины и массивом горных пород во время проведения геофизических исследований скважин (ГИС) возрастает с увеличением глубины скважины и в основном зависит от литологической характеристики разреза и технологии бурения (рис. 2).

В приведенном на рис. 2 примере по месторождению Тарсдалляр точка инверсии температур отмечается на глубине около 100 м, причем разность температур повышается с глубиной и на глубине 2500 м становится равной 45°С.

Известно, что разница температур в пласте и стволе скважины на отдельных месторождениях достигает 50°С, что обуславливает неравномерность теплового поля в прискважинной зоне. При оценке температурных напряжений можно допустить, что напряжения будут возникать только от радиального перепада температур. С целью количественной оценки влияния температурных напряжений произведены расчеты для конкретных геологических условий по площади Тарсдалляр, где разность температур при неустановившемся и установившемся термическом режиме, как было отмечено выше, достигает 45°С. Результаты исследований приведены на рис. 3 и табл. 2.

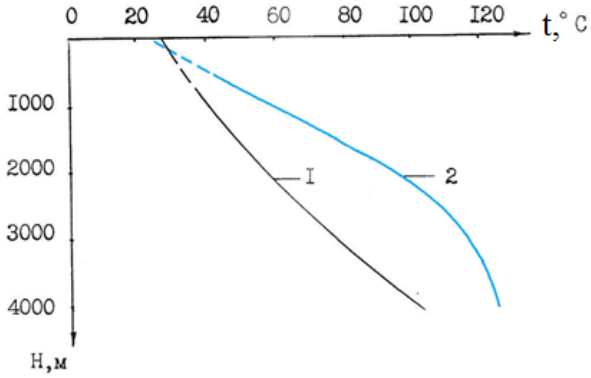


Рис. 2. Геотермическая характеристика разреза (пл. Тарсдалляр, скв. № 4):
1 – замеры при неустановившемся термическом режиме;
2 – замеры при установившемся термическом режиме.

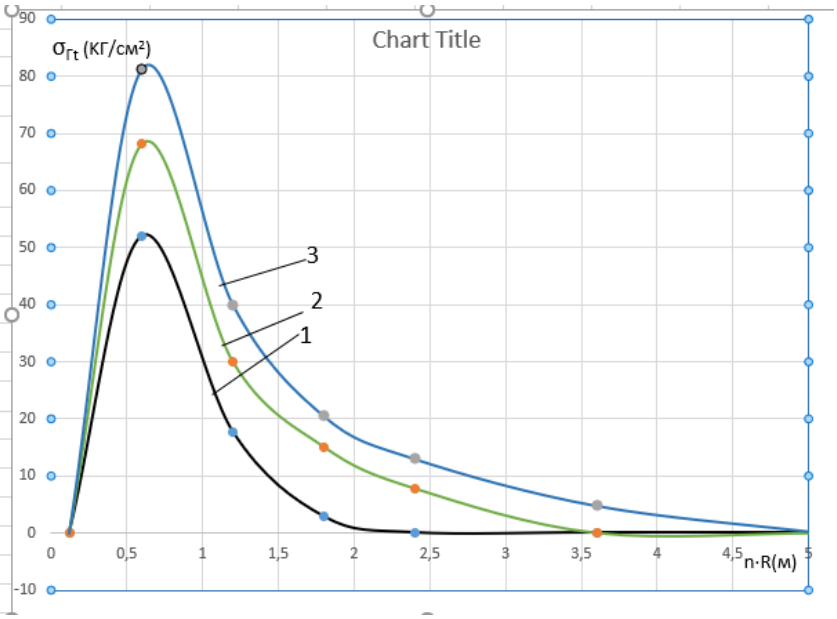


Рис. 3. Изменение температурного напряжения в радиальном направлении (пл. Тарсдалляр, скв. № 4): 1 – τ_1=30 суток; 2 – τ_2=60 суток; 3 – τ_1=90 суток

Таблица 2

Площадь Тарсдалляр (скв. № 4)							
№	n · R	σ_{rt} (КГ/ см^2)					
		τ_1=30	Γ_1=2.4	τ_2=60	Γ_2=3.6	τ_3=90	Γ_3=5.1
1	0.12	0.0		0.0		0.0	
2	0.60	52.0		68.2		81.2	
3	1.2	17.7		28.5		35.8	
4	1.8	2.9		15.1		21.9	
5	2.4	0.0		7.8		15.7	
6	3.6	0.0		0.0		4.8	
7	5.1	0.0		0.0		0.0	

Выводы

1. Увеличение удельного веса промывочной жидкости ведет к снижению влияния выработки, и аномальное распределение напряжений несколько сглаживается.
2. Расчеты показывают, что затухание прискважинных напряжений, приводящих к упругим деформациям, происходит достаточно быстро и на расстоянии 2-2.5 радиусов скважины ими уже можно пренебречь. В то же время в ближней зоне, т.е. в слое $r_c - 2r_c$ напряжения могут быть достаточно значительными. По мере удаления вглубь массива σ_θ уменьшается, σ_r увеличивается, асимптотически приближаясь к σ_θ и σ_r в ненарушенном массиве.
3. Согласно расчетным данным и с учетом того, что разрез подвергался промывке в течение 30, 60 и 90 суток, радиус зоны нарушения термического режима в скважинах на глубине 2500 м составляет соответственно 2.4 м; 3.8 м и 5.1 м.
4. Величина радиального напряжения вначале резко возрастает от нуля на поверхности стенки скважины до максимума (52.2; 58.2 и 81.2 *100 кг/м^2 соответственно) на расстоянии одного радиуса скважины от ее стенки, а затем медленно уменьшается в том же направлении.

Оценка характера напряженного состояния пород в прискважинной зоне дала возможность показать характер распределения напряжений в прискважинной зоне в процессе бурения скважин, что позволит выбрать режим бурения в зонах развития аномальных давлений.

ЛИТЕРАТУРА

Аксельрод С.М., Пашаев Н.В. Приведение скорости продольных волн, измеряемой при акустическом каротаже, к условиям ненарушенного массива пород. В: Тематический сборник научных трудов, Баку, 1991, с. 19-24.

Гусейн-заде О.Д., Шилов Г.Я., Гусейн-заде Н.О., Есипов Ю.М., Халиков Ч.И. Геостатическое давление и вопросы напряженно-деформационного состояния горных пород в условиях проявления современных движений земной коры на нефтегазовых месторождениях. Нефть и газ, Баку, No. 5-6, 1992, с. 8-13.

Ковалев А.Л. Фильтрационно-прочностной расчет окрестности ствола вертикальной скважины с использованием критерия пластичности Друкера-Прагера. В научно-техническом сборнике: Вести газовой науки, No. 2 (18), 2014, с. 36-43.

Коптев В.И. Распределение скоростей в окрестности цилиндрических выработок в связи с их напряженным состоянием. Труды гидропроекта, Сборник 21, Инженерная геофизика, 1971, с. 41-60.

Манаков А.В. Совместное моделирование геомеханических и фильтрационных процессов в прискважинной зоне. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Новосибирск, 2014, 146 с.

Савич А.И., Коптев В.И., Никитин В.Н., Ященко З.Г. Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород. Недра. Москва,1969, 239 с.

Сейтмуратов А.Ж., Умбетов У., Махамбаева И.У. Методика расчета напряженно-деформированного состояния горного массива вокруг открытых и подземных выработок. Наука и мир, No. 3(7), Т. 1, 2014, с. 200-207.

REFERENCES

Akselrod S.M., Pashaev N.V. Correction the P-wave velocity measured in acoustic logging to undisturbed bedrock conditions. In: Thematic collection of scientific papers, Baku, 1991, pp. 19-24 (in Russian).

Gusein-zade O.D, Shilov G.Ya., Gusein-zadeh N.O., Esipov Yu.M., Khalikov Ch.I. Geostatic pressure and rock stress-strain issues in the context of contemporary crustal movements in oil and gas fields. Oil and Gas, Baku, No. 5-6, 1992, pp. 8-13 (in Russian).

Knez D. Stress state analysis in aspect of wellbore drilling direction. Arch. Min. Sci., Vol. 59, No. 1, 2014, pp. 71-76.

Kovalev A.L. Filtration and strength calculation of the vicinity of a vertical wellbore using the Drucker-Prager plasticity criterion. In scientific and technical collection: Vesti Gazovoy Nauki, No. 2 (18), 2014, pp. 36-43 (in Russian).

Koptev V.I. Velocity distribution in the vicinity of cylindrical workings in relation to their stress state. Proceedings of Hydroproject, Collection 21, Engineering Geophysics, 1971, pp. 41-60 (in Russian).

Manakov A.V. Joint modeling of geomechanical and filtration processes in the near-wellbore zone. PhD thesis. Novosibirsk, 2014, 146 p. (in Russian).

Savich A.I., Koptev V.I., Nikitin V.N., Yashchenko Z.G. Seismoacoustic methods for studying rock massifs. Nedra. Moscow, 1969, 239 p. (in Russian).

Seitmuratov A.Zh., Umbetov U., Makhambaeva I.U. Methodology for calculating the stress-strain state of the rock mass around open and underground workings. Sci. and world, No. 3(7), Vol. 1, 2014, pp. 200-207 (in Russian).

Knez D. Stress state analysis in aspect of wellbore drilling direction. Arch. Min. Sci., Vol. 59, No. 1, 2014, pp. 71-76.
Shiming He, Jun Zhou, Ming Tang. Research on wellbore stress in under-balanced drilling horizontal wells considering anisotropic seepage and thermal effects. Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 45, 2017, pp. 338-367.

Shiming He, Jun Zhou, Ming Tang. Research on wellbore stress in under-balanced drilling horizontal wells considering anisotropic seepage and thermal effects. Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 45, 2017, pp. 338-367.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД В ПРИСКВАЖИННОЙ ЗОНЕ СРЕДНЕЭОЦЕНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТАРСДАЛЛЯР

Пашаев Н.В., Пашаева Ш.В.
Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности
AZ1010, Баку, Азербайджан, пр. Азадлыг, 34: namat.pashayev@mail.ru

Резюме. Целью геофизических исследований скважин (ГИС) является оценка физических характеристик горных пород, слагающих изучаемый разрез. Решение данной задачи усложняется тем, что свойства пород в прискважинной зоне могут существенно отличаться от таковых в неизменной части массива вследствие механического нарушения сплошности пород в процессе бурения, образования зоны проникновения за счет фильтрата промывочной жидкости в пласт-коллектор, перераспределения существовавших ранее в массиве горных пород напряжений вблизи скважины. Глубинность исследования большинства методов ГИС (в частности акустические, радиоактивные и другие виды несущего каротажа) в основном не выходит за пределы зоны проникновения. Зона проникновения отличается по физическим характеристикам от неизмененной (удаленной от стенки скважины) части пласта. Они влияют на показания методов ГИС, искажая их по сравнению с результатами измерений на моделях однородных сред. В этом смысле значительный интерес представляет оценка напряженного состояния пород в прискважинной зоне и влияние этого состояния на значения физических характеристик горных пород. Установлено, что влияние азимутальных, радиальных и температурных напряжений на физические свойства горных пород в прискважинной зоне доходит до максимума; отходя от стенки скважины вглубь массива, это влияние приближается к минимуму. В качестве объекта исследования выбраны отложения среднеэоценового возраста вулканогенно-осадочных пород месторождения Тарсдалляр, расположенного в Среднекуринской впадине. Эта формация, которая представлена карбонатной и туфогенно-осадочной фацией, сильно отличается по нефтегазоносности от других. В данной статье с целью уменьшения погрешности количественной интерпретации материалов ГИС и для получения достоверных результатов даны рекомендации о необходимости учета напряженного состояния прискважинной зоны. Проведены аналитические расчеты напряжений, позволяющие оценить изменения напряженного состояния горных пород в прискважинной зоне во времени. Дана численная реализации подхода и приведено сравнение предлагаемого подхода на практических примерах.

Ключевые слова: *боковой распор, радиальные и азимутальные напряжения, прискважинная зона, промывочная жидкость, температурные напряжения*

TƏRSDƏLLƏR YATAĞININ ORTA EOSEN ÇÖKÜNTÜLƏRİNDƏ QUYUYANI ZONADA SÜXURLARIN GƏRGİNLİK VƏZİYYƏTİNİN TƏDQİQİ

Paşayev N.V., Paşayeva Ş.V.
Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti
AZ1010, Bakı, Azərbaycan, Azadlıq prospekti, 34: namat.pashayev@mail.ru, sh73.73@mail.ru

Xülasə. Quyuların geofiziki tədqiqində (QGT) məqsəd əsasən quyu kəsilişlərində süxurların fiziki xarakteristikalarının qiymətləndirilməsindən ibarətdir. Qazıma prosesində süxurların bütövlüyünün mexaniki təsirdən dağılması, quyuyanı zonada gərginliyin yenidən paylanması, kollektor laylara qazıma məhlulunun hopması nəticəsində keçirmə zonasının yaranması kimi səbəblərdən quyuyanı zonada süxurların xassələrinin süxur massivinin dəyişilməmiş hissəsinə nəzərən fərqləndiyindən tərs məsələnin həlli mürəkkəbləşir. QGT-nin əksər üsullarının tədqiqat dərinliyi keçirmə zonası hüdudundan kənara çıxmır. Xüsusilə kiçik tədqiqat radiusuna malik olan radioaktiv, akustik və digər karotaj üsulları ilə həll edilən məsələlərin səhihlik dərəcəsi qənaətbəxş olmur. Keçirmə zonası isə fiziki xarakteristikalarına görə layın dəyişilməmiş hissəsindən (quyu divarından daha kənarda) fərqlənir. Onlar QGT üsullarının nəticələrinə təsir göstərir, nəticələr bircinsli mühit modelində ölçülmüş nəticələrlə müqayisədə təhrif olunur. Müəyyən edilmişdir ki, quyuyanı anomal zonada süxurların fiziki xassələrində anizotropiyalıq müşahidə edilir. Bu mənada quyuyanı zonada süxurların gərginlik vəziyyətlərinin qiymətləndirilməsi və mövcud durumun süxurların fiziki xarakteristikalarına təsirinin nəzərə alınması böyük maraq kəsb edir. Süxurların fiziki xassələrinə keçirmə zonasında azimutal, radial və temperatur gərginliklərinin təsiri maksimal həddə valik olduğu halda, quyu divarından süxur massivinə doğru bu təsir minimum həddə yaxınlaşır və süxurun pozulmamış hissəsinə bərabər olur. Tədqiqat obyekti kimi Orta Kür çökəkliyində yerləşən Tərsdəllər yatağının vulkanogen-çökmə mənşəli süxurlarla təmsil olunan Orta Eosen yaşlı çöküntüləri seçilmişdir. Bu formasiya əsasən tuflu və karbonatlı süxurlarla təmsil olunur və neftqazlılığına görə digər formasiyalardan kəskin fərqlənir. Məqalədə QGT materiallarının kəmiyyət interpretasiyası zamanı xətaların azaldılması və daha səhih nəticələrin alınması üçün quyuyanı zonanın gərginlik vəziyyətinin qiymətləndirilməsi və nəzərəalma labüdlüyü üçün tövsiyələr verilmişdir. Quyuyanı zonada zamandan asılı olaraq gərginliyin dəyişilməsini şərtləndirən analitik hesablamalar aparılmışdır. Təklif edilən yanaşmanın ədədi reallaşdırılması ilə yanaşı, həm də qiymətləndirmənin nəticələrinə görə müqayisə üçün praktiki nümunələr verilmişdir.

Açar sözlər: *yan təzyiq, radial və azimutal gərginliklər, quyuyanı zona, qazıma məhlulu, temperatur gərginliyi*

ANAS Transactions Earth Sciences 2 / 2021

http://www.journalesgia.com

ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ УСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ АЗЕРБАЙДЖАНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

Исрафилов Ю.Г., Гусейнов Т.П.

Институт геологии и геофизики НАНА
AZ1143, г. Баку, просп. Г.Джавида, 119: yusifisrafil@gmail.com, t.ariel.huseynov@gmail.com

CHALLENGES AND SUSTAINABLE WATER MANAGEMENT IN AZERBAIJAN REPUBLIC

İsrafilov Yu.G., Huseynov T.P.
Institute of Geology and Geophysics, Azerbaijan National Academy of Sciences
119, H.Javid Ave., Baku, Azerbaijan, AZ1143

Keywords: *water, resources, reserves, accounting, sustainable development, transboundary facilities, general scheme*

Summary. The development of economy and social sector under the conditions of deficit of water resources balance restricts the evolutional development of all branches of the national economy of the Azerbaijan Republic. The genesis of water resources within the republic has the infiltration origin and is the dynamic system of the upper part of the hydrosphere. With a large deficit of the republic's water balance (more than 10 km^3 per year), the use of water resources in agriculture is carried out by ancient methods, namely, in bulk. At the same time, huge losses of the fresh water deficit occur during the infiltration; in average, the amount of losses is over 50% of the irrigation intake. Based on the fact, that out of 80% of the republic's water resources, used in the agricultural production losses amount about 50-60%, i.e. 40% of the used resources, urgent implementation of modern highly economical irrigation methods in agricultural production is required along with the elimination of losses during transportation which in turn will save according to preliminary calculations about 6-8 km^3 / year of water and will sharply reduce the deficit of the republic water balance. The paper analyzes the structure of resources of the surface and groundwaters, shows the state of knowledge of their resources and operational reserves, their dependence on transit from the neighboring territories, climate change, production accounting, etc. The ways and priority measures of the sustainable development and protections of fresh and slightly saline water resources are substantiated in the light of the development of the "National Strategy of the rational use of water resources of the Azerbaijan Republic".

© 2021 Earth Science Division, Azerbaijan National Academy of Sciences. All rights reserved.

Актуальность проблемы. Ресурсы пресных вод, формирующиеся в пределах Азербайджанской Республики, незначительны. Общий водохозяйственный баланс за многолетие составляет порядка 30 $км^3$ в год с дефицитом более 10 $км^3$ в год. Большая часть территории характеризуется аридным климатом со скудными осадками и высокой степенью испарения, на ней сельскохозяйственное производство невозможно без искусственного орошения. Современное состояние водообеспеченности всех отраслей народного хозяйства республики даже с учетом трансграничных вод, поступающих к нам с территории соседних государств, очень напряженное – наблюдается острый дефицит кондиционной воды. Развитие сельскохозяйственного производства и, как следствие, продовольственная безопасность, развитие промышленного производства, а значит и экономики в целом, водообеспечение социальных сфер невозможны без обеспечения их кондиционной водой. Таким образом, водный фактор является определяющим в настоящее время, а также в прогнозируемом развитии экономики и благосостояния республики (Alizadeh et al., 2017; Исрафилов, 2014; Israfilov, 2013; Рустамов, Кашкай, 1978; 1988).

В связи с возникшими проблемами в водоснабжении всех отраслей народного хозяйства республики указом Президента АР от 27 июня 2020 года утвержден «План мероприятий на 2020-2022 годы по обеспечению рационального использования водных ресурсов республики». В «Плане мероприятий» поручено разработать «Проект Национальной Стратегии по рациональ-

ному использованию водных ресурсов республики». В связи с важностью проблемы авторы статьи представляют для широкого обсуждения результаты своих исследований в данной области.

1. Структура водных ресурсов Азербайджана

Водные ресурсы республики формируются в верхней части гидросферы и слагаются из пресных и слабосолоноватых поверхностных (речных) и инфильтрационных подземных вод.

Поверхностные водные ресурсы – это главным образом речной сток, сформированный из атмосферных осадков в результате таяния ледников и частично из трещинно-жильных вод горных областей. Общий средний годовой сток рек республики в среднем за год по многолетним данным (с 50% обеспеченностью) составляет порядка 30.0-32.0 км^3 в год (в маловодные годы уменьшаясь до 28 км^3 в год), из которых только 9.0-10.0 км^3/год формирует местный речной сток (менее 30%). По основным рекам Азербайджана – Кура, Араз, Самур с учетом их притоков – в пределы республики поступает порядка 70% от общих ресурсов речных вод. Важно отметить, что согласно требованиям охраны окружающей среды, из общего речного стока часть его обязательно должна расходоваться на экологические, санитарные и другие цели. То есть этот объем воды должен проходить транзитом по руслам рек и стекать в Каспийское море, однако до настоящего времени величина этих попусков не определена (İmanov, Ələkbərov, 2017; Иманов, 2000).

Подземные водные ресурсы – это месторождения пластово-поровых вод предгорных равнин и низменностей, широко используемые в народном хозяйстве. Из 10 месторождений подземных вод четыре являются трансграничными (Губа-Хачмасское, Шеки-Загатальское, Лянкяранское и Нахчыванское). Гораздо в меньшей степени изучены трещинно-жильные воды горных областей, используемые посредством каптирования родникового стока. До настоящего время их региональные запасы не исследовались. Здесь следует отметить, что пресные подземные воды являются единственными в мире полезными ископаемыми, которые при грамотной и научно-обоснованной эксплуатации восполняют свои запасы и являются практически неисчерпаемыми.

Главными трансграничными реками являются Кура, Араз и Самур, а с учетом их притоков всего насчитывается 21 река. Каких-либо международных (под эгидой ООН) юридических соглашений по паритетному и рациональному использованию водных ресурсов с соседними республиками – Грузией и, естественно, Арменией – не существует. Имеется только договор между ОАО «Мелиорация и водное хозяйство» и Минводхозом России о паритетном (50:50%) использовании воды трансграничной реки Самур, а также постоянно действующая Ирано-Азербайджанская Комиссия по совместному использованию водных и энергетических ресурсов р. Араз. Воды рек Кура, Араз, Охчу поступают в пределы республики в очень загрязненном состоянии.

Одними из структурных элементов, формирующих водохозяйственный баланс республики, являются водохранилища, регулирующие речной сток в течение гидрологического года. По данным (Əhmədzadə, Həşimov, 2016) в настоящее время функционируют 58 крупных водохранилищ с полезными объемами от 10 до 15730 км^3 и 43 мелких водохранилищ с объемами менее 1.0 млн. км^3. Общая емкость всех водохранилищ составляет 25500 млн. км^3.

Генезис водных ресурсов республики инфильтрационный и является динамичной системой верхней части гидросферы (Alizadeh et al., 2017). Поверхностные воды непосредственно зависят от климатических особенностей, в то время как подземный сток в меньшей степени по времени и величине реагирует на воздействия климата. Глобальное изменение климата, происходящее в последние годы, общеизвестно, и невозможно не учитывать этот фактор. По данным Ф. Иманова, в настоящее время уже наблюдается уменьшение количества осадков порядка на 15% (Иманов, 2000).

Из приведенных выше сведений о структуре ресурсов пресных вод республики вытекает пять важных факторов:

– более двух третей ресурсов (70%) пресных вод поступают в республику из соседних стран и являются трансграничными;

– значительная часть этих вод поступает в пределы республики в загрязненном состоянии;

– ресурсы поверхностных вод непостоянны во времени и зависят от водности года, то есть от климатических факторов;

– регулирование местного речного стока посредством русловых и внерусловых водохранилищ является приоритетным в целях уменьшения напряженности водохозяйственного баланса республики;

– подземные воды, как правило, характеризуются высоким качеством, лучше защищены от загрязнения, их ресурсы значительно меньше зависят от водности различных лет, на значительных площадях они являются единственными источниками водоснабжения.

2. Современное состояние использования водных ресурсов

Основными водопользователями водных ресурсов республики являются ОАО «Мелиорация и водное хозяйство», использующее порядка 75% общих водных ресурсов республики, и ОАО «Азерсуканал», обеспечивающее питьевой водой население республики, используя порядка 15% ресурсов. Таким образом, на остальные производственно-технические нужды используется около 10%. Проблемами использования водных ресурсов занимаются также Министерство экологии и природных ресурсов (которое утверждает запасы и дает разрешение на спецводопользование) и Министерство по чрезвычайным ситуациям (которое контролирует целевое использование водных ресурсов). Каждая из этих структур работает по собственной индивидуальной программе.

В настоящее время эксплуатационные запасы поверхностных (речных) вод неизвестны, так как не утверждены обязательные экологические (санитарные) попуски по основным рекам: Кура, Араз и Самур. Неизвестны также эксплуатационные запасы месторождений подземных вод, их расчетный амортизационный срок (10000 суток или 27,5 лет) истек в 2007 году. Прежние запасы были рассчитаны (с 1970 по 1980 гг. по 10 месторождениям, по одному в год) для условий работы водозаборов в стационарном стабильном режиме и использования вод в питьевом водоснабжении. Фактически же подавляющая часть водозаборов работала в рванном режиме в вегетационный период полива сельхозугодий, в данном случае запасы должны были рассчитываться по другой методике. В результате, по отдельным месторождениям подземных вод (Гарабахском, Мильском, Нахчыванском) объем добычи подземных вод превышал их утвержденные запасы в 2-3 раза (Алиев, Мусаев, 1991; Israfilov, 2007), а фактические режимные данные по уровням, количественным и качественным параметрам подземных вод не указывали на их истощение.

Добыча подземных вод осуществляется многочисленными государственными и частными водопользователями, в основном субартезианскими скважинами, количество которых в настоящее время неизвестно (в начале века более 20000 скважин), также частично используются кяризы и колодцы. Подавляющей частью водозаборы не оснащены счетчиками производительности, поэтому количество добычи и использования подземных вод в республике фактически неизвестно. Иные ориентировочные методы подсчета объемов добычи водозаборов не могут быть приняты к использованию, так как приводят к огромным погрешностям. Вместе с тем с учетом платного водопользования, решение проблемы достоверного учета эксплуатации водных ресурсов является одной из приоритетных задач в республике.

Без достоверных данных по эксплуатационным запасам и количеству использования вод невозможно их рациональное потребление и охрана.

При большом дефиците водохозяйственного баланса республики (более 10 км^3 в год) использование водных ресурсов в сельском хозяйстве осуществляется древними методами, а именно наливами. При этом, начиная от водозабора, по каналам первого и последующего порядков, а также на самих орошаемых площадях происходят огромные потери дефицитных пресных вод на инфильтрацию, величина которых по осредненным данным составляет более 50% от водозабора. Исходя из того, что из 80% водных ресурсов республики, используемых в сельхозпроизводстве, потери составляют порядка 50-60%, 40% используемых ресурсов ежегодно мы попросту теряем по своему невежеству. Требуется неотложное внедрение в сельхозпроизводство современных высокоэкономичных методов орошения, давно применяемых во многих странах мира с засушливым климатом, например, в Израиле (Орловский, Зонн, 2018). Переход на современные водосберегающие технологии орошения, такие как капельное, спринклерное, дождевальное, аэрозольное и другие (в зависимости от вида сельхозкультуры), наряду с устранением потерь при транспортировке сэкономит по предварительным расчетам порядка 6-8 км^3/год воды и резко сократит дефицит водохозяйственного баланса республики.

Аналогичная проблема существует и в подземных коммуникациях питьевого водоснабжения («Азерсуканал»), где наблюдаются такие же потери (более 50%) вод в водопроводных сетях. Например, из порядка 30 м^3/с вод, подаваемых на Абшеронский полуостров всеми видами водопроводов, утечки из подземных коммуникаций превышают более 50% от водоподачи. Это огромные потери, сопоставимые с тремя Огуз-Габалинскими водопроводами.

Отдельной проблемой является использование трансграничных поверхностных и подземных водных ресурсов**.** Среди государств Южного Кавказа только Азербайджан присоединился и ратифицировал Хельсинскую Конвенцию ЕЭК ООН (1992 г.) по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер. Для достижения определенных результатов в области устойчивого использования воды Азербайджан пытается строить свои взаимоотноше-

ния со странами бассейнов трансграничных рек именно на основе этой Конвенции. Взаимоотношения между Азербайджаном и Грузией по использованию водных ресурсов трансграничных рек, в частности рек Кура, Храм, Алазань (Ганых) и других, регулируются на основании двухсторонних ведомственных соглашений. Между Азербайджаном и Ираном создана постоянно действующая Ирано-Азербайджанская Комиссия по совместному использованию водных и энергетических ресурсов р. Араз. С Республикой Дагестан (РФ) совместно используются водные ресурсы пограничной реки Самур на основании Протокола бывшего Минводхоза СССР от 7 октября 1967 года, **однако подземные воды в данном документе не указаны.** Вместе с тем еще в советское время по настоянию сопредельной стороны был законсервирован 3-й Бакинский водозабор подземных вод, берущий начало в районе Ялама. Причина: по ничем не обоснованному мнению, работа данного водозабора «может» повлиять на гидро-геоэкололологические условия сопредельной территории, хотя специальных исследований по данному вопросу не проводилось. Следует отметить также возможность возникновения осложнений в районе работы Огуз-Габалинского водозабора подземных вод, также являющегося трансграничным с Грузией. Выше отмечалось, что стоки рек Кура и Араз поступают в пределы республики в сильно загрязненном состоянии. Общий сброс неочищенных трансграничных вод Грузии и Армении на территорию Азербайджана по оценкам специалистов составляет порядка 470 млн. $м^3$ в год. Таким образом, фактор трансграничных водных ресурсов является одним из определяющих в устойчивом обеспечении республики кондиционной водой, и сложившаяся в этом аспекте ситуация увеличивает напряженность водохозяйственного баланса республики.

3. Первоочередные мероприятия по решению проблем дефицита и устойчивого использования водных ресурсов республики

– В первую очередь необходимо провести инвентаризацию всех государственных, ведомственных, частных и прочих поверхностных и подземных водозаборов; организовать регулярный государственный учет объемов добычи и использования вод в отраслях народного хозяйства республики. Все водозаборы обязательно должны быть оснащены оборудованием (счетчиками) по учету используемых вод. Общий учет добычи и использования водных ресурсов республики должен производить независимый государственный орган.

– В ближайшее время Министерству экологии и природных ресурсов необходимо выявить и утвердить современные эксплуатационные запасы подземных и поверхностных вод республики.

– ОАО «Мелиорация и водное хозяйство» необходимо разработать и внедрить Государственную Программу по использованию в сельхозпроизводстве современных водосберегающих технологий орошения сельхозугодий с учетом современных реалий состояния фермерских хозяйств республики. В условиях частного землепользования и платного водопользования использование указанных дорогостоящих технологий не под силу единоличному землепользователю. Для этого нужно объединяться в крупные хозяйства, брать у государства кредиты, обеспечить надежный маркетинг реализации будущей продукции, страховать ее и т.д. и т.п. Решить данную проблему возможно только с помощью государства на базе разработанной конкретной программы.

– ОАО «Азерсуканал» должно устранить утечки из водопроводных сетей питьевого водоснабжения, что позволит сохранить огромные объемы пресных вод и полностью ликвидировать дефицит водных ресурсов республики.

– Развитие регулирования речного стока наиболее перспективно в Гарабахском экономическом районе, а также на Джебраильской и Лянкяранской предгорных равнинах. Особо следует отметить строительство мелких внерусловых водохранилищ в бассейне реки Кура ниже створа Мингячевирского водохранилища, что позволит устранять периодически возникающие наводнения в этом регионе.

– Решение трансграничных проблем использования водных ресурсов также необходимо вывести на государственный уровень. В данном случае первоочередной проблемой является согласование с Российской Федерацией (Дагестан) возможность использования построенного еще в советское время, но законсервированного 3-го Бакинского водозабора подземных вод, начало которого находится в районе г. Ялама. Это позволит удовлетворить все потребности в воде Абшеронского Агропромышленного комплекса.

– Рациональное использование ресурсов общей гидросферы республики возможно только при условии разработки единой «**Генеральной Схемы Комплексного Использования и Охраны Водных Ресурсов Азербайджанской Республики».** В разработке данной «Генеральной Схемы» должно участвовать множество научно-исследовательских и проектных организаций, так как необходимо оценить современные параметры природных, сельскохозяйственных, мелиоратив-

ных, гидролого-гидрогеологических, гидротехнических, экономических, статистических и прочих широкого спектра показателей, прогнозировать изменения их во времени и влияние их на среду, обосновать внедрение современных технологий и решить множество других проблем. Поэтому целесообразно разработку «Генеральной Схемы» осуществить под руководством Национальной Академии наук Азербайджана с привлечением всех профильных ведомственных научно-исследовательских организаций республики. Данная «Генеральная Схема» должна определить водную политику по управлению и устойчивому развитию рационального использования и охраны ресурсов пресных вод республики с учетом всех приведенных выше проблем.

– И самое главное, управление всем водным хозяйством республики, начиная от водных источников, водозаборов до подачи воды потребителям, мониторинг, осуществление мероприятий по их охране и устойчивому развитию и в целом всей водной политики наиболее оптимально производить из Единого Государственного Органа типа Азнефть – «АзСу». Наличие единой согласованной контрольно-наблюдательной метео-гидролого-гидрогеологической сети, охватывающей всю гидросферу, с единой системой водозаборов, водопроводов и гидротехнических сооружений (вне зависимости от их ведомственных принадлежностей) позволит осуществлять действенный контроль за ресурсами и использованием вод, оптимальное вододеление по водохозяйственным бассейнам и системам, а при чрезвычайных ситуациях (наводнения, паводки и прочее) – оперативно прогнозировать последствия и разрабатывать конкретные мероприятия.

Осуществление комплекса приведенных выше мероприятий позволит обеспечить потребности в кондиционной пресной воде всех отраслей народного хозяйства и наладить устойчивое управление водным хозяйством республики.

ЛИТЕРАТУРА

Геология Азербайджана (под ред.Али-Заде Ак.А.). Том VIII – Гидрогеология и инженерная геология. Нафта-Пресс. Баку, 2008, 380 с.

Иманов Ф.А. Минимальный сток рек Кавказа. Нафта-Пресс. Баку, 2000, 299 с.

Исрафилов Ю.Г. Ресурсы подземных вод Азербайджана и перспективы их использования. Горный журнал, No. 8, Москва, 2020, с. 33-40.

Исрафилов Ю.Г. Водные ресурсы и суверенитет: проблемы и пути устойчивого управления водными ресурсами Азербайджанской Республики. В трудах 2-ой международной конференции по водным технологиям, Баку, 2014, с.64-68.

Исрафилов Ю.Г. К методике оценки эксплуатационных запасов подземных вод предгорных равнин Азербайджанской Республики. Изв. НАН Азербайджана. Науки о земле, No. 3, 2007, с. 22-26.

Исрафилов Ю.Г. Вода и государство. В научно-популярном журнале "Йер ве инсан", Изд. Шерг герб. Баку, 2013, с. 34-40.

Мансимов М.Р. и др. Первое национальное сообщение Азербайджана по Рамочной Конвенции ООН по изменению климата. Национальный Центр по Изменению Климата. Баку, 2000, 88 с.

Орловский Н.С., Зонн И.С. Водные ресурсы Израиля: Опыт освоения. Проблемы постсоветского пространства, Т. 5, No. 1, 2018, с. 8-36.

Оценка экологических и социально-экономических последствий изменения климата. Доклад Рабочей группы 2, МГЭИК, Гидрометеоиздат. С-Пб., 1992, 249 с.

Рустамов С.Г., Кашкай Р.М. Водный баланс Азербайджанской ССР. Елм. Баку, 1978, 109 с.

Рустамов С.Г., Кашкай Р.М. Водные ресурсы Азербайджанской ССР. Элм. Баку, 1989, 181 с.

Alizadeh A.M., Guliyev I.S., Kadirov F.A., Eppelbaum L.V. Geosciences in Azerbaijan. Vol. II: Economic minerals and applied geophysics. Springer. Heidelberg – N.Y., 2017, 340 p.

Israfilov Y.G., Israfilov R.G. İmpacts of climate chance on groundwater resources: review of a case study in Azerbaijan.

REFERENCES

Aliyev F.Sh., Musayev N.A.. National water efficiency strategy 2020. The project. Funds of the Ministry of Ecology and Natural Resources of Azerbaijan Rehublic, 1991 (in Azerbaijani).

Alizadeh A.M., Guliyev I.S., Kadirov F.A., Eppelbaum L.V. Geosciences in Azerbaijan. Vol. II: Economic minerals and applied geophysics. Springer. Heidelberg – N.Y., 2017, 340 p.

Ahmadzade A.J., Hashimov A.J. Encyclopedia. Melioration and water economy. Radius. Baku, 2016, 631 p. (in Azerbaijani).

Assessment of ecological and social-economic climate change impacts. Report of the Working group 2. IPCC, Hydrometeoizdat. Sankt-Peterburg, 1992, 249 p. (in Russian).

Geology of Azerbaijan (Ali-Zadeh Ak.A., ed.). Vol. VIII – Hydrogeology and engineering geology. Nafta-Press. Baku, 2008, 380 p. (in Russian).

Guliyev I.S., Huseynov T.P. The existing technogenous tension around Mingechevir city makes it important to take urgent actions. Journal "Science and Life". No. 4, 2020, pp. 13-17 (in Azerbaijani).

Imanov F.A. Minimum flow of Caucasian rivers. Nafta-Press. Baku, 2000, 299 p. (in Russian).

Imanov F.A., Alakbarov A.B. Modern alterations of water resources of Azerbaijan and integrated control. Mutarcim. Baku, 2017, 352 p. (in Azerbaijani).

Israfilov Y.H. Efficient use and protection of underground fresh water deposits of the Azerbaijan Republic. İn: The collection of scientific works of the Azerbaijan Research Institute of Water Problems, Baku, 2004, pp. 43-49 (in Azerbaijani).

Israfilov Y.H. Water and state. In scientific-popular journal "Yer ve insan", Sherg-Gerb Press. 2013, pp. 34-40 (in Russian).

Israfilov Yu.H. Water supplies and sovereignty: challenges and sustainable water management in Azerbaijan Republic. Proceedings of the 2nd International Conference on water technology, Baku, 2014, pp. 64-68 (in Russian).

Israfilov Yu.H. Resources of Azerbaijan ground waters and their usage perspectives. Mining journal, No. 8, 2020, pp. 33-40 (in Russian).

Israfilov Yu.H. Assessment methods of exploitation reserves of ground waters from Azerbaijan piedmont plains. Proceed-

In: (Eds. A. Baba et al.) NATO Science Series, Izmir, Turkey, 2010, pp. 107-112.

İmanov F.A., Ələkbərov A.B. Azərbaycanın su ehtiyatlarının müasir dəyişmələri və inteqrasiyalı idarə edilməsi. Mütərcim. Bakı, 2017, 352 s.

Əhmədzadə Ə.C., Həşimov A.C. Ensiklopediya. Meliorasiya və su təsərrüfati. Radius. Bakı. 2016, 631 s.

İsrafilov Y.H. Azərbaycan Respublikasının yeralti şirin su yataqlarının səmərəli istifadasi və mühafizəsi. AzSPETl-nun elmi islərin məcmuəsində, Bakı, 2004, s.43-49.

Quliyev İ.S., Hüseynov T.P. Mingəçevir şəhəri ətrafında müvcud texnogen gərginlik təxirəsalınmaz tədbirlərin görülməsini zəruri edir. Jurnal "Elm və Həyat", No. 4, 2020, s. 13-17.

Əliyev F.Ş., Musayev N.A. Su ehtiyatlarından səmərəli istifadəsinə dair 2020 ilə qədər Milli Strategiya. Layihə. Ekologiya və Təbii Sərvətlər Nazirliyinin fondu, Bakı, 1991.

ings of ANAS, Sciences of the Earth, No. 3, 2007, pp. 22-26 (in Russian).

İsrafilov Y.G., Israfilov R.G. İmpacts of climate chance on groundwater resources: review of a case study in Azerbaijan. In: (Eds. A. Baba et al.) NATO Science Series, Izmir, Turkey, 2010, pp. 107-112.

Mansimov M.R. et al. The first National Communication of Azerbaijan on UN Framework Convention on Climate Change. National Center on Climate Change. Baku, 2000, 88 p. (in Russian).

Orlovsky N.S., Zonn I.S. Water supplies of Israel: Development experience. Problems of the former USSR, Vol. 5, No. 1, 2018, pp. 8-36 (in Russian).

Rustamov S.G., Kashkai R.M. Water balance of Azerbaijan SSR. Elm. Baku, 1978, 109 p. (in Russian).

Rustamov S.G., Kashkai R.M. Water resources of the Azerbaijan SSR. Elm. Baku, 1989, 181 p. (in Russian).

ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ УСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ АЗЕРБАЙДЖАНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

Исрафилов Ю.Г., Гусейнов Т.П.
Институт геологии и геофизики НАНА
AZ1143, г. Баку, просп. Г.Джавида, 119: yusifisrafil@gmail.com, t.ariel.huseynov@gmail.com

Резюме. Развитие экономики и социального сектора в условиях дефицита водохозяйственного баланса ограничивает развитие всех отраслей народного хозяйства Азербайджанской Республики. Генезис водных ресурсов республики инфильтрационный и является динамичной системой верхней части гидросферы. В структуре ресурсов пресных вод республики отмечаются пять важных факторов:

– более двух третей ресурсов (70%) пресных вод поступают в республику из соседних стран и являются трансграничными;

– значительная часть этих вод поступает в пределы республики в загрязненном состоянии;

– ресурсы поверхностных вод не постоянны во времени и зависят от водности года, то есть от климатических факторов;

– регулирование местного речного стока посредством русловых и внерусловых водохранилищ является приоритетным в уменьшении напряженности водохозяйственного баланса республики;

– подземные воды, как правило, характеризуются высоким качеством, лучше защищены от загрязнения, их ресурсы значительно меньше зависят от водности различных лет, на значительных площадях они являются единственными источниками водоснабжения.

При большом дефиците водохозяйственного баланса республики (более 10 км^3 в год) использование водных ресурсов в сельском хозяйстве осуществляется древними методами, а именно наливами. При этом происходят огромные потери дефицитных пресных вод на инфильтрацию, величина которых по осредненным данным составляет более 50% от водозабора. Исходя из того, что из 80% водных ресурсов республики используемых в сельхозпроизводстве, потери составляют порядка 50-60 %, т.е. 40% от используемых ресурсов, требуется неотложное внедрение в сельхозпроизводстве современных высокоэкономичных методов орошения наряду с устранением потерь при транспортировке, что в свою очередь позволит сэкономить по предварительным расчетам порядка 6-8 км^3/год воды и резко сократит дефицит водохозяйственного баланса республики. В статье дан анализ структуры ресурсов поверхностных и подземных вод, показано состояние изученности их ресурсов и эксплуатационных запасов, зависимость их от транзита из соседних территорий, изменения климата, учета добычи и прочее. Обосновываются пути и первоочередные мероприятия устойчивого развития и охраны ресурсов пресных и слабосолоноватых вод в свете разработки «Национальной Стратегии рационального использования водных ресурсов республики».

Ключевые слова: *Вода, ресурсы, запасы, учет, устойчивое развитие, трансграничные объекты, генеральная схема*

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASININ SU RESURSLARININ DAYANIQLI İDARƏ OLUNMASININ PROBLEMLƏRİ VƏ YOLLARI

İsrafilov Y.H., Hüseynov T.P.
AMEA-nın Geologiya və Geofizika İnstitutu
AZ1143, Azərbaycan, Baki şəh., H.Cavid prosp., 119
yusifisrafil@gmail.com; t.ariel.huseynov@gmail.com

Xülasə. Su təsərrüfatı balansının çatışmazlığı şəraitində iqtisadiyyatın və sosial sektorun inkişafı Azərbaycan Respublikası xalq təsərrüfatının bütün sahələrinin inkişafina həddqoyur. Respublikanın su resurslarının genezisi infiltrasion olub, hidrosferin yuxarı hissəsinin dinamik sistemindən ibartdir. Respublikanın şirin su resurslarının quruluşunda beş mühüm faktor qeyd olunur:

– şirin su resurslarının üçdə ikidən çoxu (70%) respublika hüdudlarına qonşu ölkələrdən daxil olur və transsərhəd çaylardır;

– bu suların xeyli hissəsi respublika hüdudlarına çirklənmiş halda daxil olur;

– səth sularının resursları zamana görə sabit deyildir və ilin sululuğundan, yəni iqlim faktorlarından asılıdır;

– məcra və qeyri-məcra su anbarları vasitəsilə yerli çay axının tənzimlənməsi respublikanın su təsərrüfatı balansının gərginliyinin azaldımasında üstünlük təşkil edir;

– yeraltı sular, adətən, yüksək keyfiyyətlə səciyələnir, çirklənmədən yaxşı qorunmuşdur, onların resursları müxtəlif illərin sululuğundan mühüm dərəcədə az asılıdır, xeyli sahələrdə onlar su təchizatının yeganə mənbələridir.

Respublikanın su təsərrüfatı balansının böyük çatışmazlığı şəraitində (ildə 10 km^3-dən çox) kənd təsərrüfatında su resurslarından istifadə qədim üsullarla, məhz su doldurmalarla həyata keçirilir. Həm də defisit şirin suların çox böyük itkiləri infiltrasiyaya gedir və sonuncunun ölçüsü ortalama göstəricələrə görə suburaxıcıdan 50%-dən çoxunu təşkil edir. Nəzərə alsaq ki, respublikanın su resurslarının kənd təsərrüfatı istehsalında istifadə olunan 80%-indən itkilər 50-60% təşkil edir, yəni istifadə olunan resursların 40%-i, nəql-edilmədə itkinin aradan qaldırılması ilə yanaşı, kənd təsərrüfatı istehsalında müasir yüksək qənaətcil suvarma üsullarının təxirəsalınmaz tətbiqi tələb olunur. Bu isə öz növbəsində ilkin hesablamalara görə 6-8 km^3 /il qənaət etməyə imkan verir və respublika su təsərrüfatı balansının çatışmazlığını kəskin surətdə azaldır. Məqalədə səth və yeraltı suların resurslarının quruluşunun təhlili, onların resurslarının və istismar resurslarının öyrənilmə vəziyyəti, qonşu ərazilərdən nəqlindən onların asılılığı, iqlimin dəyişkənliyi, istehsalın hesabı və s. verilmişdir.

"Respublikanın su ehtiyatlarından səmərəli istifadənin milli strategiyası"nın işlənilməsi işığında şirin və zəif şortəhər su resurslarının mühafizəsi və dayanıqlı inkişafının təxirəsalınmaz tədbirləri və vasitələri əsaslandırılmışdır.

Açar sözlər: *su, resurslar, ehtiyatlar, hesablama, dayanıqlı inkişaf, transsərhəd obyektlər, əsas sxem*

ANAS Transactions Earth Sciences 2 / 2021

http://www.journalesgia.com

GPS MƏLUMATLARI ƏSASINDA XƏZƏR DƏNİZİNİN ŞƏRQ SAHİLİ BOYU YER SƏTHİNİN MÜASİR HƏRƏKƏTLƏRİNİN MODELLƏŞDİRİLMƏSİ

Əhmədova E.V.

Bakı Dövlət Universiteti

AZ1148, Bakı şəh., akademik Zahid Xəlilov küçəsi, 23

MODELING OF MODERN EARTH SURFACE MOVEMENTS ALONG THE EAST COAST OF THE CASPIAN SEA BY GPS DATA

Akhmadova E.V.

Baku State University

23, akad. Z.Khalilov str., Baku, AZ1148

Keywords: *GPS monitoring, components of the VE and VN velocity vectors, South Caspian Basin, kinematic model*

Summary. The results of GPS monitoring in Azerbaijan show that the studied area is characterized by different geodynamic regimes. The fact that the components of the VE velocity vectors of several GPS points relative to the east of the West Caspian fault have higher values than the VN components shows that the velocity vectors observed at these points are sharply rotated to NNE. The purpose of this paper is to investigate the relationship between velocities at these GPS stations and the kinematics of the South Caspian Basin. A kinematic model was chosen to determine the theoretical values of the GPS point vectors. Along with this, the South Caspian depression and the Iranian plate were considered as regional tectonic elements in the formation of deformation structures. The study area is bounded to the north by the Central Caspian seismic zone and to the west by the West Caspian fault. The velocities obtained from model calculations using the Okada formula agree with the measured ones. The Lower Kur, Gobustan and Absheron structural regions east of the South Caspian fault move clockwise along with the South Caspian block, which is exposed to pressure from the Iranian plate. It has been established that the GPS velocities of the structural sections of the Lower Kur, Gobustan and Absheron are caused by the movement of the South Caspian basin, which rotates clockwise under the effect of the Iranian plate.

© 2021 Earth Science Division, Azerbaijan National Academy of Sciences. All rights reserved.

1. Giriş. Qafqaz regionu Cəbəllütariqdən Əfqanıstana qədər uzanan Alp-Aralıq dənizi qırışıqlıq qurşağının bir hissəsidir. Bu regionda Böyük və Kiçik Qafqaz kimi iki böyük dağ-qırışıqlıq sistemi yerləşmişdir. Ərəbistan və Avrasiya plitələrinin aktiv toqquşma zonasında yerləşən bu qırışıqlıq sistemi geodinamik və seysmik baxımdan olduqca mürəkkəb bir regiondur (McKenzie 1972; Sengor et al., 1985; Philip et al., 1989). Plitələr tektonikasına dair aparılan geoloji, paleomaqnit və qırıntılardan əmələ gəlmiş süxurlarda sirkoniumun tədqiqatları göstərir ki, Ərəbistan plitəsinin Avrasiya ilə toqquşması təqribən 10-30 milyon ildir ki, davam edir (Robertson 2000; Allen et al., 2004) və Ərəbistan plitəsinin Avrasiya qitəsinə görə şimala doğru nisbi hərəkət sürəti toqquşma başlayan andan etibarən müəyyən dərəcəyə qədər sabit qalmaqla təqribən 20 mm/il-ə bərabərdir (McQuarrie et al., 2003; Reilinger et al., 2006; Kadirov et.al., 2012).

Yer qabığı horizontal hərəkətlərini öyrənmək məqsədilə son illərdə intensiv olaraq kosmik geodeziyanın Qlobal Mövqe Sistemi – GPS (GlobalPositioningSystem) tətbiq olunmaqdadır (Jackson, et al., 1992; Strang and Borre, 1997; Kadirov et al., 2008; 2015; Reilinger et al., 2006).

Azərbaycan ərazisində aparılan GPS monitorinq nəticələri ərazinin fərqli geodinamik rejim halında olduğunu göstərir. Yeni GPS məlumatları Qərbi Xəzər yarılmasının şərqində yerləşən SALY (Səlyan), SHIK (Şıxlar), SANG (Səngəçal) və BAKU (Bakı) GPS məntəqələrində sürət vektorlarının VE komponentinin VN komponentindən daha böyük qiymət aldığını, bu məntəqələrdə müşahidə edilən sürət vektorlarının kəskin şəkildə ŞmŞmŞ istiqamətində döndüyünü göstərir (şəkil 1).

İşin məqsədi SALY (Səlyan), SHIK (Şıxlar), SANG (Səngəçal) və BAKU (Bakı) GPS məntəqələrindəki sürətlərin Cənubi Xəzər çökəkliyinin kinematikası ilə əlaqəsinin öyrənilməsidir.

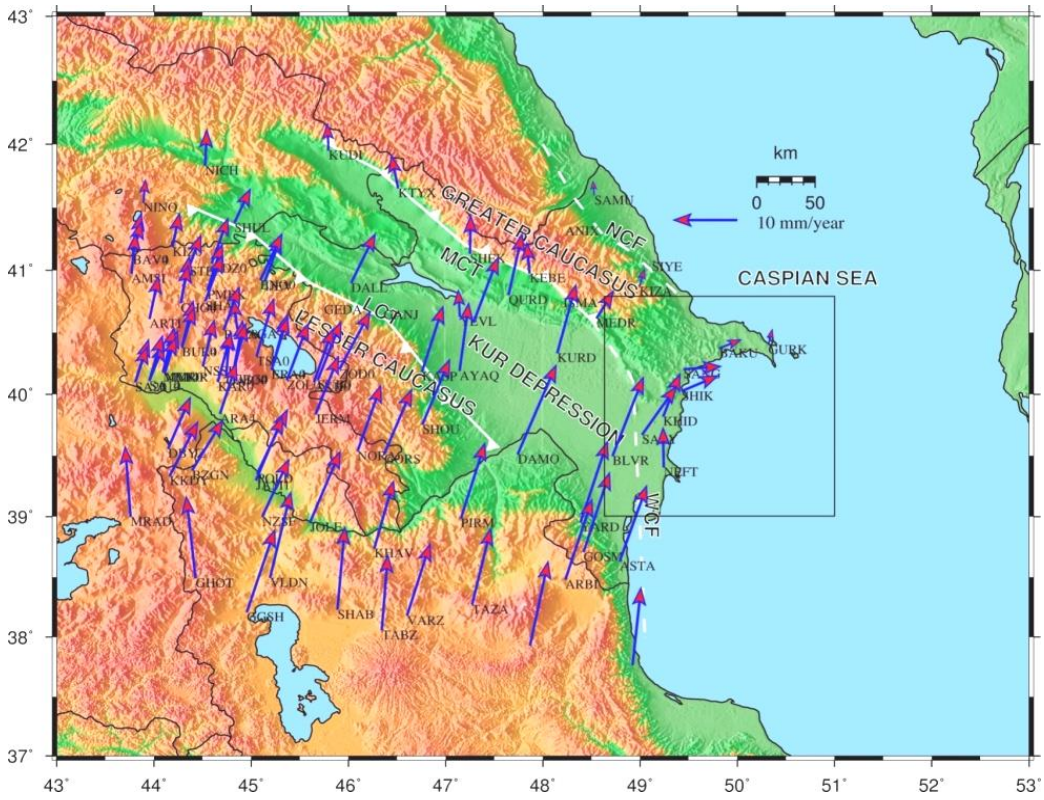
2. Azərbaycan GPS poliqonu və monitorinq nəticələri. AMEA Geologiya və Geofizika İnstitutu tərəfindən ABŞ-ın Massaçusetts Texnologiya İnstitutunun iştirakı ilə 1998-ci ildə Azərbaycan GPS şəbəkəsi qurulmuşdur. Hal-hazırda Azərbaycan GPS şəbəkəsinə 26 ölçü məntəqəsi və fasiləsiz olaraq fəaliyyət göstərən Bakı, Pirşağı, Şəki, Gəncə, Neftçala, Sabirabad GPS stansiyaları daxildir. 1998-2017-ci illər ərzində Azərbaycan GPS şəbəkəsinin müşahidə nöqtələrində 10-16 dəfə ölçü işləri aparılmışdır (Kadirov et al., 2015; Reilinger et al., 2006; Alizadeh et al., 2017). Azərbaycan və qonşu ərazilərdə GPS sürət vektorlarının paylanması 1-ci şəkildə verilimşdir.

Sürət vektorlarının paylanması Azərbaycan ərazisinin şərq və qərb hissələrində fərqli geodinamik rejimin olduğunu göstərir. Kiçik Qafqaz və Kür depressiya zonalarında GPS müşahidə məntəqələrindəki sürət vektorları kiçik bucaq altında ŞmŞ istiqamətində yönəlmişdir. Qərbi Xəzər yarılmasının şərqində yerləşən SALY (Səlyan), SHIK (Şıxlar), SANG (Səngəçal) və BAKU (Bakı) GPS məntəqələrində isə sürət vektorunun istiqaməti kəskin şəkildə şərqə tərəf dəyişir. Başqa sözlə, Kiçik Qafqaz, Kür depressiyası, Böyük Qafqaz, Talış, Aşağı Kür, Qobustan, Abşeron zonaları kinematik xarakteristikalarına görə fərqlənən bölgələrdir.

Yeni GPS məlumatları Aşağı Kür, Qobustan, Abşeron struktur zonalarında yerləşən SALY (Səlyan), SHIK (Şıxlar), SANG (Səngəçal) və BAKU (Bakı) GPS məntəqələrində sürət vektorlarının VE komponentinın VN komponentindən daha böyük qiymət aldığı müşahidə edilir.Şıxlar (SHIK), Səngəçal (SANG) və Bakı (BAKU) GPS məntəqələrində VE sürət komponenti VN sürət komponentindən iki dəfə daha yüksəkdir və bu hissədə sürət vektorunun daha kəskin şəkildə ŞmŞ istiqamətində dönməsi müşahidə edilir. Abşeron yarımadasının şərqində yerləşən Gürgən (GURK) məntəqəsində isə VE sürəti VN ilə müqayisədə nəzərəçarpacaq dərəcədə zəifdir və bu sürət komponentinin rolunu diqqətə almamaq olar. Buradan belə nəticəyə gəlmək olar ki, Abşeron-Balxanyanı qalxım zonasının qərb hüdudunda VN sürəti üstünlük təşkil edir.

Aşağı Kür, Qobustan, Abşeron struktur zonalarında GPS müşahidə nöqtələrindəki sürət vektorlarının istiqamətləri Cənubi Xəzər yarılmasının şərqində yer səthinin saat əqrəbi istiqamətində hərəkət etdiyini göstərir.

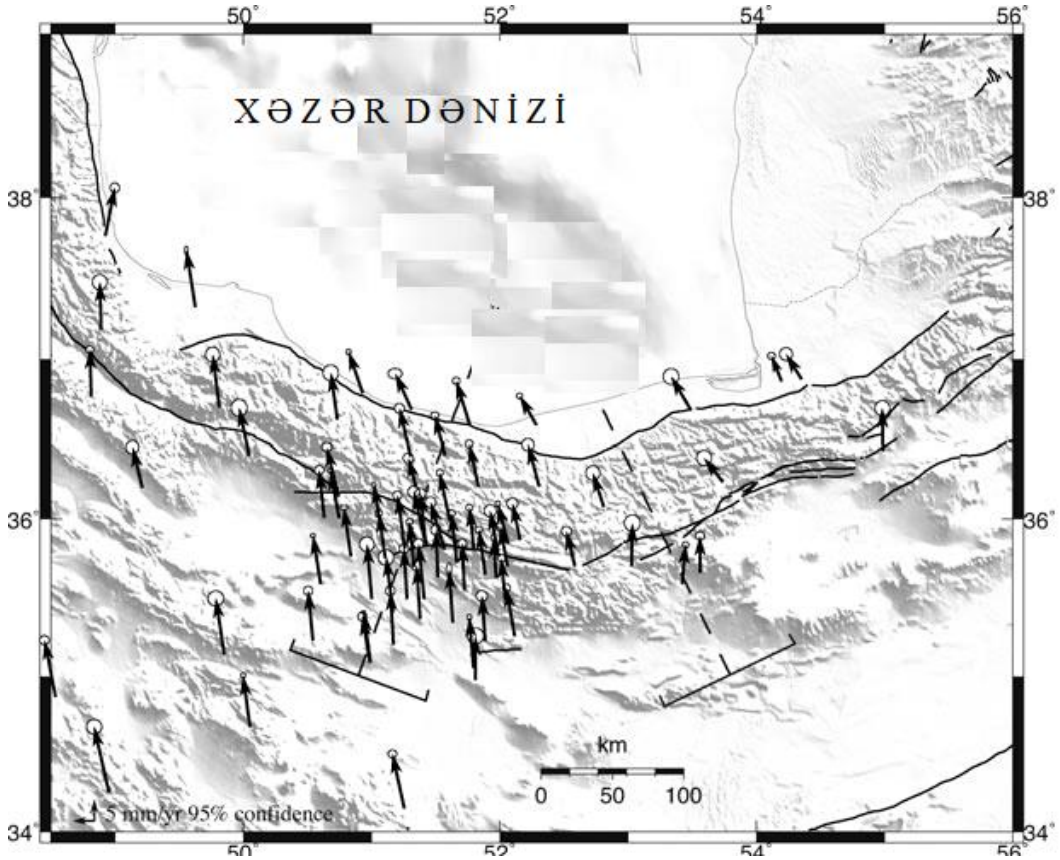
Yəhya Djamour və digərləri 2010-cu ildə ilk dəfə Cənubi Xəzər Hövzəsinin hərəkətini GPS, qravimetrik və seysmik məlumatları təhlil edərək dəqiqləşdirmiş və göstərmişlər ki, CXH Avrasiyaya nəzərən saat əqrəbi istiqamətində dönmə hərəkətinə məruz qalır (Djamour et al., 2010). Müəlliflər İran və ətraf ərazilər üçün GPS məntəqələrinin sürətləri əsasında Cənubi Xəzər dənizinin təxminən 500 km şərqində yerləşən Eyler qütbü ətrafında (59.1 ± 0.8°E, 40.4 ± 0.3°N) Avrasiyaya nəzərən saat əqrəbi istiqamətində fırlanma hərəkəti edir.



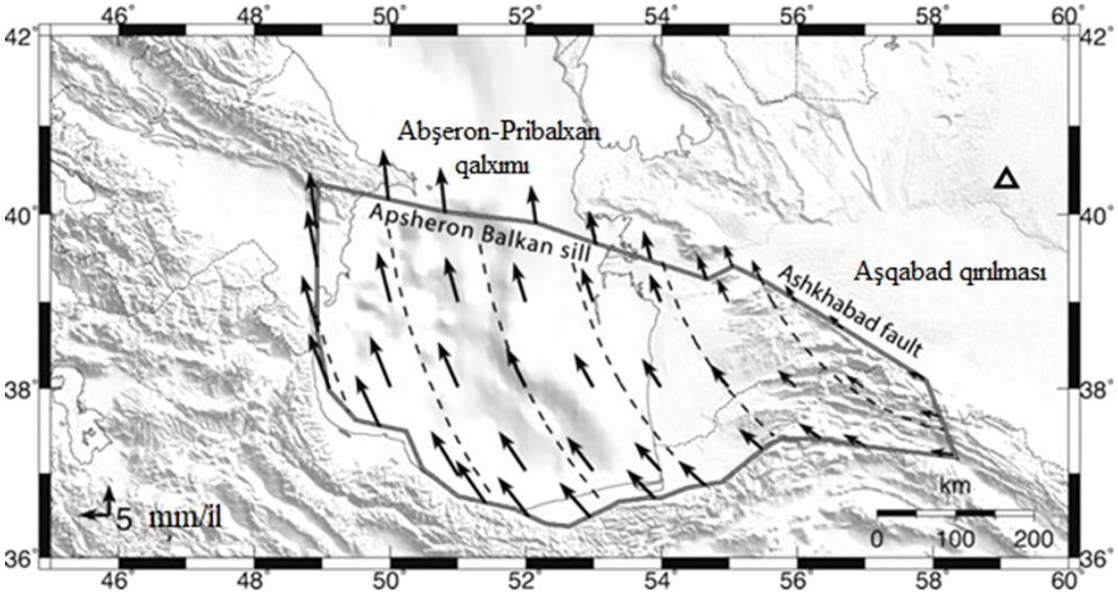
1-ci şəkil. Azərbaycan ərazisinin sadələşdirilmiş tektonik sxemi və GPS sürətləri, NCF-Şimali Xəzər yarılması, MCT-Böyük Qafqaz üstəgəlməsi, WCF-Qərbi Xəzər yarılması, LCT-Kiçik Qafqaz üstəgəlməsi

2-ci şəkildə Xəzər dənizinin cənubunda İran ərazisində Avrasiyaya nisbətən təyin olunmuş GPS sürətləri göstərilmişdir.

2013-cü ildə Mousavi və digərləri (Mousavi et al., 2013) yeni GPS məlumatlarından istifadə edərək bir daha göstərmişlər ki, Cənubi Xəzər Hövzəsi Avrasiyaya nəzərən 317° N azimutu üzrə maksimum ~ 7 mm/il sürəti ilə Eyler qütbü ətrafında fırlanma hərəkəti göstərir (3-cü şəkil).



2-ci şəkil. Xəzər dənizinin cənubunda İran ərazisində Avrasiyaya nisbətən təyin olunmuş GPS sürətləri (Djamour et al., 2010)



3-cü şəkil. Cənubi Xəzər/Avrasiya Eyler qütbünün (üçbucağın) yerləşdiyi yer. Kəsikli xətlər və vektorlar ilə blok sərhədləri boyunca interseysmik elastik gərginlik nəzərə alınmadan blok hərəkət istiqaməti göstərilmişdir (Djamour et al., 2010)

Onların bu nəticəsi Cənubi Xəzər Hövzəsinin Azərbaycanın sahil zonasında əldə olunan yeni məlumatlarla da təsdiqlənir. Burada sürətin VE komponenti 6.81 mm/il qiymətindədir.

Azərbaycan ərazisində müşahidə ilə əldə edilmiş GPS sürət paylanmasının Aşağı Kür, Qobustan, Abşeron strukturlarındakı nöqtələrdə sürət vektorunun istiqamətinin şərqə tərəf daha böyük bucaq altında dəyişməsinin Cənubi Xəzər Hövzəsinin Avrasiyaya nəzərən saat əqrəbi istiqamətində fırlanma hərəkəti ilə əlaqəsini araşdırmaq məqsədilə hissədəki GPS nöqtələrinin sürət vektorlarının nəzəri qiymətlərini təyin edək. Hesablamalar üçün seçilmiş kinematik modeldə Aşağı Kür, Qobustan, Abşeron strukturlarının qərbdən Qərbi Xəzər yarılması, şimalda isə Mərkəzi Xəzər seysmik zonası (subduksiya zonası) ilə hüdudlandığı qəbul edilmişdir. Modeldə bu deformasiyanın yaranmasında regional tektonik elementlər də nəzərə alınır. Belə regional tektonik element olaraq Cənubi Xəzər Hövzəsi (bloku) və İran plitəsi seçilmişdir. Bu iki qırılma ilə hüdudlanan ərazi üçün Cənubi Xəzər Hövzəsinin Avrasiyaya nəzərən ~ 7 mm/il sürət ilə saat əqrəbi istiqamətində dönmə hərəkətinin Aşağı Kür, Qobustan və Abşeron struktur elementlərini deformasiyaya uğratması fərz edilərək model daxilində nəzəri sürətlər təyin edilmişdir. Model hesablamaları üçün Mm profili seçilmiş və profilin başlanğıc və sonunda kvadrat mötərizələrlə həmin sahənin ölçüləri qeyd edilmişdir. Profil ARBİ, ASTA, GOSM, YARD, BİLE, SALY, KHİD, SHIK, BAKU, GURK, KIZA və SİYE GPS məntəqələrini əhatə edir. Mm profilinin əhatə etdiyi sahə içərisində qalan GPS nöqtələrindəki model sürətləri Okada formulundan (Okada, 1992) istifadə etməklə TDEFNODE (McCaffrey Rob, 2020) proqram təminatı vasitəsilə həyata keçirilmişdir.

4-cü şəkildə model hesablamalarından əldə edilən və ölçülmüş GPS sürət vektorları göstərilmişdir. Mm profilinə paralel istiqamətdə modeldən əldə edilmiş və ölçülmüş GPS sürət dəyərlərinin məsafədən asılılığı 5-ci şəkildə göstərilmişdir.

Göründüyü kimi, model hesablamalarından əldə edilən sürətlərlə ölçülmüş sürətlər bir-biri ilə uyğunluq təşkil edir. Yəhya Djamour, Mousavi və həmkarları tərəfindən aparılan tədqiqatların nəticələri ilə seçilmiş model üzrə əldə etdiyimiz məlumatların əsasında belə nəticəyə gəlmək olar ki, Cənubi Xəzər yarılmasının şərqindəki Aşağı Kür, Qobustan və Abşeron struktur əraziləri İran plitəsinin təsiri ilə dönmə hərəkəti edən Cənubi Xəzər Bloku ilə birlikdə saat əqrəbi istiqamətində hərəkət edir.

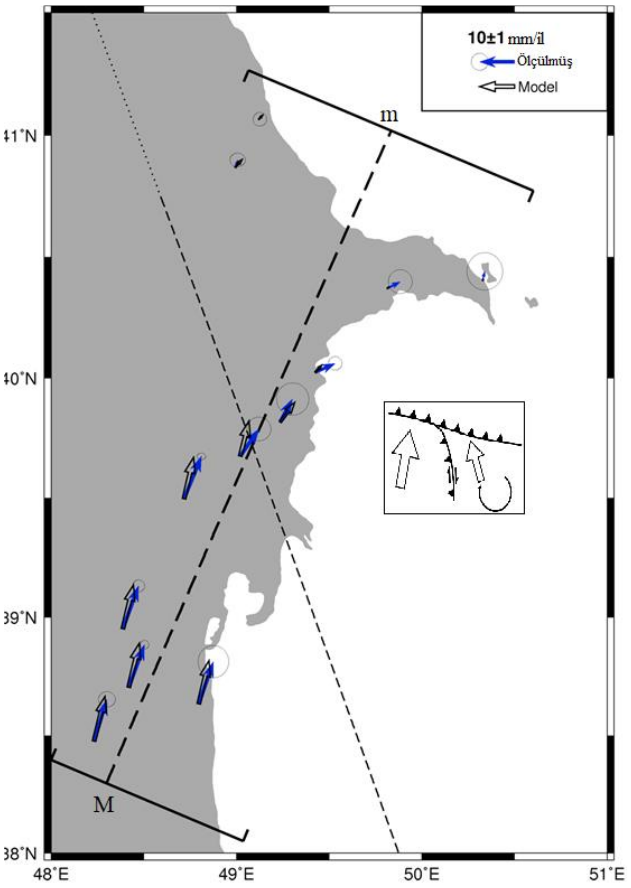
Nəticə

– Son 20 ildə aparılmış GPS müşahidələrindən əldə olunmuş sürət sahəsi Azərbaycan və Kiçik Qafqaza qonşu olan ərazilərdə yer qabığı səthinin Avrasiyaya nəzərən Şm, ŞmŞ istiqamətində hərəkətini aydın şəkildə təsvir edir.

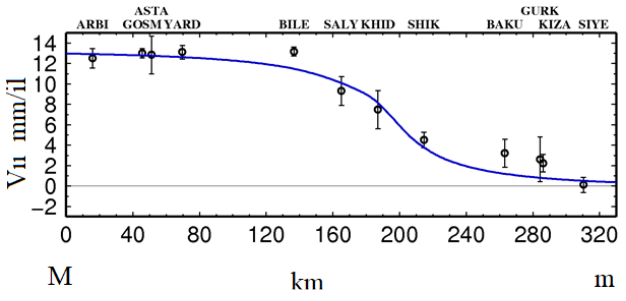
– GPS ölçmə nəticələri Azərbaycan ərazisində geodinamik rejimin fərqli xarakter daşıdığını göstərir.

– Şıxlar, Səngəçal və Bakı GPS məntəqələrində VE sürət komponenti üstünlük təşkil edir.

– İran plitəsinin təsirinə məruz qalaraq saat əqrəbi istiqamətində dönən Cənubi Xəzər Hövzəsinin Aşağı Kür, Qobustan və Abşeron struktur ərazilərinin GPS sürətlərinin səbəbi olduğu müəyyən edilib.



4-cü şəkil. Mm profili üzrə ölçülmüş GPS və model sürətlərinin paylanması. Göy rəngli oxla ölçülmüş, qara oxlarla isə model sürətləri göstərilmişdir



5-ci şəkil. Mm profilinə paralel istiqamətdə modeldən əldə edilmiş və ölçülmüş GPS sürət qiymətlərinin məsafədən asılı paylanması. Göy rəngli əyri ilə ölçülmüş GPS sürət paylamasını, qara dairələr ilə model sürətləri göstərilmişdir

– Abşeron-Balxanyanı qalxım zonasının qərb hüdudunda Gürgən (GURK) GPS məntəqəsində VN sürəti üstünlük təşkil edir.

Təşəkkür. Məsələnin qoyuluşunda və həllinin bütün mərhələlərində göstərdiyi diqqətə və praktiki köməkliyə görə AMEA-nın həqiqi üzvü, professor F.Ə.Qədirova dərin təşəkkürümü bildirirəm.

ƏDƏBİYYAT

Alizadeh A.A., Guliyev İ.S., Kadirov F.A., Eppelbaum L.V. Geosciences of Azerbaijan. Economic Geology and Applied Geophysics – Springer International Publishing. 2017, pp. 340.

Allen M., Jackson J., Walker R. Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. Tectonics, Vol. 23, TC2008, 2004, DOI:10.1029/2003TC001530.

Djamour Y., Vernant P., Bayer R., Nankali H.R., Ritz J.F., Hinderer J., Hatam Y., Luck B., Lemoigne N., Sedighi M., Khorrami F. GPS and gravityconstraints on continental deformation in the Alborz mountain range. Iran. Geophys. J. Int., Vol.183, 2010, pp. 1287-1301.

Jackson J. Partitioning of strike-slip and convergent motion between Eurasia and Arabia in eastern Turkey. J. Geophys. Res., Vol. 97, No. B9, 1992, pp. 12471-12479.

Kadirov F., Floyd M., Alizadeh Ak., Guliev I., Reilinger R., Kuleli S., King R., Toksoz M.N. Kinematics of the eastern Caucasus near Baku, Azerbaijan. J. Natural Hazards, vol. 63, No. 2, 2012, pp. 997-1006, DOI 10.1007/s11069-012-0199-0.

Kadirov F., Mammadov S., Reilinger R., McClusky S. Some new data on modern tectonic deformation and active faulting in Azerbaijan (according to Global Positioning System measurements). Proceedings of Azerbaijan National Academy of Sciences, The Sciences of Earth, No. 1, 2008, pp. 82-88.

Kadirov F.A., Floyd M., Reilinger R., Alizadeh Ak.A., Guliyev I.S., Mammadov S.G., Safarov R. Active geodynamics of the Caucasus region: implications for earthquake hazards in Azerbaijan. Proceedings of Azerbaijan National Academy of Sciences, The Sciences of Earth, No. 3, 2015, pp. 3-17.

McCaffrey R. TDEFNODE User's manual version. 2020, https://robmccaffrey.github.io/TDEFNODE/manual/tdefnode_manual.html.

McKenzie D.P. Active tectonics of the Mediterranean region. Geophys. J. R. Asron. Soc., Vol. 30, 1972, pp. 239-243.

McQuarrie N., Stock J.M., Verdel C., Wernicke B.P. Cenozoic evolution of Neotethys and implications for the causes of plate motions. Geophys. Res. Lett., Vol. 30, No. 20, 2003, pp. 2036, DOI:10.1029/2003GL017992.

Mousavi Z., Walpersdorf A., Walker R.T., Tavakoli F., Pathier E., Nankali H., Nilfouroushan F., Djamour Y. Global Positioning System constraints on the active tectonics of NE Iran and the South Caspian region. Earth and Planetary Science Letters, Vol. 377-378, 2013, pp. 287-298.

Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 82, 1992, pp. 1018-1040.

Philip H., Cisternas A., Gviskiani A., Gorshkov A. The Caucasus: An actual example of the initial stages of continental collision. Tectonophysics, Vol. 161, 1989, pp. 1-21.

Reilinger R. and 22 others, GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. J. Geophys. Res., Vol. BO5411, 2006, DOI:10.1029/2005JB004051.

Robertson A.H.F. Mesozoic-Tertiary tectonic evolution of a south Tethyan ocean basin and its margins in southern Turkey. In: Tectonics and magmatism in Turkey and the surrounding area, (Bozkurt E., Winchester J.A. and Piper J.D.A., eds.), Geol. Soc. Spec. Pub., 173, London, 2000, pp. 97-138.

REFERENCES

Alizadeh A.A., Guliyev İ.S., Kadirov F.A., Eppelbaum L.V. Geosciences of Azerbaijan. Economic Geology and Applied Geophysics – Springer International Publishing. 2017, pp. 340.

Allen M., Jackson J., Walker R. Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. Tectonics, Vol. 23, TC2008, 2004, DOI:10.1029/2003TC001530.

Djamour Y., Vernant P., Bayer R., Nankali H.R., Ritz J.F., Hinderer J., Hatam Y., Luck B., Lemoigne N., Sedighi M., Khorrami F. GPS and gravityconstraints on continental deformation in the Alborz mountain range. Iran. Geophys. J. Int., Vol.183, 2010, pp. 1287-1301.

Jackson J. Partitioning of strike-slip and convergent motion between Eurasia and Arabia in eastern Turkey. J. Geophys. Res., Vol. 97, No. B9, 1992, pp. 12471-12479.

Kadirov F., Floyd M., Alizadeh Ak., Guliev I., Reilinger R., Kuleli S., King R., Toksoz M.N. Kinematics of the eastern Caucasus near Baku, Azerbaijan. J. Natural Hazards, vol. 63, No. 2, 2012, pp. 997-1006, DOI 10.1007/s11069-012-0199-0.

Kadirov F., Mammadov S., Reilinger R., McClusky S. Some new data on modern tectonic deformation and active faulting in Azerbaijan (according to Global Positioning System measurements). Proceedings of Azerbaijan National Academy of Sciences, The Sciences of Earth, No. 1, 2008, pp. 82-88.

Kadirov F.A., Floyd M., Reilinger R., Alizadeh Ak.A., Guliyev I.S., Mammadov S.G., Safarov R. Active geodynamics of the Caucasus region: implications for earthquake hazards in Azerbaijan. Proceedings of Azerbaijan National Academy of Sciences, The Sciences of Earth, No. 3, 2015, pp. 3-17.

McCaffrey R. TDEFNODE User's manual version. 2020, https://robmccaffrey.github.io/TDEFNODE/manual/tdefnode_manual.html.

McKenzie D.P. Active tectonics of the Mediterranean region. Geophys. J. R. Asron. Soc., Vol. 30, 1972, pp. 239-243.

McQuarrie N., Stock J.M., Verdel C., Wernicke B.P. Cenozoic evolution of Neotethys and implications for the causes of plate motions. Geophys. Res. Lett., Vol. 30, No. 20, 2003, pp. 2036, DOI:10.1029/2003GL017992.

Mousavi Z., Walpersdorf A., Walker R.T., Tavakoli F., Pathier E., Nankali H., Nilfouroushan F., Djamour Y. Global Positioning System constraints on the active tectonics of NE Iran and the South Caspian region. Earth and Planetary Science Letters, Vol. 377-378, 2013, pp. 287-298.

Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 82, 1992, pp. 1018-1040.

Philip H., Cisternas A., Gviskiani A., Gorshkov A. The Caucasus: An actual example of the initial stages of continental collision. Tectonophysics, Vol. 161, 1989, pp. 1-21.

Reilinger R. and 22 others, GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. J. Geophys. Res., Vol. BO5411, 2006, doi:10.1029/2005JB004051.

Robertson A.H.F. Mesozoic-Tertiary tectonic evolution of a south Tethyan ocean basin and its margins in southern Turkey. In: Tectonics and magmatism in Turkey and the surrounding area, (Bozkurt E., Winchester J.A. and Piper J.D.A., eds.), Geol. Soc. Spec. Pub., 173, London, 2000, pp. 97-138.

Sengor A.M.C., Gorur N., Saroglu F. Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. In: Strike-slip faulting and basin formation (Biddle, K.T. and Christie-Blick N., eds.), Society of Econ. Paleont. Min. Sec. Pub., Vol. 37, 1985, pp. 227-264.
Strang G. and Borre K. Linear algebra, geodesy, and GPS. Wellesley-Cambridge Press. 1997, 642 p.

Sengor A.M.C., Gorur N., Saroglu F. Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. In: Strike-slip faulting and basin formation (Biddle, K.T. and Christie-Blick N., eds.), Society of Econ. Paleont. Min. Sec. Pub., Vol. 37, 1985, pp. 227-264.
Strang G. and Borre K. Linear algebra, geodesy, and GPS. Wellesley-Cambridge Press. 1997, 642 p.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ВДОЛЬ ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ GPS

Ахмедова Э.В.
Бакинский Государственный университет
AZ1148, Баку, ул.акад. З.Халилова, 23

Резюме. Результаты GPS-мониторинга в Азербайджане показывают, что изученная территория характеризуется разными геодинамическими режимами. Тот факт, что компоненты векторов скорости VE унекоторых GPS точек к востоку от Западно-Каспийского разлома отличаются более высокими значениями, чем компоненты VN, показывает, что векторы скорости, наблюдаемые в этих точках, резко повернуты на ССВ.

Целью данной статьи является изучение взаимосвязи между скоростями на этих GPS станциях с кинематикой Южно-Каспийского бассейна. Для установления теоретических значений векторов точек GPS была выбрана кинематическая модель. Наряду с этим Южно-Каспийская впадина и Иранская плита были как региональные тектонические элементы при формировании деформационных структур. Область исследования на севере ограничивается Центрально-Каспийской сейсмической зоной, с запада – Западно-Каспийским разломом. Скорости, полученные из модельных расчетов с использованием формулы Окада, согласуются с измеренными. Структурные области Нижняя Кура, Гобустан и Абшерон, расположенные к востоку от Южно-Каспийского разлома, движутся по часовой стрелке вместе с Южно-Каспийским блоком, который подвергается давлению со стороны Иранской плиты. Установлено, что причиной GPS-скоростей структурных участков Нижней Куры, Гобустана и Абшерона является движение Южно-Каспийского бассейна, который вращается по часовой стрелке под действием Иранской плиты.

Ключевые слова: *GPS-мониторинг, компоненты векторов скорости VE и VN, Южно-Каспийская впадина, кинематическая модель*

GPS MƏLUMATLARI ƏSASINDA XƏZƏR DƏNİZİNİN ŞƏRQ SAHİLİ BOYU YER SƏTHININ MÜASIR HƏRƏKƏTLƏRİNİN MODELLƏŞDİRİLMƏSİ

Əhmədova E.V.
Bakı Dövlət Universiteti
AZ1148, Bakı şəh., Akademik Zahid Xəlilov küçəsi, 23

Xülasə. Azərbaycan ərazisində aparılan GPS monitorinq nəticələri ərazinin fərqli geodinamik rejim halında olduğunu göstərir. Qərbi Xəzər yarılmasının şərqində yerləşən bəzi GPS məntəqələrində sürət vektorlarının VE komponentinin VN komponentindən daha böyük qiymət aldığını bu məntəqələrdə müşahidə edilən sürət vektorlarının kəskin şəkildə Şm-ŞmŞ istiqamətində döndüyünü göstərir. Məqalədə məqsəd bu GPS məntəqələrindəki sürətlərin Cənubi Xəzər çökəkliyinin kinematikası ilə əlaqəsinin öyrənilməsidir.

GPS nöqtələrinin sürət vektorlarının nəzəri qiymətlərini təyin etmək üçün kinematik model seçilmişdir. Aşağı Kür, Qobustan, Abşeron strukturlarının qərbdən Qərbi Xəzər yarılması, şimaldan isə Mərkəzi Xəzər Seysmik zonası ilə hüdudlandığı qəbul edilmiş deformasiyanın yaranmasında Cənubi Xəzər Hövzəsi və İran Plitəsi regional tektonik elementlər olaraq nəzərə alınmışdır. Okada formulundan istifadə etməklə model hesablamalarından əldə edilən və ölçülən sürətlər bir-biri ilə uyğunluq təşkil edir.

Cənubi Xəzər yarılmasının şərqindəki Aşağı Kür, Qobustan və Abşeron struktur əraziləri İran plitəsinin təsiri ilə dönmə hərəkəti edən Cənubi Xəzər Bloku ilə birlikdə saat əqrəbi istiqamətində hərəkət edir. İran plitəsinin təsirinə məruz qalaraq saat əqrəbi istiqamətində dönən Cənubi Xəzər Hövzəsinın Aşağı Kür, Qobustan və Abşeron strukturları ərazilərinin GPS sürətlərinin səbəbi olduğu müəyyən edilib.

Açar sözlər: *GPS monitorinq, VE və VN sürət komponentləri, Cənubi Xəzər hövzəsi, kinematik model*

ANAS Transactions Earth Sciences 2 / 2021

http://www.journalesgia.com

STUDY OF GEOLOGICAL CROSS-SECTIONS FOR MAKING DESIGN AND ENGINEERING DECISIONS WHILE DRILLING UNDER UNCERTAINTY

Isayev R.A., Piriverdiyev I.A.

Institute of Oil and Gas of Azerbaijan National Academy of Sciences

9 F. Amirov Str., Baku AZ1000, Azerbaijan: raminisayev@gmail.com, igorbaku@yandex.ru

Keywords: *porosity, hardness, density, mathematical statistics, fuzzy logic, harmonic mean*

Summary. To date, a large number of studies have accumulated on gathering and using information about well drilling. The quality of this information has a major influence on the decision-making process while drilling, as in most cases the drilling occurs under uncertainty. Numerous studies and the drilling experience show that the data obtained while drilling require statistical processing and in-depth analysis. The purpose of studies based on probabilistic methods and fuzzy logic is to predict the properties of rocks along the wellbore and to identify homogeneous intervals using a set of features. At the same time, various methods make it possible to assess the properties of rocks using core, cuttings, well logging, and mud logging data while drilling. This article considers the applicability of the proposed methods through examples of specific wells, since their successful application contributes to improving the efficiency of studying geological cross-sections and the quality of information obtained while drilling, as well as improving the quality of decisions. A computational scheme was proposed by the authors for estimating drillability of rocks associated with their properties predicted from integrated mud logging while drilling. Using the results of mud logging while drilling, the ways of building a refined lithological column are shown. The method proposed in the article which plays an important role in making decisions on the choice of process parameters, can be recommended for data analysis during drilling, clarification of lithology and boundaries of certain types of rocks.

© 2021 Earth Science Division, Azerbaijan National Academy of Sciences. All rights reserved.

1. Introduction

In most cases, engineering decisions for drilling oil and gas wells are made under uncertainty and largely depend on the quality of the necessary information. This information can be obtained from geological and geophysical surveys, as well as mud logging while drilling. The poor quality of the information received is one of the reasons for making erroneous decisions, which ultimately leads to a decrease in the performance indicators of drilling. Drilling experience and numerous studies show that data collected while drilling require statistical processing and in-depth analysis. Earlier works proposed a computational scheme based on the use of probabilistic methods and fuzzy logic (Brown et al., 2000; Cuddy and Glover, 2002; Efendiyev et al., 1991; Efendiyev et al., 2021; Эфендиев и др., 2019; Efendiyev et al., 2020).

The purpose of these studies was to predict the properties of rocks along the wellbore and to identify homogeneous intervals through a set of features, taking into account the uncertainties that occur when making decisions. This article discusses the applicability of the proposed methods with case study of specific wells. Successful application of these uncertainty-based methods improves the efficiency of geological study and the quality of information obtained while drilling using probabilistic statistical methods and fuzzy logic, as well as the quality of decision-making.

2. Review of experience in gathering and using information when making decisions in drilling

To date, a large number of studies have accumulated on gathering and using information about well drilling. These studies propose various methods and tools for estimating the physical and mechanical properties of rocks based on integrated information obtained while drilling. As a result of these studies, methods were proposed that make it possible to assess the properties of rocks using core, cuttings, well logging and mud logging data while drilling. In general, an analysis of the work done shows that it is now possible to increase the quality of decisions made using integrated geological, geophysical and technological information, which is the basis for engineering solutions. Such information can be obtained in various ways; it contains uncertainties of various nature, which affects its quality. Thus, in

order to obtain and use such information, it is necessary to use modern methods of data processing and analysis, taking into account the uncertainties mentioned. This has been acknowledged in various papers. At the same time, it is very important to take into account the uncertainty of drilling conditions, namely: heterogeneity, fuzziness and randomness of factors. Decision-making methods in the context of insufficient information, which have recently been widely developed in various fields of science and technology, can provide a reliable basis for this.

It is known that processing and analyzing data of measurements of geological parameters are associated with errors and other uncertainties. Such problems arise when making drilling decisions due to the difficulties associated with the creation and use of more accurate tools for measuring drilling and reservoir characteristics, performance parameters, etc. It should be noted that data analysis reveals that in many cases useful information is hidden in each error. Error information can be used to create a robust tool that complements the traditional techniques that process engineers, geologists, and geophysicists need to solve the forecasting problems. When analyzing bit performance, it is advisable to break down the cross-section into homogeneous intervals and to take into account the behavior of drilling parameters within them. Various classification methods have been proposed for this purpose. One of the simple methods to perform this operation is the method proposed by D. A. Rodionov (Родионов, 1968), which was used in a number of works, in particular (Efendiyev et al., 1991; Efendiyev et al., 2020). According to the algorithm for a program that provides for this method, the proposed criterion is calculated, and the calculated value of the criterion proposed in (Родионов, 1968) is compared with the corresponding table value reflected in the literature on mathematical statistics. The criterion given in (Родионов, 1968) was used, depending on the task, in various works for dividing geological objects into homogeneous intervals based on several features. Earlier, we also used the criterion for the features characterizing the main properties of rocks which are necessary for selecting process parameters. These are the hardness characterizing the resistance of the rock to drilling, and the abrasiveness characterizing the wear resistance of the rock. These rock properties, in turn, depend on the rock lithology, porosity and mineralogical composition (Efendiyev et al., 1991; Efendiyev et al., 2020).

In the works (Efendiyev et al., 2020; Efendiyev et al., 2021), changes in hardness and abrasiveness with depth compared to the rate of penetration of various bits are shown. Fig. 1 shows a generalized cross-section of one of the wells drilled in Azerbaijan. Here, homogeneous intervals drilled with same-type bits are shown. The given data were processed by the "moving average" method, which reduces the data scattering and more clearly defines the trend of the parameter under consideration. Works of (Efendiyev et al., 2020; Эфендиев и др., 2019; Efendiyev et al., 2021) also show the change in the "d-exponent" parameter, which in an integrated manner characterizes the rock drillability and allows us to estimate the intervals of abnormal changes in reservoir pressure (this is evidenced by the deviation of points from a straight line called the "trend line").

In recent years, fuzzy logic has been successfully applied in the evaluation and use of formation characteristics (Zadeh, 1965; Fang and Chen, 1997; Freund and Walpole, 1980; Cuddy and Glover, 2002; Brown et al., 2000; Efendiyev et al., 2021).

In (Efendiyev et al., 2020; Efendiyev et al., 2021) the use of the noted provisions is exemplified by predicting lithology in wells drilled in Azerbaijan according to a set of features (hardness, abrasiveness, lithological index, porosity, permeability, etc.) obtained from geological and geophysical surveys and mud logging while drilling. Analysis of distribution of rock properties in (Efendiyev et al., 2020; Efendiyev et al., 2021) showed that for each of the listed property, with the exception of permeability, it obeys the normal law (permeability, as known, obeys the lognormal law, so the logarithms are taken as its values). In the present work, using expressions based on probability theory and fuzzy logic methods given in (Cuddy and Glover, 2002; Efendiyev et al., 2020; Efendiyev et al., 2021), calculations of the geological characteristics were performed, estimates of the rock lithology were given, and homogeneous intervals in terms of drillability were identified. In short, by summarizing the noted results and applying the corresponding computational schemes, by the example of some wells, ways of preparing information for modeling the drilling process are shown (Fig. 1).

3. Research method

The algorithm for assessing the rock properties and identifying homogeneous intervals (packs) was considered and proposed in previously performed works (Cuddy and Glover, 2002; Efendiyev et al., 2019; Piriverdiyev, 2020). In these works, first, the distribution density is calculated according to the expression known from the probability theory; then the characteristics are sequentially calculated (Cuddy and Glover, 2002; Brown et al., 2000), necessary for a comprehensive assessment of the rock properties that play a role in calculating drillability and breaking the cross-section into homogeneous intervals (Efendiyev et al., 2020; Эфендиев и др., 2019; Efendiyev et al., 2021). The expressions used in the calculations are summarized in Table 1.

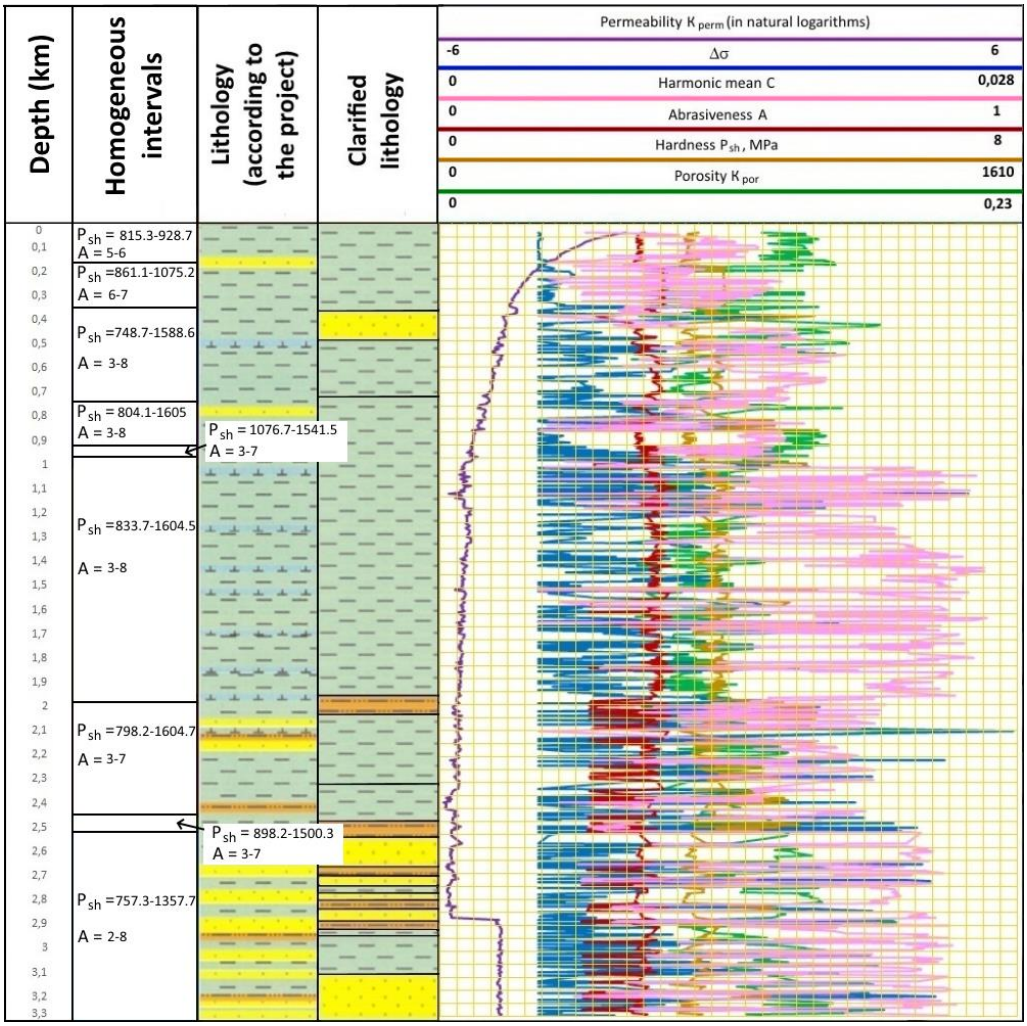


Fig. 1. Evaluations of lithological and reservoir properties and identification of homogeneous intervals

Table 1

Expressions used in calculations

Characteristics calculated during forecasting	*Calculation expression*
Distribution density	$P(x) = \frac{e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}}$
Normalized distribution density	$P(\mu) = \frac{e^{-(\mu-\mu)^2/2\sigma^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$
Relative fuzzy probability	$R(x_f) = e^{-(x-\mu_f)^2/2\sigma_f^2}$
Fuzzy probability	$F(x_f) = \sqrt{n_f}\, e^{-(x-\mu_f)^2/2\sigma_f^2}$

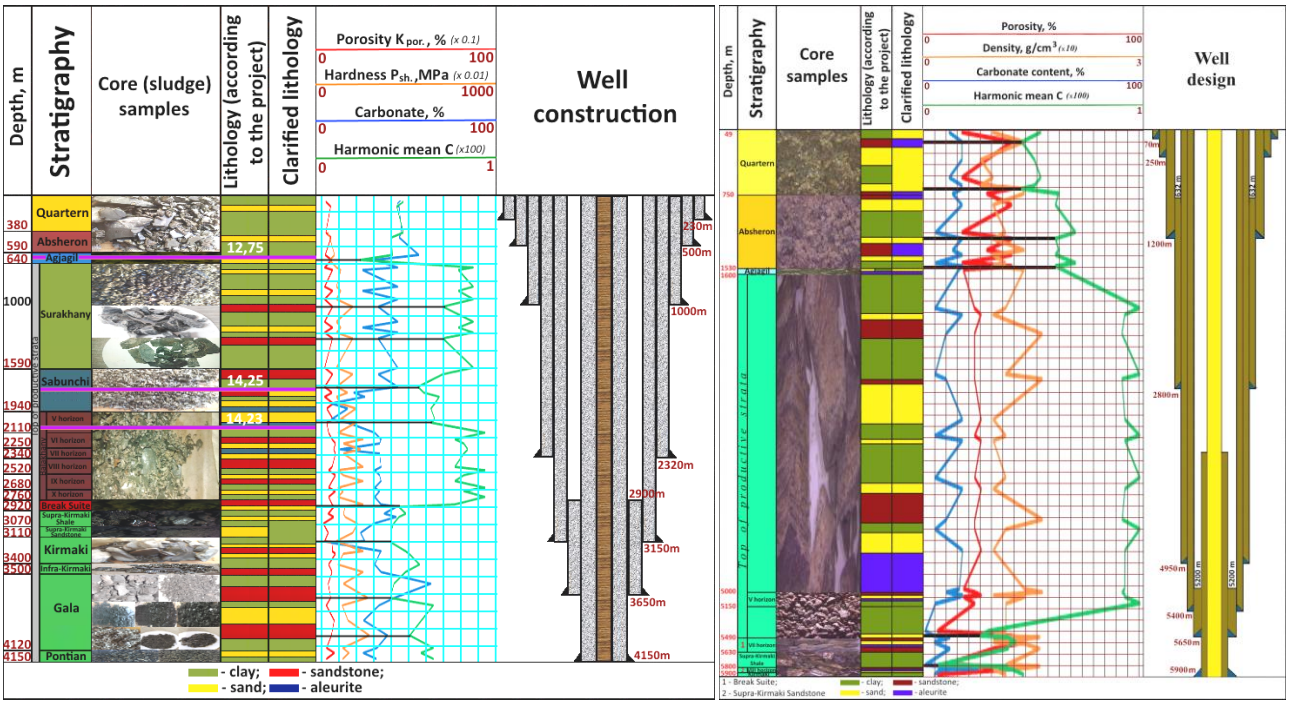
Depending on the available initial information and the task, it is possible to take certain characteristics of rocks.

In this paper, based on mud logging, we have considered examples of the use of the noted technique in separating rocks into homogeneous intervals by properties that affect drillability. In the first case, the following rock properties are selected as initial data: hardness, abrasiveness, lithology index, porosity, permeability. The mean and standard deviation of each of these properties were calculated accordingly. The arithmetic mean and standard deviation for each property are calculated based on the results of mud logging while drilling, core and geophysical studies for each lithological type of rock. The well cross-section is usually heterogeneous, i.e. it consists of several intermittent rock layers. For clarity, let us reformulate our task: we assume that we have many rock lithotypes, according to the lithological column given in the well design. It is necessary to further describe this column using a set of features characterizing a particular lithological rock difference. To do this, we have many characteristics that determine the rock type: these are the values of hardness, abrasiveness, lithology index, porosity and permeability. Based on these values, it is necessary to assign the selected rock to a particular lithological type. Using the above formulas and the computational scheme, a lithological column was built, which is shown in Fig. 1 in comparison with the design one. When building this column, as noted above, the data on porosity, permeability, hardness, abrasiveness and lithology index according to mud logging while drilling were taken as the initial ones. For each lithotype, fuzzy probabilities were determined according to (Cuddy and Glover, 2002; Efendiyev et al., 2020).

These fuzzy probabilities are then harmonically averaged to obtain a cumulative fuzzy probability (Cuddy and Glover, 2002; Efendiyev et al., 2020):

$$C_f = \frac{n}{\frac{1}{F(x_1)}+\frac{1}{F(x_2)}+\ldots+\frac{1}{F(x_n)}} \qquad (1)$$

This calculation process is performed for each lithology type *f*. The lithotype associated with the least cumulative fuzzy possibility is considered the most likely for this set of features. In the example of the well cross-section considered above, the calculations were carried out according to the specified scheme; the results are given in (Efendiyev et al., 2020). According to a similar scheme, using the above expressions, calculations were performed for wells also drilled in the fields of Azerbaijan. In (Efendiyev et al., 2021), hardness, porosity and carbonate content, in one case, while in another case, porosity, carbonate content and density (depending on the available initial information) were used as characteristics for the generalized assessment of rock drillability. The results of the calculations and the refined lithological column are shown in Fig. 2 (a, b).



a) b)

Fig. 2. Characteristics of the geological cross-section and results of identification of homogeneous intervals using: a) rock porosity, hardness and carbonate content, b) rock porosity, density and carbonate content

4. Conclusion

A computational scheme was proposed for estimating drillability of rocks associated with their properties predicted from integrated mud logging while drilling. Using the results of mud logging while drilling, the ways of building a refined lithological column are shown. Following calculations performed for the well cross-section intervals by harmonic averaging of fuzzy probabilities, intervals homogeneous in terms of rock properties affecting rock drillability were obtained. This technique which plays an important role in making decisions on selecting the process parameters can be recommended for analyzing data while drilling, clarifying the lithology and boundaries of individual types of rocks.

REFERENCES

Brown D.F., Cuddy S.J., Garmendia-Doval A.B., McCall J.A.W. The prediction of permeability in oil-bearing strata using genetic algorithms. In: Materials of the Third IASTED International Conference Artificial Intelligence and Soft Computing, Banff, Alberta, Canada, July 24-26, 2000, https: //www.researchgate.net/publication/220909228_The_Prediction_of_Permeability_in_Oil-Bearing_Strata_using_Genetic_Algorithms.

Cuddy S.J. and Glover P.W.J. The application of fuzzy logic and genetic algorithms to reservoir characterization and modeling. Soft Computing for Reservoir Characterization and Modeling, No. 1, 2002, pp. 219-241.

Efendiyev G.M., Djafarova N.M., Djevanshir R.D. The optimum decision in cutting-type drilling bits selection with regard to their operating conditions and the vagueness of the task posed. Energy sources, Vol. 13, No. 2, 1991, pp. 243-250.

Efendiyev G., Isayev R., Piriverdiyev I. Decision-making while drilling wells based on the results of modeling the characteristics of rocks using probabilistic-statistical methods and fuzzy logic. ISAIC 2020, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1828, 2021, https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1828/1/012016/pdf

Efendiyev G.M., Kuliyev H.H., Piriverdiyev I.A. et al. Methods and tools to improve the quality of information in decision-making in well drilling management. In proceeding of scientific papers: Rock destruction and metalworking tools – techniques and technology for their production and use. Kiev, V. Bakul Institute for Superhard Materials, Vol. 22, 2019, pp. 52-62 (in Russian).

Efendiyev G.M., Mammadov P.Z., Piriverdiyev I.A. Modeling and evaluation of rock properties based on integrated logging while drilling with the use of statistical methods and fuzzy logic. 10th International Conference on Theory and Application of Soft Computing, Computing with Words and Perceptions – ICSCCW-2019. Advances in intelligent systems and computing book series (AISC), Vol. 1095, 2020, pp. 503-511.

Fang J.H. and Chen H.C. Fuzzy modeling and the prediction of porosity and permeability from the compositional and textural attributes of sandstone. Journal of Petroleum Geology, Vol. 20, No. 2, 1997, pp. 185-204.

Freund J.E. and Walpole R.E. Mathematical Statistics. Prentice-Hall. New Jersey, 1980, 548 p.

Piriverdiyev I.A. Division of the geological section into homogeneous drillability intervals based on the results of modeling the properties of rocks in the drilling process. ANAS Transactions, Earth Sciences, No. 2, 2020, pp. 33-39.

Rodionov D.A. Statistical methods of distinguishing geological objects by a set of features. Nedra. Moscow, 1968, 158 p. (in Russian).

Zadeh L. Fuzzy Sets. Information and Control, No. 8, 1965, pp. 338-353.

ЛИТЕРАТУРА

Brown D.F., Cuddy S.J., Garmendia-Doval A.B., McCall J.A.W. The prediction of permeability in oil-bearing strata using genetic algorithms. In: Materials of the Third IASTED International Conference Artificial Intelligence and Soft Computing, Banff, Alberta, Canada, July 24-26, 2000, https: //www.researchgate.net/publication/220909228_The_Prediction_of_Permeability_in_Oil-Bearing_Strata_using_Genetic_Algorithms.

Cuddy S.J. and Glover P.W.J. The application of fuzzy logic and genetic algorithms to reservoir characterization and modeling. Soft Computing for Reservoir Characterization and Modeling, No. 1, 2002, pp. 219-241.

Efendiyev G.M., Djafarova N.M., Djevanshir R.D. The optimum decision in cutting-type drilling bits selection with regard to their operating conditions and the vagueness of the task posed. Energy sources, Vol. 13, No. 2, 1991, pp. 243-250.

Efendiyev G., Isayev R., Piriverdiyev I. Decision-making while drilling wells based on the results of modeling the characteristics of rocks using probabilistic-statistical methods and fuzzy logic. ISAIC 2020, Journal of Physics: Conference Series, V. 1828, 2021, https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1828/1/012016/pdf

Efendiyev G.M., Mammadov P.Z., Piriverdiyev I.A. Modeling and evaluation of rock properties based on integrated logging while drilling with the use of statistical methods and fuzzy logic. 10th International Conference on Theory and Application of Soft Computing, Computing with Words and Perceptions – ICSCCW-2019. Advances in intelligent systems and computing book series (AISC), Vol. 1095, 2020, pp. 503-511.

Fang J.H. and Chen H.C. Fuzzy modeling and the prediction of porosity and permeability from the compositional and textural attributes of sandstone. Journal of Petroleum Geology, Vol. 20, No. 2, 1997, pp. 185-204.

Freund J.E. and Walpole R.E. Mathematical Statistics. Prentice-Hall. New Jersey, 1980, 548 p.

Piriverdiyev I.A. Division of the geological section into homogeneous drillability intervals based on the results of modeling the properties of rocks in the drilling process. ANAS Transactions, Earth Sciences, No. 2, 2020, pp. 33-39.

Zadeh L. Fuzzy sets. Information and Control, No. 8, 1965, pp. 338-353.

Родионов Д.А. Статистические методы разграничения геологических объектов по комплексу признаков. Недра. Москва, 1968, 158 с.

Эфендиев Г.М., Кулиев Г.Г., Пиривердиев И.А. и др. Методы и средства повышения качества информации при принятии решений в управлении процессом бурения скважин. В сборнике научных трудов: Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Киев, ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Т. 22, 2019, с. 52-62.

ИЗУЧЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАЗРЕЗОВ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ БУРЕНИИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Исаев Р.А., Пиривердиев И.А.
Институт нефти и газа Национальной Академии наук Азербайджана
AZ1000, Азербайджан, г. Баку, ул. Ф. Амирова, 9: raminisayev@gmail.com, igorbaku@yandex.ru

Резюме. К настоящему времени накопилось большое количество исследований, посвященных получению и использованию информации о бурении скважин. Качество этой информации оказывает большое влияние на процесс принятия решений при бурении, т.к. в большинстве случаев оно происходит в условиях неопределенности. Многочисленные исследования и опыт бурения показывают, что данные, полученные в процессе бурения, требуют проведения статистической обработки и глубокого анализа. Целью исследований, основанных на применении вероятностных методов и нечеткой логики, является прогнозирование свойств пород, слагающих разрез скважины, и выделение однородных интервалов по комплексу признаков. При этом различные методы позволяют оценивать свойства горных пород как по керну, шламу, используя результаты геофизических исследований скважин, так и по данным геолого-технологических исследований при бурении. В настоящей статье рассматривается возможность использования предложенных методов на примерах конкретных скважин, т.к. их успешное применение способствует повышению эффективности изучения геологических разрезов и качества информации, получаемой в процессе бурения скважин, а также повышению качества принимаемых решений. Авторами была предложена расчетная схема для оценки буримости горных пород, связанной с их свойствами, прогнозируемыми по результатам комплексного каротажа во время бурения. По результатам ГИС при бурении показаны способы построения уточненной литологической колонны. Предложенная в статье методика может быть рекомендована для анализа данных при бурении, уточнения литологии и границ отдельных типов горных пород, что играет важную роль при принятии решений по выбору параметров процесса.

Ключевые слова: *пористость, твердость, плотность, математическая статистика, нечеткая логика, среднее гармоническое*

QEYRI-MÜƏYYƏNLİK ŞƏRAİTİNDƏ QUYULARIN QAZILMASI ZAMANI TEXNİKİ-TEXNOLOJİ QƏRARLARIN QƏBULU ÜÇÜN GEOLOJİ KƏSİLİŞLƏRİN ÖYRƏNİLMƏSİ

Isayev R.A., Piriverdiyev I.A.
Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Neft və Qaz İnstitutu
AZ1000, Bakı şəh., F.Əmirov küç., 9: raminisayev@gmail.com, igorbaku@yandex.ru

Xülasə. Hal-hazırkı vaxta qədər quyuların qazılması haqqında məlumatların alınması və istifadə olunmasına dair çoxlu sayda tədqiqatların toplanması müşahidə olunur. Həmin məlumatların keyfiyyətindən qazıma zamanı qəbul edilən qərarların düzgünlüyü asılıdır. Qeyd etmək lazımdır ki, qazımada əldə edilən məlumatların keyfiyyətini burada mövcud olan müxtəlif növlü qeyri- müəyyənliklər nəzərəçarpan dərəcədə aşağı salır. Buna görə də alınan ilkin məlumatın statistik emala ehtiyacı vardır. Bu baxımdan təqdim olunmuş məqalə statistik üsullar və qeyri-səlis məntiq əsasında qazıma zamanı aparılan geoloji-texnoloji tədqiqat nəticələrindən istifadə etməklə kəsilişin litoloji-tutum parametrləri və mexaniki xassə göstəricilərinin proqnozu, bunların vasitəsilə kəsilişin bircins intervallara bölünməsi məsələsinə həsr olunmuşdur. Qeyd olunmuş üsullar və bir qədər əvvəl təklif olunmuş hesablama sxeminin tətbiqi ilə bir neçə quyu məlumatı üzərində hesablamalar aparılmışdır. Geoloji-texnoloji tədqiqat məlumatına əsasən süxurların qazılma qabiliyyəti göstəricisinin və müxtəlif bircins intervalların sərhədlərinin dəqiqləşdirilməsi üzrə hesablama nəticələri məqalədə öz əksini tapmışdır. Burada sərhədləri təyin edərkən süxurların xassə göstəriciləri üzərində müvafiq emal aparılmış, qeyri-səlis ehtimallar təyin edilmiş, nəticədə həmin ehtimallar arasında harmonik orta kəmiyyət təyin olunmuşdur. Bunun qiymətinin dəyişməsi əsasında kəsiliş üzrə bircins intervallar arasında sərhədlər müəyyənləşdirilmişdir. Məqalədə qazıma zamanı aparılan karotaj kompleksi əsasında süxurların xassələri ilə əlaqədar dağıdılma qabiliyyətinin qiymətləndirilməsi üçün hesablama sxemi təklif olunmuşdur. Qazıma zamanı quyuların geofiziki tədqiqatlarına əsasən kəsilişin litologiyası dəqiqləşdirilmişdir. Təklif olunmuş və konkret quyu timsalında həyata keçirilmiş metodika informasiya çatışmazlığı şəraitində qazıma zamanı geoloji kəsilişlərin daha dəqiq və dərindən öyrənilməsinə imkan verir və bu da qərarların qəbulu zamanı mühüm rol oynayır.

Açar sözlər: *məsaməlilik, sərtlik, sıxlıq, riyazi-statistika, qeyri-səlis məntiq, orta harmonik*

ANAS Transactions Earth Sciences 2 / 2021

http://www.journalesgia.com

ИЗМЕНЕНИЕ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ И ЕГО ПОСЛЕДСТВИЯ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ АЗЕРБАЙДЖАНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

Алиев А.С., Татлыева З.И., Ахмедова Р.Ю., Сулейманлы Д.Г.

Институт географии Национальной Академии наук Азербайджана
AZ1143, Баку, просп. Г.Джавида, 115

CHANGES IN THE LEVEL OF THE CASPIAN SEA AND ITS CONSEQUENCES IN THE COASTAL ZONE OF THE REPUBLIC OF AZERBAIJAN

Aliyev A.S., Tatliyeva Z.I., Axmedova R.Y., Suleymanli D.Q.
Institute of Geoqraphy, Azerbaijan National Academy of Sciences
115, H.Javid ave., Baku, AZ1143

Keywords: *Caspian Sea, level fluctuations, coastal zone, flooding, sea level forecast*

Summary. The article presents the results of a study of Caspian Sea level fluctuations. The negative consequences of abrupt sea level changes (drop in 1929-1977 and rise in 1978-1995) in the coastal zone of the Republic of Azerbaijan are considered. Remote sensing (aerial photography of the coastal zone), contact measurements of sea level, as well as topographic and thematic maps have been used to study the coastal flooding of the Republic of Azerbaijan. About 100 maps of coastal flooding and underflooding on a scale of 1:25000 were produced. These materials are used to estimate the flooded area for administrative areas of the coastal zone. The negative impact of sea level rise on industrial and agricultural facilities located in the coastal zone, especially on the Absheron Peninsula, has been revealed. Thirty settlements, sanatoriums, holiday homes, boarding houses, beaches and many other facilities on the peninsula were subjected to flooding.

It has been revealed that climatic and geological processes are the main causes of sea level fluctuations. Against the background of long-period changes (occurring under the influence of tectonic processes), fluctuations caused by climate change are observed. Climate change cause changes in the hydrometeorological conditions of the catchment area and the sea, leading to changes in the elements of the Caspian Sea water balance. Based on the analysis of sea level plots over the last 3500 years, it is assumed that the sea level will continue to fall at least until the middle of the 21st century.

© 2021 Earth Science Division, Azerbaijan National Academy of Sciences. All rights reserved.

Введение

Проблема изменчивости уровня Каспийского моря всегда беспокоила и беспокоит народы, живущие на его берегах. Состояние населенных пунктов, социально-экономических, экологических и хозяйственных объектов, расположенных на прибрежной полосе Каспийского моря, напрямую зависит от нестабильности его уровенного режима.

В настоящее время больше половины населения и более трех четвертей промышленного потенциала нашей Республики сосредоточено в береговой и шельфовой зонах моря. По этой причине среди 5 прикаспийских стран наибольший ущерб от изменения уровня Каспийского моря был нанесен экономике Азербайджанской Республики (Каплин, 1997).

Обсуждение и результаты. Известно, что размах изменения уровня Каспийского моря за последние 190 лет (с начала инструментальных наблюдений) составил около 4 метров. За это время в уровенном режиме моря отмечено 3 периода, в течение которых уровень резко изменялся: 1930-1976 гг., когда уровень упал на 3.0 м; 1978-1995 гг., когда уровень поднялся на 2.5 м, и 1996-2019 гг., когда уровень упал на 1.5 м (рис. 1).

Понижение уровня моря привело к коренному переформированию берегов и опустыниванию прибрежных территорий, обусловило снижение уровня грунтовых вод, сопровождалось значительными изменениями экосистемы Каспия и сильно отразилось на эффективности работы морского флота и рыбного хозяйства. Некоторые рыбопромысловые сооружения, выстроенные на берегу, удалились на десятки километров от уре-

за воды. Была уничтожена почти половина рыбных кормовых угодий, что привело к снижению уловов, значительно затруднило условия рыболовства и рыбоводства. В результате падения уровня моря возникли трудности, особенно в судоходстве. Подходные пути к портам и сами порты обмелели, появились сложности при проходе. Потребовались огромные средства на дноуглубительные работы, чтобы поддержать порты в судоходном состоянии.

В Азербайджанской прибрежной зоне в результате происходящего отступания моря значительно расширилась и территория суши, примыкающая к прибрежной полосе Каспия. Площадь осушенной полосы за 1929-1966 гг. (от острова Пираллахы до устья р. Лянкяран) составила 771 кв км. В районе дельты реки Кура и залива Кызыл-Агач ширина суши, освободившейся из-под воды, доходила до 5-7 км. В некоторых местах заметно изменилась ландшафтная структура прибрежной территории, и усилилось опустынивание прибрежных районов (Жило, 1954; Мамедов и др., 1976). В период снижения уровня моря природопользование и хозяйственная деятельность были основаны на активном освоении освобождающихся от морских вод береговых территорий. Все отрасли экономики прибрежных районов перестроились к пониженному положению уровня около абсолютной отметки -28.5 м БС (метр Балтийской Системы – высота уровня Каспия от уровня Балтийского моря). В то время по прогнозам большинства исследователей ожидалось продолжение снижения уровня моря и рассматривались различные варианты его стабилизации. Для предотвращения катастрофического падения уровня моря тогда было предложено много проектов, целью которых было не допустить дальнейшего падения уровня путем либо пополнения поверхностного притока речных вод, либо сокращения суммарного испарения с акватории моря и стока в залив Кара-Богаз-Гол. Разрабатывался только один проект переброски части стока северных рек в бассейн Каспия. Проект отсечения Кара-Богаз-Гола был реализован, в 1980 г. отток из моря был прекращён и в полном объеме был восстановлен после разрушения дамбы в проливе в 1992 г. (Фролов, 2003).

В последние годы, начиная с 2005 года, наблюдается падение уровня моря. По всему периметру моря в прибрежной зоне происходят процессы, подобные происходящим в 1930-1980 годы (Жило,1954; Залогин и Косарев, 1973; Мамедов, 2007). В результате заметного изменения уровня моря продолжается развитие береговой линии. При повышении уровня моря наблюдается «отступление» берегов в сторону суши, а при понижении – «наступление» в сторону моря. При этом вследствие изолированности моря от океана повышение и понижение уровня происходят одновременно по всему периметру моря (с разной интенсивностью в зависимости от рельефа дна), что негативно отражается на всех видах хозяйственной деятельности в прибрежных районах моря.

Первые инструментальные наблюдения за уровнем моря были начаты в 1837 году в г. Баку. На рис. 1 показаны межгодовые изменения уровня на посту Баку с начала инструментальных наблюдений. Из рисунка следует, что в течение почти столетнего периода (1837-1929 гг.) среднегодовые значения уровня моря изменялись примерно в пределах метрового диапазона, в 1930-1940 гг. уровень моря резко снизился и упал на 1.9 м по сравнению с 1929 годом. С начала 1941-го до конца 1950-х годов понижение уровня замедлилось, и в 1960-е годы наблюдалась некоторая стабилизация его понижения. С 1970 года началось новое снижение уровня моря. В 1977 году его отметка достигла значения -29.00 м БС, которое является самым низким не только за весь период наблюдений, но и за последние 500 лет. Начиная с 1978 года, уровень моря стал резко повышаться, и к 1995 году его отметка достигла -26.50 м БС, т.е. за 18 лет среднегодовой уровень повысился на 2.5 метра. Начиная с 1996 года, в уровенном ходе Каспийского моря наблюдается нестационарный режим: в 1996-1997 гг. уровень моря понизился на 32 см, в 1998-2001 гг. стабилизировался, в 2002-2004 гг. повысился на 18 см. Начиная с 2005 года уровень моря непрерывно понижается. В 2019 г. среднегодовой уровень моря находился на отметке -27.90 м БС, т.е. уменьшился на 1.54 м (по данным пункта «Нефт Дашлары). Такое же поведение уровня наблюдалось в XX веке.

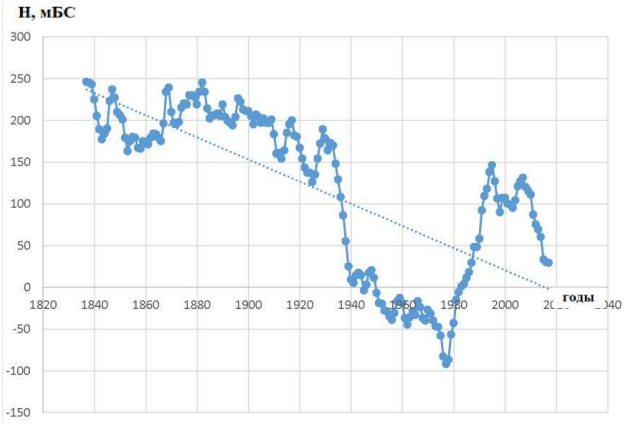


Рис. 1. Колебания уровня Каспийского моря с начала инструментальных наблюдений по Бакинскому футштоку (1837-2017 гг.)

Резкое понижение уровня привело к обсыханию обширных прибрежных площадей дна с образованием молодых террас. В результате площадь моря значительно сократилась, если в 1929 году площадь моря составляла 422 тыс. кв.км, то к 1977 г. она уменьшилась до 371 тыс. кв км.

Материалы геоморфологических, палеографических и исторических исследований показывают, что размах колебания уровня Каспия составлял в плейстоцене (последние 700-500 тысяч лет) около 100 м, в голоцене (последние 10 тысяч лет) – около 14 м, за последние 2 тысячи лет – 10 м и за время инструментальных наблюдений – примерно 3.5 м. На рис. 2 показано изменение уровня Каспия за последние 3.5 тыс. лет, график построен по палеогеографическим, историко-археологическим, картографическим и фактологическим материалам. На рисунке видно, что в уровенном режиме довольно четко выявляется восьмицикличность продолжительностью 450-500 лет, примерно 200-250 лет уровень моря неуклонно повышается, а затем столько же времени понижается. Два соседних ритма образуют один цикл, начало и конец которого характеризуются очень низким уровнем (Алиев и Велиев, 1999; Алиев, 2001). Последний подъем уровня моря (1978-1995 гг.) является наиболее длительным за период инструментальных наблюдений с 1830 года. За 18 лет средняя скорость подъема уровня составила 14 см/год, а в отдельные годы (1990 г.) достигала 37 см. Начиная с 1996 года, по настоящее время уровень моря падает примерно со скоростью 5 см/год.

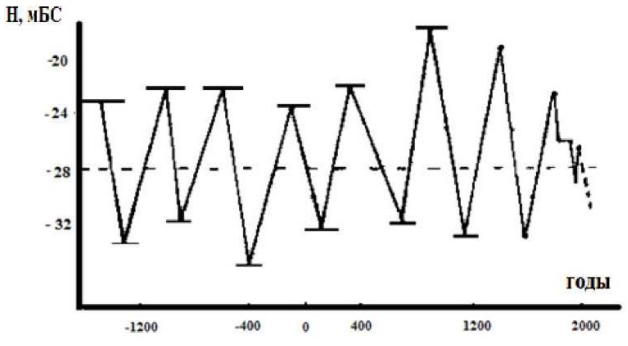


Рис. 2. Вековые изменения уровня Каспийского моря за последние 3.5 тысячи лет

Считается, что основной причиной, вызывающей колебания уровня моря, являются климатические и геологические процессы. В рамках климатической концепции рассматриваются временные периоды климатического масштаба (от десятилетий до столетий), а в рамках геологической концепции периоды значительно большие (от столетий до тысячелетий). На фоне долгопериодных изменений (происходящих под влиянием тектонических процессов) наблюдаются колебания, вызываемые изменениями климата. Последние приводят к изменению гидрометеорологических условий водосборного бассейна и акватории моря, приводящих к изменению элементов водного баланса Каспия (Алиев, 2001; Нестеров 2016; Мамедов, 2007; Панин и др., 2014; Родионов, 1989). При подъеме уровня моря (1978-1995 гг.) дополнительно поступающий объем воды приводил также к изменению гидрохимических свойств воды, в частности, к уменьшению ее солености. Проведенный синхронный анализ уровня и солености показал, что в указанный период соленость воды, измеренная в разных районах моря, в среднем уменьшилась на около 0.5 промилле, при этом в море поступило дополнительно более 700 км^3 воды (рис. 3).

Это обстоятельство косвенно еще раз указывает на то, что колебания уровня моря (в последние десятилетия) обусловлены главным образом климатическими факторами (Алиев, 1997; Алиев, 2001; Мамедов, 2007; Панин и др., 2005).

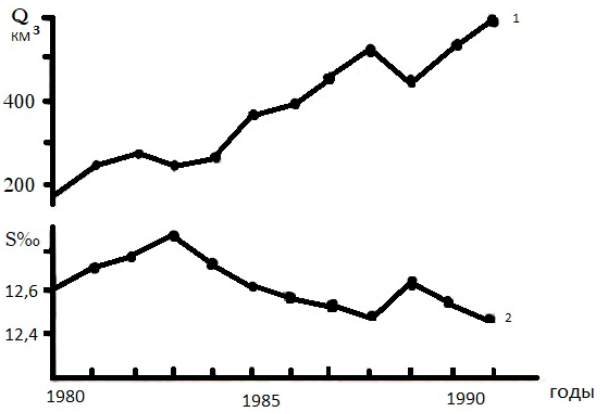


Рис. 3. Связь между соленостью и объемом воды в Каспийском море

Для исследования состояния береговой зоны Азербайджанской Республики использованы материалы, полученные во время аэрофотосъемки прибрежной полосы, инструментальные измерения уровня моря и визуальные экспедиционные наблюдения. По результатам дешифрирования аэрокосмических снимков, а также по топографическим и тематическим картам построено около 100 карт затопления береговой полосы Республики в масштабе 1:25000. По атласу затопления рассчитаны площади затопления при максимальном уровне моря, наблюдавшемся в 1996 г. (-26.5 м БС). В настоящее время в морской береговой зоне находится 11 административных районов Азербайджанской Республики. В таблице 1 представлены значения площади

затопления этих районов, а также длина береговых линий. Выявлено, что прибрежная береговая зона страны по характеру затопления разделяется на 4 участка:

- от реки Самур до Абшеронского полуострова,
- Абшеронский полуостров,
- от Абшеронского полуострова до устья реки Кура,
- от реки Кура до реки Астарачай.

Данные таблицы 1 показывают, что общая площадь затопленных территорий в пределах береговой зоны Азербайджанской Республики в 1996 году, когда уровень моря достиг отметки (- 26.5 м БС), составила 48450 га (484.5 кв. км).

Таблица 1

Площади затопления прибрежной зоны Каспийского моря по административным районам Азербайджана

Наименование районов	Длина береговой линии, км	Площадь затопления, га (при уровне - 26,50 м БС)
Хачмазский	66.0	2070
Шабранский	20.7	1040
Сиазаньский	39.6	610
Хызынский	26.1	510
Баку (мегаполис)	289.6	3820
Сальянский	11.7	60
Нефтчалинский	94.6	13270
Гызыл-Агачский заповедник	102.0	23900
Масаллинский	31.1	2670
Лянкяранский	35.1	410
Астаринский	21.1	90
Итого	738.0	48450

Самым большим затоплениям подвержен четвертый участок прибрежной полосы, на долю которого приходится более 80% площади подтопления и затопления. Большая часть территории участка находится на Кура-Аразской низменности, берега которой являются пологими.

В результате подъема уровня на 2.5 м за 18 лет (1978-1995 гг.) в нашей Республике оказались в зонах подтопления или затопления 50 населенных пунктов, включая такие крупные города, как Баку, Сумгайыт, Лянкяран, Астара и др., а также:

- 250 промышленных предприятий,
- 20 км железной дороги,
- 60 км автомобильной дороги,
- 10 тысяч гектаров орошаемых земель,
- 55 тысяч гектаров зимних пастбищ,
- рекреационные объекты на 200 тысяч человек.

Самый большой ущерб нанесен нефтегазовым месторождениям, нефтеперерабатывающим объектам, рыбной промышленности, морскому транспорту, портовым и береговым сооружениям. Выведено из эксплуатации более 300 нефтяных скважин, наиболее крупный комплекс «Нефт Дашлары» находился в предаварийном состоянии.

На Абшеронском полуострове в результате подъема уровня под водой оказалась значительная часть благоустроенных пляжей с находящимися там объектами. В настоящее время на этом полуострове проживает более 30% населения страны и на его долю приходится 70% промышленного потенциала Республики. Здесь расположены объекты нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей, нефтехимической и химической промышленности, черной и цветной металлургии, также развиты рекреация и интенсивное пригородное сельское хозяйство. На Абшеронском полуострове подверглось затоплению 30 населенных пунктов, санатории, дома отдыха, пансионаты, пляжи и многие другие объекты.

Анализ графика колебаний уровня моря за время инструментальных наблюдений (рис. 1) позволил прийти к выводу, что изменения уровня в значительной мере (как и в вековых изменениях) подчиняются периодичности. Пики уровня более или менее закономерно повторяются через 30-35 лет. Наложение 30-35 летней периодичности на график изменения уровня моря показало, что с 1837 года на графике проявилось 6 периодов повышения уровня.

В проблеме прогноза уровня Каспия должно быть четко определено, что является причиной, а что следствием. Если признается, что изменение уровня является следствием изменения климата, то сначала нужно научиться прогнозировать климат. Многие ученые считают, что на современном этапе развития науки и речи не может быть о достоверном прогнозе глобального и регионального климата с заблаговременностью на десятки лет.

С исторической точки зрения падение уровня вполне вероятно в недалеком будущем, что следует из результатов анализа уровенного режима Каспийского моря за последние 3.5 тысячи лет. Этот вывод хорошо согласуется с расчетами, основанными на анализе климатических условий Атлантического сектора Северного Полушария (Крицкий и др., 1975; Панин и др., 2014; Родионов, 1989; Тужилкин и др., 2011; Терзиев и Никонова, 2003). Согласно результатам этих анализов было отмечено, что эпоха атмосферной циркуляции, установившаяся в 1972 году, а значит, и гидрометеорологический режим, соответствующий этой эпохе и обуславливающий современные параметры водного баланса Каспия, должны были бы сохраниться

до 1996 года. После этого времени должна была бы произойти смена эпохи атмосферной циркуляции и уровень моря мог бы начать падать. Все это наблюдается в настоящее время**.**

В прогнозах, основанных на климатических факторах, большинство исследователей сходится на том, что понижение уровня Каспия продлится, по крайней мере, до середины XXI века, после этого времени должна получить развитие синоптическая эпоха, начавшаяся в конце XX века и обусловившая смену регрессивного состояния Каспия на трансгрессивное.

Заключение

Таким образом, по данным дистанционных, контактных (инструментальных) измерений и экспедиционных наблюдений в прибрежной зоне Каспийского моря в пределах Азербайджанской Республики построены карты затопления в масштабе 1:25000. По этим картам рассчитаны площади затопления 11 административных районов республики, находящихся в прибрежной зоне. Рассмотрены негативные последствия резких изменений уровня моря (подъем и спад) и их влияние на народно-хозяйственные объекты и природу прибрежной зоны Каспия.

Показано, что основными причинами изменения уровня моря (в климатические периоды) являются колебания гидрометеорологических параметров водосборного бассейна Каспия.

Произведен анализ графиков изменения уровня моря за последние 3.5 тыс. лет, и сделано предположение о продолжении падения Каспийского моря до середины XXI века.

ЛИТЕРАТУРА

Алиев А.С. Взаимосвязь колебания уровня и солености воды Каспийского моря. Метеорология и гидрология, No. 2, 1997, с. 61-63.

Алиев А.С. Подъем уровня Каспийского моря и затопление прибрежной зоны Азербайджанской республики. Элм. Баку, 2001, 144 с.

Алиев А.С., Велиев С.С. Динамика изменения уровня Каспийского моря в историческое время и ближайшем будущем. Метеорология и гидрология, No. 3, 1999, с. 79- 87.

Жило П.В. К вопросу о влиянии понижения уровня Каспийского моря на народное хозяйство. В сб: Колебания уровня Каспийского моря. Т. 2. Изд. АН СССР. Москва, 1954, с. 118-126.

Залогин Б.С., Косарев А.Н. Некоторые природно-хозяйственные проблемы Каспийского моря. География в школе, No. 5, 1973, с. 18-20.

Каплин П.А. Последствия изменений климата в регионе Каспийского моря. Региональный обзорный документ за 1995. ЮНЕП, Женева, 1997, 125 с.

Крицкий С.Н., Кореннистов Д.В., Раткович Д.Я. Колебания уровня Каспийского моря. Наука. Москва, 1975, 159 с.

Мамедов Т.А., Гусейн-заде О.Д., Яшенко В.Р. К проблеме падения уровня Каспийского моря. Доклады АН Аз.ССР, Т. 32, No. 4, 1976, с. 66-70.

Мамедов Р.М. Гидрометеорологическая изменчивость и экогеографические проблемы Каспийского моря. Елм. Баку, 2007, 436 с.

Нестеров Е.С. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. Триада ЛТД. Москва, 2016, 378 с.

Панин Г.Н., Соломонова И.В., Выручалкина Т.Ю. Режим составляющих водного баланса Каспийского моря. Водные ресурсы, Т. 41, No. 3, 2014, с. 488-495.

Панин Г.Н., Мамедов Р.М., Митрофанов И.В. Современное состояние Каспийского моря. Наука. Москва, 2005, 356 с.

Родионов С.Н. Современные изменения климата Каспийского моря. Гидрометеоиздат. Москва, 1989, 124 с.

Терзиев Ф.С., Никонова Р.Е. Некоторые итоги изучения современного состояния гидрометеорологического режима Каспийского моря и перспективы дальнейших исследований. Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. Гидрометеоиздат. Санкт-Петербург, 2003, с. 239-253.

Тужилкин В.С., Косарев А.Н., Архипкин В.С., Никонова Р.Е.

REFERENCES

Aliev A.S. Relationship between level fluctuations and salinity of the Caspian Sea. Meteorologiya i Gidrologiya, No. 2, 1997, pp. 61-63 (in Russian).

Aliev A.S., Veliev S.S. Dynamics of the Caspian Sea level change in historical time and the near future. Meteorologiya i Gidrologiya, No. 3, 1999, pp. 79-87 (in Russian).

Aliev A.S. Rise of the level of the Caspian Sea and flooding of the coastal zone of the Republic of Azerbaijan. Elm. Baku, 2001, 144 p. (in Russian).

Frolov A.V. Modeling of long-term fluctuations in the level of the Caspian Sea: theory and applications. GEOC. Moscow, 2003, 171 p. (in Russian).

Kaplin P.A. Consequences of climate change in the Caspian Sea region. Regional Overview Document for 1995. UNEP, Geneva, 1997, 125 p. (in Russian).

Kritsky S.N., Korennistov D.V., Ratkovich D.Ya. Fluctuations in the level of the Caspian Sea. Nauka. Moscow, 1975, 159 p. (in Russian).

Mamedov T.A., Huseyn-zade O.D., Yashenko V.R. To the problem of the Caspian Sea level drop. Reports of the Academy of Sciences of the Azerbaijan SSR, Vol. 32, No. 4, 1976, pp. 66-70 (in Russian).

Mamedov R.M. Hydrometeorological variability and ecogeographical problems of the Caspian Sea. Elm. Baku, 2007, 436 p. (in Russian).

Nesterov E.S. Water balance and fluctuations in the level of the Caspian Sea. Modeling and forecasting. Triada LTD. Moscow, 2016, 378 p. (in Russian).

Panin G.N., Solomonova I.V., Vyruchalkina T.Yu. The regime of the components of the water balance of the Caspian Sea. Water resources, Vol. 41, No. 3, 2014, pp. 488-495 (in Russian).

Panin G.N., Mamedov R.M., Mitrofanov I.V. The current state of the Caspian Sea. Nauka. Moscow, 2005, 356 p. (in Russian).

Rodionov S.N. Modern climate change in the Caspian Sea. Gidrometeoizdat. Moscow, 1989, 124 p. (in Russian).

Terziev F.S., Nikonova R.E. Some results of studying the current state of the hydrometeorological regime of the Caspian Sea and prospects for further research. Hydrometeorological aspects of the problem of the Caspian Sea and its basin. Gidrometeoizdat. St-Peterburg, 2003, pp. 239-253 (in Russian).

Tuzhilkin V.S., Kosarev A.N., Arkhipkin V.S., Nikonova R.E. The long-term variability of the hydrological regime of the Caspian Sea due to climate variations. Bulletin of Moscow University, Vol. 5: Geography, No. 2, 2011, pp. 62-71 (in Russian).

Многолетняя изменчивость гидрологического режима Каспийского моря в связи с вариациями климата. Вестник Московского университета. Серия 5: География, No. 2, 2011, с. 62-71.

Фролов А.В. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. ГЕОС. Москва, 2003, 171 с.

Zalogin B.S., Kosarev A.N. Some natural and economic problems of the Caspian Sea. Geography at school, No. 5, 1973, pp. 18-20 (in Russian).

Zhilo P.V. To the question of the impact of lowering the level of the Caspian Sea on the national economy. In collection: "Fluctuations in the level of the Caspian Sea." Vol. 2, AN SSSR Publishing. Moscow, 1954, pp. 118-126 (in Russian).

ИЗМЕНЕНИЕ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ И ЕГО ПОСЛЕДСТВИЯ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ АЗЕРБАЙДЖАНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

Алиев А.С., Татлыева З.И., Ахмедова Р.Ю , Сулейманлы Д.Г.
Институт географии им. акад. Г.А. Алиева Национальной Академии наук Азербайджана
AZ1143, Баку, Азербайджан, просп. Г.Джавида, 115: amir50@mail.ru

Резюме. В статье представлены результаты изучения колебания уровня Каспийского моря. Рассмотрены негативные последствия резких изменений уровня моря (спад в 1929-1977 и подъем в 1978-1995 гг.) в прибрежной зоне Азербайджанской Республики. Для исследования затопляемости береговой зоны Азербайджанской Республики использованы дистанционные (аэрофотосъемки прибрежной зоны), контактные измерения уровня моря, а также топографические и тематические карты. Построено около 100 карт затопления и подтопления береговой полосы в масштабе 1:25000. По этим материалам дается оценка площади затопления по административным районам прибрежной зоны. Выявлено негативное влияние подъема уровня на промышленные и сельскохозяйственные объекты, находящиеся в прибрежной зоне, особенно на Абшеронском полуострове. Здесь подверглось затоплению 30 населенных пунктов, санатории, дома отдыха, пансионаты, пляжи и многие другие объекты.

Выявлено, что основной причиной, вызывающей колебания уровня моря, являются климатические и геологические процессы. В рамках климатической концепции рассматриваются временные периоды климатического масштаба (от десятилетий до столетий), а в рамках геологической концепции – периоды значительно большие (от столетий до тысячелетий). На фоне долгопериодных изменений (происходящих под влиянием тектонических процессов) наблюдаются колебания, вызываемые изменениями климата. Эти изменения климата приводят к изменению гидрометеорологических условий водосборного бассейна и акватории моря, приводящих к изменению элементов водного баланса Каспия. На основе анализа графиков изменения уровня моря за последние 3,5 тыс. лет сделано предположение о продолжении его падения по крайней мере до середины XXI века.

Ключевые слова: *Каспийское море, колебания уровня, прибрежная зона, затопления, прогноз уровня моря*

XƏZƏR DƏNİZİ SƏVİYYƏSİNİN DƏYİŞILMƏLƏRİ VƏ ONUN AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASININ SAHİL ZONASINDA NƏTİCƏLƏRİ

Əliyev Ə.S., Tatlıyeva Z.İ., Əhmədova R.Y., Süleymanlı D.Q.
Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının akad. H. Ə. Əliyev adına Coğrafiya İnstitutu
AZ1143, Bakı, H. Cavid pr., 115: amir50@ mail.ru

Xülasə. Məqalədə Xəzər dənizinin səviyyə dəyişilmələri və bu prosesin Azərbaycan Respublikasının sahilyanı zonasındakı fəsadları təqdim olunur. Dəniz səviyyəsindəki kəskin dəyişikliklərin mənfi nəticələri göstərilir (1929-1977-ci illərdə azalma və 1978-1995-ci illərdə yüksəlmə). Dənizin sahil zonasında yerləşən inzibati rayonlar üzrə subasmaya məruz qalan ərazilərin sahələrinin qiymətləndirilməsi verilmişdir. Azərbaycan Respublikasının sahil zonasının subasmaya məruz qalan ərazilərini öyrənmək üçün distansion (sahil zonasının aero - foto şəkilləri) məlumatlardan, dəniz səviyyəsinin instrumental ölçülərindən və həmçinin topoqrafik və tematik xəritələrdən istifadə edilmişdir. Sahil zolağının 100-ə yaxın xəritəsi 1: 25000 miqyasında tərtib edilmişdir. Bu məlumatlar əsasında sahil zonasının inzibati rayonlar üzrə subasma sahələrinin qiymətləri müəyyən edilmişdir. Sahil zonasında, xüsusilə Abşeron yarımadasında yerləşən sənaye və kənd təsərrüfatı obyektlərinə dəniz səviyyəsinin qalxmasının neqativ nəticələri təqdim edilir.

Dəniz səviyyəsinin tərəddüdlərinin əsas səbəbinin iqlim və geoloji proseslər olduğu təsdiq edilir. Səviyyə dəyişilmələri iqlim konsepsiyası daxilində onilliklərdən əsrlərə qədər və geoloji konsepsiya çərçivəsində isə əsrlərdən minilliyə qədər müddətlərdə baş verir. Tektonik proseslər fonunda iqlim dəyişilmələri baş verir. Sonuncusu, dənizin sutoplama hövzəsi və akvatoriyasındakı hidrometeoroloji şəraitin və Xəzərin su balansı elementlərinin dəyişilməsinə səbəb olur.

Tarixi dövr ərzində (son 3500 il) dəniz səviyyəsinin əsrlər üzrə (100 illiklər) dəyişilmələri və instrumental ölçmələrin illər üzrə (son 190 il) dəyişiklikləri təhlil edilir. Xəzər dənizinin səviyyəsinin ən azı 21-ci əsrin ortalarına qədər *enməkdə davam edəcəyi (proqnozu) barədə fərziyyə irəli sürülür.*

Açar sözlər: *Xəzər dənizi, səviyyə tərəddüdləri, sahilyanı zona, subasma, dəniz səviyyəsinin proqnozu*

ANAS Transactions Earth Sciences 2 / 2021

http://www.journalesgia.com

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК ПРИОРИТЕТНЫЙ ФАКТОР РАЗВИТИЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Велиев Э.Ф., Алиев А.А.

НИПИ «Нефтегаз», SOCAR, Баку, Азербайджан

AZ1122, Баку, Азербайджан, ул. Г.Зардаби, 88A: elchinf.veliyev@socar.az

INNOVATIVE TECHNOLOGIES AS A PRIORITY FACTOR OF THE OIL AND GAS INDUSTRY DEVELOPMENT

Veliyev E.F., Aliyev A.A.

Oil and Gas Research and Design Institute, SOCAR

88A, H.Zardabi str., Baku, Azerbaijan, AZ1122: elchinf.veliyev@socar.az

Keywords: *innovation, invention, Hubbert's peak, oil production, development strategy*

Summary. The petroleum and petrochemicals industry is one of the fastest growing industries of today and still remains a key factor underlying the economy of every industrialized country. However, the industry has faced many challenges in a recent period due to the drop in hydrocarbon prices, growth in production costs and increasing uncertainty associated with the changing geopolitical situation in the world arena. One of the most challenging questions for the industry today is: Has hydrocarbon production reached its peak? These questions have divided researchers into two large camps. The first group are supporters of Hubbert's theory, which proposed in the mid-1950s that hydrocarbon production in the U.S. peaked in the early 1970s and global production declined in the early 2000s and thereafter. The second group of scientists fundamentally disagrees with Hubbert's theory, or rather with the possibility of accurately predicting this peak. In a nutshell, the position of experts opposing Hubbert's theory can be expressed by stating that the date of peak oil will only be known post factum, and not immediately. Leaving aside the disagreements and arguments of specialists from both groups, it is necessary to emphasise the importance of introducing innovative technologies and the definition assigned to this mechanism depending on the approach: an effective tool for increasing hydrocarbon production or a tool for preventing negative development scenarios. The role and necessity of innovative technologies cannot be overestimated. The paper considers the role and application of innovative technologies as a tool for development of the oil and gas industry, identifies target strategies for innovation development and describes the most promising technologies from this point of view.

© 2021 Earth Science Division, Azerbaijan National Academy of Sciences. All rights reserved.

1. Введение

Нефтяная и нефтехимическая промышленность на сегодняшний день является одной из самых бурно развивающихся отраслей (Hussain et al., 2006) и все еще остается ключевым фактором, лежащим в основе экономики каждой индустриальной страны. Однако в последнее время эта отрасль столкнулась со многими проблемами в связи с падением цен на углеводородное сырье, увеличением себестоимости добычи и ростом уровня неопределенности, связанного с изменением геополитической ситуации на мировой арене. Одним из наиболее актуальных вопросов для отрасли в условиях современной реальности является вопрос: достигнут ли пик добычи углеводородов? По сути, от бинарного ответа на него зависит как развитие, так и стабильность нефтяной индустрии. Действительно, какой смысл в больших и зачастую долгосрочных инвестициях, если добыча идет на спад и прошла максимум своей производительности? Безусловно, возникает ряд дополнительных вопросов, не менее важных по своей сути, наиболее животрепещущие из которых: а когда этот пик был пройден, и сколько времени будет длиться спад?

Данные вопросы разделили исследователей на два больших лагеря.

Первая группа является приверженцами теории Хабберта, предложенной в середине 50-х годов прошлого века о достижении пика добычи углеводородов в США в начале 1970-х годов, а в мировой добыче – в начале 2000 г. и дальнейшем ее спаде (Hubbert, 1956). Справедливости ради стоит отметить, что данный прогноз в рамках

нефтяной индустрии США полностью себя оправдал, добыча нефти в США действительно достигла своего пика в 1971 г., и вплоть до 2010 года наблюдался спад. Однако в период с 2010 по 2020 годы пик 1971 г. был пройден, а прогнозы по достижению пика мировой добычи в 2000 г. так и не осуществились по настоящее время. На сегодняшний день существует с десяток исследовательских работ, описывающих подобные сценарии развития нефтяной отрасли согласно концепции Хабберта, в них приводится различная аргументация по несостоятельности предыдущих прогнозов, выдвигаются механизмы и инструменты для прогнозирования, приводятся даты пройденных или будущих пиков добычи и т.д. Безусловно, теория Хабберта, учитывая, что углеводороды являются не возобновляемыми ресурсами, фактически является аксиомой, так как, в конце концов, в какой-то момент добыча должна достигнуть своего максимума, а интерес с научной точки зрения представляет не факт достижения пика, а возможность его определения. Вне зависимости от применяемых инструментов и методов приверженцы данного подхода считают, что рассчитать пик добычи нефти возможно.

Вторая группа ученых в корне не согласна с теорией Хабберта, а вернее, с возможностью точного прогнозирования данного явления. Сторонники данного подхода приводят два основных аргумента в противовес:

- Первый аргумент заключается в том, что почти все прогнозы пика нефтедобычи основаны на подсчете запасов традиционных источников нефти и не рассматривают нетрадиционные источники. Например, сланцевую нефть, а ее запасы превышают запасы традиционной нефти по некоторым подсчетам в 13 раз. Но представители противоположного лагеря парируют данный аргумент возросшими объемами потребления нефти (только с 1980 по 2010 эта цифра выросла с 23 до 31 млрд. баррелей в год) и считают, что данный фактор нивелируется и впредь будет нивелироваться возрастающим спросом (Mitchell et al., 2012).
- Второй аргумент заключается в том, что ни одна прогнозная модель не учитывает развитие технологий и оспорить его уже не так легко. Так, к примеру, среднее значение коэффициента извлечения нефти в 1980 г. составляло 22%, а в настоящее время благодаря внедрению инновационных методов разработки месторождений составляет 35%. Нетрудно предположить возможную разницу в полученных прогнозах даже в пределах одной математической модели. Дополнительно можно добавить, что разработка и внедрение новых технологий на протяжении последних десятилетий позволили переквалифицировать значительные объемы трудно извлекаемых запасов нефти в категорию рентабельных и перспективных. (Mitchell et al., 2012). Фактически именно инновационные технологии, лежащие в основе разработки месторождений сланцевой нефти в США, привели к самому быстрому росту добычи нефти за последние сто лет (Decker et al., 2016; Mills, 2013).

Вкратце позицию специалистов противников теории Хабберта, можно выразить утверждением, что дата достижения пика добычи нефти будет известна лишь постфактум и то не сразу.

Оставив в стороне разногласия и аргументы специалистов обоих групп, необходимо выделить важность внедрения инновационных технологий и при этом не столь важно присваиваемое в зависимости от подхода определение данного механизма: эффективный инструмент для роста добычи углеводородов или инструмент для предупреждения негативных сценариев развития. Роль и необходимость внедрения инновационных технологий переоценить сложно. Цель и задачи данной работы заключаются в анализе и классификации наиболее перспективных и многообещающих инновационных разработок для эксплуатации нефтяных месторождений.

2. Понятия изобретения и инновации

Первоначально необходимо четко провести различие между терминами «изобретение» и «инновация». Зачастую разночтение именно этих двух терминов приводит к серьезной путанице при попытке классификации новых технологий. Изобретение – это процесс создания нового устройства или продукта, а инновация – это процесс внесения изменений в уже существующий продукт при помощи новых идей или способов.

Согласно Шумпетеру, процесс инновации носит линейный характер, а вот процесс изобретения имеет прямо противоположную природу и развивается скачкообразно (Schumpeter, 1934). Теория линейной модели развития инноваций заключается в том, что наилучшим способом увеличения количества новых технологий является увеличение объема ресурсов, выделяемых на исследования и разработки, то есть согласно данной модели увеличение количества предложений неизбежно приведет к росту изобретений и инноваций (Schumpeter, 1934).

В 1950-х годах популярность приобрела теория спроса, согласно которой считалось, что спрос на товары и услуги оказывает большее влияние на стимулирование изобретений, чем прогресс в уровне знаний, а линейная модель развития инноваций была практически отброше-

на из-за высокого риска, неопределенности, временных и ресурсных требований (Sekhar and Dismukes, 2009) (рис.1). На сегодняшний день доминирующей теорией развития инноваций является концепция так называемых «открытых инноваций», представляющая собой сложную модель системной обратной связи между спросом и предложением (Hanna et al., 2015; Foxon, 2003; Grove, 1996; Chesbrough and Rosenbloom, 2002; Chesbrough, 2003; Chesbrough and Spohrer, 2006). Вкратце: данная концепция признает кооперативную природу партнеров в промышленных инновациях вместо полной зависимости от классической вертикальной интеграции всех инновационных функций в одной корпорации.

Хотя общепринятой типологии инноваций не существует, в большинстве существующих классификаций выделяют две основные группы: радикальные (прерывистые) и инкрементные (непрерывные) (Mueser, 1985; Shenhar et al., 1995; Betz, 2003; Garcia and Calantone, 2002; Dismukes, 2005).

Шумпетер (1942) и Берс и др. (2009) считают, что именно радикальные инновации приводят к технологическим революциям и выделяют три основные тенденции радикальных инноваций (Schumpeter, 1942; Bers, 2009):

- для радикальных инноваций необходимо крупное разрушительное событие, при таком подходе трудности, возникающие в нефтяной отрасли, на самом деле являются важным фактором развития;
- все крупные инновации развиваются в течение жизненного цикла технологии.

Йеррамилли и Секхар (2006) представили первую модель жизненного цикла, продукта – от изобретения до инновации (Yerramilli and Sekhar, 2006). Секхар и Дисмукес (2009) зафиксировали четырехэтапный жизненный цикл продукции: начальный этап (I), этап подъема и упадка (II), этап возрождения и быстрого роста (III) и этап выживания (IV) (рис. 1) (Sekhar and Dismukes, 2009). Коннелли и др. (2011) добавили в жизненный цикл пятую стадию, названную V (стадия окончательной смерти), чтобы обозначить конец инновации (Connell et al., 2011).

- каждая инновация основывается на предыдущих достижениях, что указывает на важность четкого учета предыдущих достижений в отрасли.

3. Почему необходимы инновации в нефтегазовой отрасли?

Необходимость внедрения инновационных технологий можно свести к решению трех актуальных вызовов в современной нефтегазовой отрасли:

1) Обеспечение конкурентоспособности с другими отраслями промышленности

Сегодня низкая цена на нефть является одной из наиболее важных причин, обуславливающих потребность в инновациях для обеспечения конкурентоспособности с другими отраслями промышленности. Следует отметить, что данный фактор, несмотря на уменьшение рентабельности многих проектов, все же является необходимым условием для развития инноваций. При высоких ценах на нефть нефтяные компании заняты поддержанием высоких темпов текущей деятельности, внедрение инновационных технологий приоритетом не является, и лишь падение цен на нефть неизбежно приводит к росту внедряемых инноваций, поскольку компаниям приходится активно конкурировать, чтобы выжить в крайне нестабильных экономических условиях (Sider and Ailworth, 2015). Хорошей иллюстрацией данного примера служит добыча сланцевой нефти в США, на которую приходится более 50% общей добычи. По первоначальным оценкам аналитиков, цена безубыточности сланцевой нефти составляла 75 долларов за баррель, но внедрение инновационных технологий позволило компаниям-операторам снизить цену безубыточности до 30-35 долларов за баррель (Mawji, 2016) и оставаться конкурентоспособными на мировом рынке.

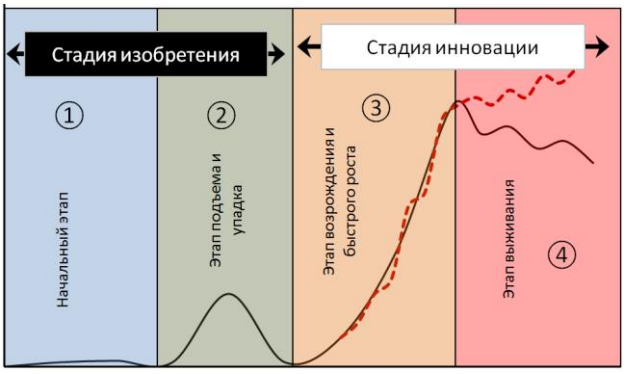


Рис. 1. Пример четырехэтапного жизненного цикла продуктов – от изобретения до инновации (Sekhar and Dismukes, 2009)

2) Автоматизация высокозатратных, опасных и склонных к ошибкам задач

Сегодня практически каждая отрасль промышленности представляет собой высокотехнологичный процесс, генерирующий огромное количество данных ежесуточно, что значительно повышает риски, связанные с ошибочными расчетами, да и просто с человеческим фактором. Процесс учета всей поступающей информации без применения современных цифровых технологий практически невозможен. Подтверждени-

ем служит неуклонно растущая доля интернет-технологий в таких отраслях, как нефтяная, металлургическая и минералодобывающая, которая по оценке компании McKinsey&Co к 2025 году превысит 100 млрд. долларов в год (PLH Group, 2015).

3) Обеспечение устойчивого развития нефтегазовой отрасли

В решении данного вопроса специалисты выделяют два основных направления:

- улучшение рентабельности существующих месторождений, так как 53,3% мировых месторождений классифицируются как трудно извлекаемые и нерентабельные (тяжелые нефти, горючие сланцы и тд.) (Demirbas et al., 2016).
- необходимость в открытии новых месторождений, которые, по мнению специалистов, будут находиться на гораздо больших глубинах и в условиях, значительно более сложных в сравнении с существующими. Инновационные технологии будут иметь огромное значение для материализации этих запасов (Kleinschmidt, 2016; Perrons, 2014). Вудди считает, что новые технологии бурения позволят в ближайшие десятилетия увеличить мировые запасы нефти в шесть раз до 10,2 триллиона баррелей (Woody, 2013).

4. Основные цели и задачи, решаемые внедрением инновационных технологий

Основные цели и задачи, решаемые внедрением инновационных технологий, можно разделить на 2 группы:

- снижение затрат и экономия времени;
- повышение эффективности существующих технологий.

Рассмотрим каждую из вышеперечисленных групп в отдельности

4.1. Снижение затрат и экономия времени

Снижение производственных затрат имеет решающее значение для нефтегазовой отрасли, поскольку, несмотря на сверхнормативные доходы, маржа прибыли крупнейших нефтегазовых компаний составляла не более 8-9% даже в годы достаточно высоких цен на углеводородное сырье (Farris, 2012). К тому же немаловажным является и факт увеличения популярности альтернативных источников энергии, что, по мнению специалистов, существенно уменьшает конкурентоспособность нефтегазовой отрасли, и увеличение рентабельности добычи путем снижения безубыточной стоимости является обязательным условием выживания отрасли. (Kleinschmidt, 2016) Учитывая, что как добыча нефти, так и эксплуатация нефтегазовых месторождений являются дорогостоящим процессом, тесно связанным с научными исследованиями, дорогостоящим оборудованием и квалифицированной рабочей силой, падение цен на нефть, несомненно, оказывает существенное негативное влияние на производственные показатели практически всех нефтяных компаний. Исключение составляют компании, широко внедряющие и использующие инновационные технологии. Например, по данным Миллса (2013), технологический прогресс привел к тому, что средняя стоимость добычи барреля сланцевой нефти снизилась до 7-15 долларов (Mills, 2013). В отчете McKinsey & Co описывается, как цифровые нефтяные месторождения позволили одной нефтяной компании сократить операционные и кадровые расходы на 10-25 % и при этом увеличить добычу на 5 % (Elatab, 2012). В более позднем исследовании McKinsey & Co отмечается, что использование цифровых технологий в нефтегазовом секторе может снизить капитальные затраты до 20% и сократить операционные расходы при геологоразведке и добыче на 3-5%, а при переработке углеводородного сырья – до 50% (Boman and Staff, 2016).

На рис. 2 графически представлено распределение долей 10 наиболее инновационных технологий нефтегазовой промышленности в 2021 году на основе данных международной цифровой платформы StartUs.

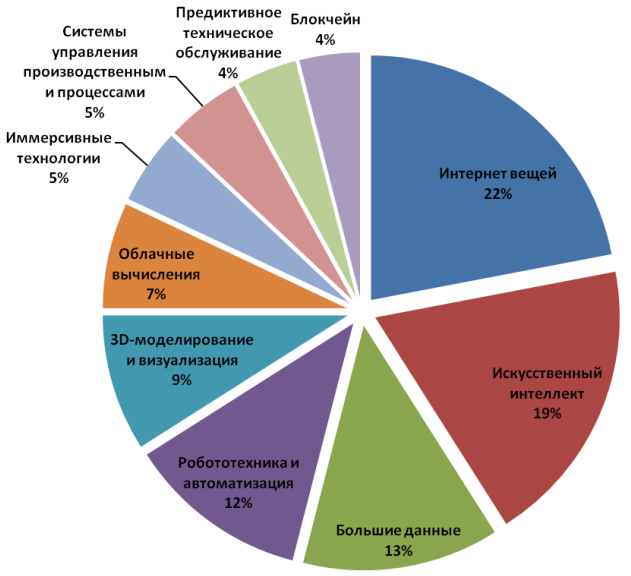


Рис. 2. 10 наиболее инновационных технологий нефтегазовой промышленности

Рассмотрим вкратце основные преимущества и механизмы работы данных технологий:

1. Интернет вещей (IoT)

Технология Интернет (IoT) вещей, представляет собой систему, состоящую из устройств или предметов, подключенных к сети (включая Интернет) или к другим устройствам, работающих автономно без вмешательства человека. Нефтега-

зовая промышленность использует IoT для повышения производительности, оптимизации оборудования, обеспечения безопасности работников и мониторинга удаленных устройств. Как пример можно привести различные датчики, установленные в скважинах, противовыбросовые устройства (ПВО), дроссельные клапаны, позволяющие собирать данные в режиме реального времени, посредством которых возможно выявить неисправности оборудования, увеличить точность прогнозных моделей и организовать более оперативное вмешательство в случае каких-либо осложнений. Решения, предлагаемые IoT, позволяют нефтегазовым предприятиям минимизировать затраты на техническое обслуживание и получить подробную информацию о своем оборудовании или процессах. Так, внедрение данной технологии компаниями General Electric (GE) и BP на 650 глубоководных нефтяных скважинах позволило сэкономить до 3 миллионов долларов в неделю (Wanasinghe et al., 2020; Khan et al., 2017; Shoja and Jalali, 2017; Prometheus Group, 2019).

2. Искусственный интеллект

Под искусственным интеллектом (ИИ) понимается способность компьютерных систем выполнять творческие и интеллектуальные функции, которые традиционно считались прерогативой исключительно человека. Данная область знаний объединяет в себе несколько научных направлений: нейронные сети, машинное обучение, обработку естественного языка, когнитивные вычисления, компьютерное зрение. Следует отметить, что, несмотря на вышеперечисленные научные направления, относящиеся к ИИ, чёткого представления, что входит в понятие искусственного интеллекта, нет, так как нет критериев разумности и соответствия человеческому интеллекту. Искусственный интеллект все чаще применяется для решения комплексных задач практически во всех сферах нефтегазовой промышленности. Платформы с поддержкой ИИ помогают принимать решения, используя инструменты и данные прогнозной, предписывающей и когнитивной аналитики (Rahmanifard and Plaksina, 2019; Choubey and Karmakar, 2021; Braswell, 2013; Veliyev et al., 2021).

3. Большие данные

Компания Oracle представила, пожалуй, наиболее доступное и всеобъемлющее определение данного термина: «*Большие данные — это разнообразные данные, которые поступают с постоянно растущей скоростью и объем которых постоянно растет. Таким образом, три основных свойства больших данных — разнообразие, высокая скорость поступления и большой объем*». Повседневные операции в нефтегазовой отрасли генерируют большие объемы неструктурированных данных, что вызывает серьезные трудности с их обработкой и анализом. Платформы для работы с большими данными помогают аналитикам отрасли извлекать информацию из данных о производстве и производительности. Используя аналитику больших данных, нефтегазовая промышленность извлекает больше пользы из повседневных решений, снижая эксплуатационные расходы (Farris, 2012; Perrons and Jensen, 2015; Feblowitz, 2013; Mohammadpoor and Torabi, 2020). Пример: Технология управления данными Dell EMC data позволила снизить на 68% расходы на ИТ-администрирование, на 40% – расходы на хранение Больших Данных и обеспечить 80% возврата инвестиций для крупной нефтегазовой компании (EMC, 2015).

4. Робототехника и автоматизация

Зачастую операторы нефтегазовой отрасли работают в сложных и труднопроходимых условиях, представляющих значительный риск для безопасности людей. Чтобы устранить этот риск, нефтяная промышленность адаптируется к робототехническим решениям, которые повышают безопасность, а также скорость выполнения операций. Роботы широко применяются для инспекции, съемки и автоматизации производства на нефтяных месторождениях и нефтеперерабатывающих заводах. Робототехника и автоматизация процессов не только ускоряют операции, но и снижают потребность в рабочей силе, что, в свою очередь, повышает эффективность и снижает количество ошибок, вызванных человеческим фактором. Фактически использование автоматизации и надежных коммуникационных сетей для удаленных месторождений позволяет снизить эксплуатационные расходы на 70%, а капитальные затраты – на 3-15% при условии, что нефтяные компании перепроектируют свои объекты с учетом более низкого уровня персонала (Markit, 2016; Shukla and Karki, 2013; Shukla and Karki, 2016).

5. 3D-моделирование и визуализация

3D-моделирование и высококачественная визуализация помогают создать реалистичное представление о внутрискважинном оборудовании, процессах, протекающих в пластах, а в сочетании с историческими данными о добыче успешно моделируют жизненный цикл месторождения. Это помогает с высокой точностью прогнозировать риски, оптимизировать планирование и текущие скважинные операции, снижая затраты и повышая производительность нефтегазовых активов (Evans et al., 2002; Lu et al., 2019).

6. Облачные вычисления (cloud computing)

Облачные вычисления представляют собой модель сетевого доступа, позволяют хранить и об-

рабатывать данные на удаленных серверах, освобождая дорогостоящую локальную память и вычислительные мощности. Нефтегазовая промышленность в своей повседневной деятельности генерирует огромные объемы данных, а облачные инструменты позволяют использовать расширенную аналитику, создавать информативные визуальные панели и получать удаленные данные в режиме реального времени (Perrons and Hems, 2013; Al-Mascati and Al-Badi, 2016; Feblowitz, 2011).

7. Иммерсивные технологии

Иммерсивные технологии включают в себя следующие основные направления: дополненную реальность (AR), виртуальную реальность (VR), смешанную реальность (MR) и расширенную реальность (XR). В нефтегазовой отрасли анимации AR/VR повышают эффективность и снижают количество ошибок, показывая в реальном времени информацию об оборудовании, инструментах и деталях. Например, компании, занимающиеся разведкой и добычей (E&P), используют решения реальности для удаленного мониторинга, визуализации скважин и виртуального обучения. Компания Siemens также проводит обучение технического персонала с применением виртуальных 3D-буровых платформ, что существенно экономит время и средства (Kleinschmidt, 2016; Prometheus Group, 2019; Higgins, 2017).

8. Системы управления производственными процессами (MES)

Система MES объединяет производственные мощности и операционные технологии, такие как диспетчерский контроль и сбор данных (SCADA), и вычислительные системы для управления производственным процессом. Поскольку процессы производства нефтегазового оборудования сложны, инженеры ищут решения для мониторинга и управления непрерывными операционными процессами. MES предлагает интеллектуальную архитектуру для производственных систем с интегрированным управлением для нефтегазовой промышленности, которая обеспечивает более быстрые, безопасные и надежные технологии добычи нефти (Fernandez and Fernandez, 2005; Bailey and Wright, 2003).

9. Предиктивное техническое обслуживание (PdM)

Предиктивное (прогнозное) обслуживание применяется в случаях, когда степень использования оборудования в производственной цепочке оценивается как высокая, а его отказ или длительный простой приводит к существенным финансовым потерям. В отличие от традиционного подхода (превентивного), оно позволяет производить ремонт не по заранее составленному плану, а когда в нем возникает необходимость, что экономит средства и время на плановое обслуживание оборудования, снижая вероятность внепланового простоя. Предиктивное техническое обслуживание включает сбор данных с датчиков на полевых установках и их интеграцию с алгоритмами машинного обучения. Это позволяет инженерам быстро оценивать состояние оборудования и предлагать своевременные решения по техническому обслуживанию. Предиктивные операции в сочетании с программными платформами позволяют визуализировать детали, что дает возможность операторам нефтегазовой отрасли прогнозировать потенциальные отказы. Более того, предиктивное техническое обслуживание находит применение во всех операциях по разведке, добыче, переработке и транспортировке углеводородного сырья. Эти решения повышают безопасность, продлевают срок службы оборудования и снижают затраты, связанные с эксплуатацией и обслуживанием.

10. Блокчейн

Блокчейн — представляет собой распределенную базу данных в виде цепочки блоков. Блокчейн все больше проникает в различные промышленные операции, включая нефтегазовую отрасль. Блокчейн позволяет нефтегазовым компаниям автоматизировать счета-фактуры, послеторговые расчеты и учет совместных предприятий. Использованием цифровых технологий можно снизить затраты до 10% за счет оптимизации моделей ценообразования и цепочек поставок (Choudhry et al., 2016; Gausdal et al., 2018).

4.2. Повышение эффективности

Снижение цен на нефть заставляет компании уделять особое внимание эффективности производственных процессов. По сути, на практике это означает увеличение добычи при наименьшем увеличении производственных затрат (Sider and Ailworth, 2015). Исследования, проведенные McKinsey & Co, показали, что повышение эффективности производства на 10% может потенциально принести дополнительно до 220-260 миллионов долларов США в год (Martinotti et al., 2014). Наиболее ярким примером увеличения эффективности служит добыча сланцевой нефти. Так, внедрение инновационных технологий повысило производительность месторождений на 200-300%, что закономерно объясняет лидерство США по темпам роста добычи в мире. На сегодня широкое применение цифровых технологий может позволить сохранить данное лидерство еще достаточно долгий период (Mills, 2013).

Применение современных технологий значительно улучшает эффективность геологоразведочных работ. Так, применяемая сегодня 4D сейсмическая визуализация, показывающая динами-

ку изменений многих компонентов пласта в виде результатов 3D сейсморазведки в зависимости от четвертого измерения – времени, позволяет, по мнению специалистов, увеличить эффективность сейсморазведки на более чем 50% (Fanchi et al., 1999; Landro, 2015).

Технология парогравитационного воздействия (SAGD), применяемая для добычи тяжелой нефти и битумов также входит в список наиболее востребованных и эффективных инновационных технологий на сегодняшний день (Dijkema, 2004; Giacchetta et al., 2015; Shen, 2013) (рис. 3). Вышеупомянутый факт о значительной доле тяжелой нефти в мировых запасах углеводорода только увеличивает актуальность данной технологии. Технологически парогравитационное воздействие заключается в бурении пары параллельно расположенных горизонтальных скважин в пласте, при этом в верхнюю скважину непрерывно закачивается пар под высоким давлением, и нагретая таким образом пластовая нефть под силой тяжести стекает в нижнюю скважину, откуда впоследствии и откачивается. Впервые данная технология была применена в Канаде и позволила увеличить КИН до 50% при паронефтяном соотношении 5:2. В 1997 г. в Венесуэле применение технологии позволило повысить КИН до 60% по сравнению с 10% при циклической закачке пара в скважину. В частности, технология SAGD позволила компании Occidental Petroleum (OXY) увеличить добычу нефти в Омане на месторождении Мухаизна в 15 раз по сравнению с уровнем 2005 года и установить рекордные показатели в 1 млн. баррелей в день (Mawji, 2016).

На сегодняшний день существует целый ряд SAGD, наиболее распространенными из которых являются:

- Vapour Extraction (VAPEX) – извлечение нефти посредством парообразного растворителя,
- Expanding Solvent SAGD (ES-SAGD) – парогравитационное воздействие (рис. 3) с добавкой растворителя,
- Solvent Aided Process (SAP) – процесс с добавкой растворителя,
- Steam Alternating Solvent (SAS) – чередование закачки пара и растворителя.

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) – одна из самых распространенных, но спорных технологий методов нефтеотдачи и интенсификации притока жидкости и газа, заключающаяся в создании высокопроводимой трещины в коллекторском пласте для обеспечения притока добываемого флюида (Woody, 2013). Инновации в данной технологии впервые были представлены в 2012 г. и первой технологией в этом списке была технология, известная как Zipper Fracking, при которой ГРП производится на одновременно двух рядом расположенных скважинах. В результате внедрения данной технологии на месторождении Барнетт (Техас, США) объем добычи сланцевой нефти вырос вдвое (Gilje et al., 2016) На сегодняшний день существует несколько разновидностей данной технологии, графически представленных на рис. 4.

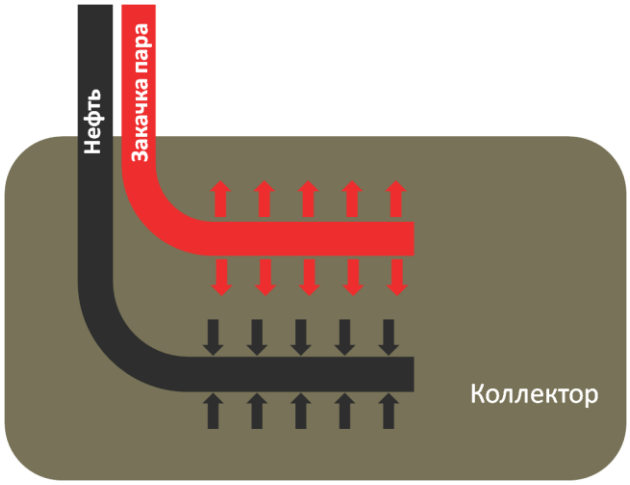


Рис. 3. Парогравитационное воздействие

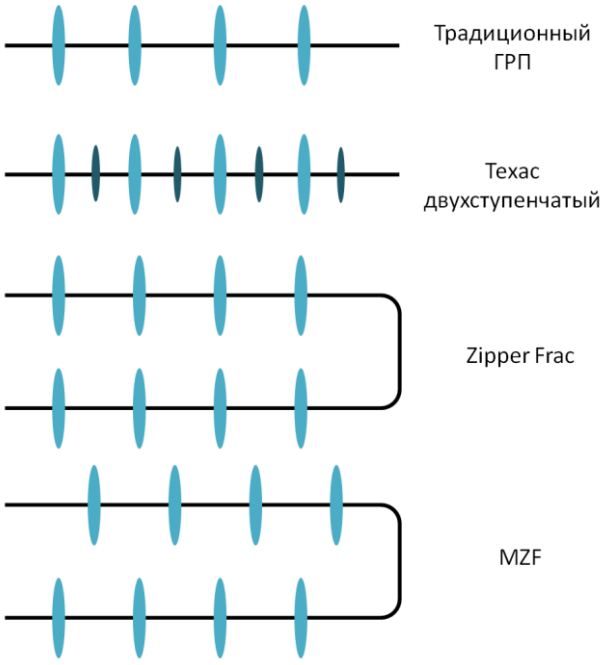
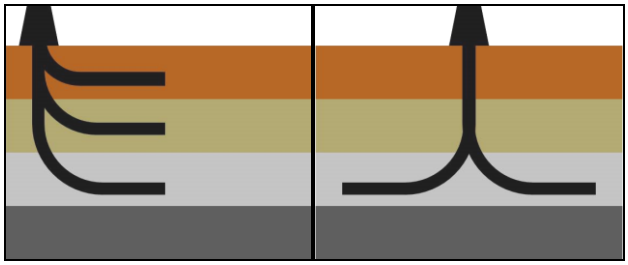


Рис. 4. Технологии проведения гидравлического разрыва пласта

Еще одной инновационной технологией является бурение многоствольных скважин, которые позволяют увеличить коэффициент охвата продуктивного пласта за счет большей протяженности и при одинаковой депрессии дают более высокие стартовые дебиты, чем одностволки (рис. 5а, б).



(а) (б)

Рис. 5. Многоствольные скважины: а) горизонтальные скважины, расположенные в вертикальной плоскости, б) две скважины, расходящиеся в противоположные стороны

Применение цифровых технологий играет не менее важную роль в увеличении эффективности производственных процессов. Многообразие высокотехнологичных решений не позволяет перечислить весь спектр инновационных решений в этой области, но рассмотрим пару примеров внедрения инновационных технологий за последние 10 лет. Применение цифровых технологий для решения логистических задач, связанных с эксплуатацией морских месторождений, позволяет сэкономить в среднем до 5% времени и обеспечивает ежедневную экономию от 30 000 до 100 000 долларов США даже для одной буровой установки (Sebastian, 2015). Уорд (2016) отмечает, что проект PLOT позволил компании ConocoPhillips увеличить производство на 30% за счет автоматизации роботизированных процессов. Вкратце, PLOT – это технология, которая копирует процессы, выполняемые инженерной командой, а затем улучшает их с помощью автоматизации и знания скрытых команд, содержащихся в каждом крупном программном инструменте (Ward, 2016).

В отдельную ветвь стоит выделить инновационные решения в области химического воздействия на пласт (Suleimanov et al., 2021; Suleimanov et al., 2020; Велиев, 2021a; Veliyev and Aliyev, 2021; Исмаилов и Велиев, 2021; Suleimanov et al., 2017; Велиев, 2021b; Нагиева, 2020). На сегодняшний день разрабатывается огромное количество новых составов для увеличения нефтедобычи, основанных на применении нано-добавок (Сулейманов и др., 2014; Suleimanov et al., 2020; Suleimanov and Veliyev, 2016; Suleimanov et al., 2013; Suleimanov et al., 2016). Как отмечалось ранее, открытие новых месторождений нефти и газа будет неизбежно сопровождаться увеличением сложности условий эксплуатации, да и самой добычи. Возникает критическая необходимость добиваться гораздо более усовершенствованных физико-химических свойств применяемых материалов, и в этой связи применение наноразмерных добавок и присадок позволяет решать широкий спектр задач: понижение межфазного натяжения, увеличение механической прочности, увеличение термической устойчивости и т.д. К примеру, применение полимерно-щелочного заводнения в Китае показало увеличение КИН на 20% по сравнению с традиционным заводнением пласта (Woody, 2013). Не менее перспективным является применение микробиологических методов увеличения нефтеотдачи. Например: опытно-промысловые испытания, проведенные в Малайзии, показали увеличение добычи на 47% .

В целом незаменимую роль в повышении эффективности МУН сыграло именно широкое применение инновационных технологий, позволившее значительно расширить границы применимости существующих технологий и их производительность (Veliyev, 2020; Сулейманов и Велиев, 2016; Алієв, 2021; Алиев, 2020; Нагиева, 2020; Велиев, 2020; Suleimanov et al., 2019; Veliyev et al., 2019; Сулейманов и др., 2021; Suleimanov et al., 2015).

5. Заключение

Современные инновационные технологии, безусловно, являются приоритетным инструментом развития нефтегазовой отрасли. На сегодняшний день можно выделить две наиболее ярко выраженные целевые стратегии развития инновационных технологий:

- снижение производственных затрат и экономия времени,
- повышение эффективности существующих технологий.

В статье представлены практические примеры реализации каждой стратегии и рассмотрены наиболее значимые и приоритетные на сегодняшний день.

ЛИТЕРАТУРА

Al-Mascati H., Al-Badi A.H. Critical success factors affecting the adoption of cloud computing in oil and gas industry in Oman. In 2016 3rd MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC), IEEE, Oman, Muscat, 2016, pp. 187-193.

Bailey D., Wright E. Practical SCADA for industry. Elsevier Linacre House. Jordan Hill, Oxford, UK. 2003.

REFERENCES

Aliyev A.A. Improvement of rheological properties of alkali activated geopolymers by using process dry fluids. Prospecting and Development of Oil and Gas Fields, No. 3 (80), 2021, pp. 60-67 (in Russian).

Aliyev A.A. Polyvinylpyrrolidone – based gels for water inflow isolation in wells. Ashirov Readings, Vol. I, 2020, pp. 5-11 (in Russian).

Bers J.A., Dismukes J.P., Miller L.K., Dubrovensky A. Accelerated radical innovation: Theory and application. Technological Forecasting and Social Change, Vol. 76. No. 1, 2009, pp. 165-177.

Betz F. Managing technological innovation: competitive advantage from change. John Wiley & Sons. 2003, 387 p.

Boman K., Staff R. Digital tenacity key to implementing technology in oil, gas industry. 2016, http://www.downstreamtoday.com /(X(1)S(wlydaq55svg2ty55bhiyhsqp))/news/article.aspx?a_id= 53301&AspxAutoDetectCookieSupport=1.

Braswell G. Artificial intelligence comes of age in oil and gas. Journal of Petroleum Technology, Vol. 65, No.1, 2013, pp. 50-57.

Chesbrough H., Rosenbloom R.S. The role of the business model in capturing value from innovation: evidence from Xerox Corporation's technology spin-off companies. Industrial and corporate change, Vol. 11, No. 3, 2002, pp. 529-555.

Chesbrough H., Spohrer J. A research manifesto for services science. Communications of the ACM, Vol. 49, No.7, 2006, pp. 35-40.

Chesbrough H.W. Open innovation: The new imperative for creating and profiting from technology. Harvard Business Press. Boston, 2003, 10 p.

Choubey S., Karmakar G.P. Artificial intelligence techniques and their application in oil and gas industry. Artificial Intelligence Review, Vol. 54, No. 5, 2021, pp. 3665-3683.

Choudhry H., Mohammad A., Tan K.T., Ward R. The next frontier for digital technologies in oil and gas. 2016, https:// www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/the-next-frontier-for-digital-technologies-in-oil-and-gas.

Connelly M.C., Dismukes J.P., Sekhar J.A. New relationships between production and patent activity during the high-growth life cycle stage for materials. Technological Forecasting and Social Change, Vol. 78, No. 2, 2011, pp. 303-318.

Decker R., Flaaen A., Tito M. Unraveling the oil conundrum: productivity improvements and cost declines in the us shale oil industry FEDS Notes from Board of Governors of the Federal Reserve System (U.S.), No 2016-03-22, 2016.

Demirbas A., Bafail A., Nizami A.S. Heavy oil upgrading: Unlocking the future fuel supply. Petroleum Science and Technology, Vol. 34, No. 4, 2016, pp. 303-308.

Dijkema G.P.J. Process system innovation by design, towards a sustainable petrochemical industry. Thesis › Dissertation, Delft University of Technology, 2004.

Dismukes J.P. Information accelerated radical innovation from principles to an operational methodology. Industrial Geographer, Vol. 3, No. 1, 2005, pp. 19-42.

Elatab M. 5 trends in oil and gas technology, and why you should care. 2012, https://venturebeat.com/2012/03/28/5-trends-in-oil-gas-technology-and-why-you-should-care/

EMC executive briefing. Oil and gas operational efficiency: making better decisions faster. Reducing Cost, 2015, www.emc.com.

Evans F., Volz W., Dorn G., Fröhlich B., Roberts D.M. Future trends in oil and gas visualization. In: Proceedings of the 13th IEEE Visualization Conference, (VIS-02), 2002, pp. 567-570.

Fanchi J.R., Pagano T.A., Davis T.L. State of the art of 4D seismic monitoring: the technique, the record, and the future. Oil and Gas Journal, Vol. 97, No. 22, 1999, pp. 38-43.

Farris A. How big data is changing the oil & gas industry. Analytics Mag., in Oil and Gas Industry, Dec. 2012.

Feblowitz J. Analytics in oil and gas: the big deal about Big Data. In: Proceedings of the SPE Digital Energy Conference and Exhibition, Paper No. SPE 163717, March 5-7, 2013, The Woodlands, Texas, USA.

Feblowitz J. Oil and gas: into the cloud? Journal of Petroleum Technology, Vol. 63, No. 5, 2011, pp. 32-33.

Fernandez J.D., Fernandez A.E. SCADA systems: vulnerabilities and remediation. Journal of Computing Sciences in Colleges, Vol. 20, No. 4, 2005, pp. 160-168.

Al-Mascati H., Al-Badi A.H. Critical success factors affecting the adoption of cloud computing in oil and gas industry in Oman. In 2016 3rd MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC), IEEE, Oman, Muscat, 2016, pp. 187-193.

Bailey D., Wright E. Practical SCADA for industry. Elsevier Linacre House. Jordan Hill, Oxford, UK. 2003.

Bers J.A., Dismukes J.P., Miller L.K., Dubrovensky A. Accelerated radical innovation: Theory and application. Technological Forecasting and Social Change, Vol. 76. No. 1, 2009, pp. 165-177.

Betz F. Managing technological innovation: competitive advantage from change. John Wiley & Sons. 2003, 387 p.

Boman K., Staff R. Digital tenacity key to implementing technology in oil, gas industry. 2016, http://www.downstreamtoday.com /(X(1)S(wlydaq55svg2ty55bhiyhsqp))/news/article.aspx?a_id=53301&AspxAutoDetectCookieSupport=1.

Braswell G. Artificial intelligence comes of age in oil and gas. Journal of Petroleum Technology, Vol. 65, No.1, 2013, pp. 50-57.

Chesbrough H., Rosenbloom R.S. The role of the business model in capturing value from innovation: evidence from Xerox Corporation's technology spin-off companies. Industrial and corporate change, Vol. 11, No. 3, 2002, pp. 529-555.

Chesbrough H., Spohrer J. A research manifesto for services science. Communications of the ACM, Vol. 49, No.7, 2006, pp. 35-40.

Chesbrough H.W. Open innovation: The new imperative for creating and profiting from technology. Harvard Business Press. Boston, 2003, 10 p.

Choubey S., Karmakar G.P. Artificial intelligence techniques and their application in oil and gas industry. Artificial Intelligence Review, Vol. 54, No. 5, 2021, pp. 3665-3683.

Choudhry H., Mohammad A., Tan K.T., Ward R. The next frontier for digital technologies in oil and gas. 2016, https:// www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/the-next-frontier-for-digital-technologies-in-oil-and-gas.

Connelly M.C., Dismukes J.P., Sekhar J.A. New relationships between production and patent activity during the high-growth life cycle stage for materials. Technological Forecasting and Social Change, Vol. 78, No. 2, 2011, pp. 303-318.

Decker R., Flaaen A., Tito M. Unraveling the oil conundrum: productivity improvements and cost declines in the us shale oil industry FEDS Notes from Board of Governors of the Federal Reserve System (U.S.), No 2016-03-22, 2016.

Demirbas A., Bafail A., Nizami A.S. Heavy oil upgrading: Unlocking the future fuel supply. Petroleum Science and Technology, Vol. 34, No. 4, 2016, pp. 303-308.

Dijkema G.P.J. Process system innovation by design, towards a sustainable petrochemical industry. Thesis › Dissertation, Delft University of Technology, 2004.

Dismukes J.P. Information accelerated radical innovation from principles to an operational methodology. Industrial Geographer, Vol. 3, No. 1, 2005, pp. 19-42.

Elatab M. 5 trends in oil and gas technology, and why you should care. 2012, https://venturebeat.com/2012/03/28/5-trends-in-oil-gas-technology-and-why-you-should-care/

EMC executive briefing. Oil and gas operational efficiency: making better decisions faster. Reducing Cost, 2015, www.emc.com.

Evans F., Volz W., Dorn G., Fröhlich B., Roberts D.M. Future trends in oil and gas visualization. In: Proceedings of the 13th IEEE Visualization Conference, (VIS-02), 2002, pp. 567-570.

Fanchi J.R., Pagano T.A., Davis T.L. State of the art of 4D seismic monitoring: the technique, the record, and the future. Oil and Gas Journal, Vol. 97, No. 22, 1999, pp. 38-43.

Farris A. How big data is changing the oil & gas industry. Analytics Mag., in Oil and Gas Industry, Dec. 2012.

Feblowitz J. Analytics in oil and gas: the big deal about Big Data. In: Proceedings of the SPE Digital Energy Conference

Foxon T.J. Inducing innovation for a low carbon future: drivers, barriers and policies. The Carbon Trust. London, 2003.

Garcia R., Calantone R. A critical look at technological innovation typology and innovativeness terminology: a literature review. Journal of Product Innovation Management: An international publication of the product development and management association, Vol. 19, No. 2, 2002, pp. 110-132.

Gausdal A.H., Czachorowski K.V., Solesvik M.Z. Applying blockchain technology: evidence from Norwegian companies. Sustainability, Vol. 10, No. 6, 2018, pp. 1-16.

Giacchetta G., Leporini M., Marchetti B. Economic and environmental analysis of a Steam Assisted Gravity Drainage (SAGD) facility for oil recovery from Canadian oil sands. Applied Energy, Vol. 142, No. C, 2015, pp. 1-9.

Gilje E., Ready R., Roussanov N. Fracking, drilling, and asset pricing: Estimating the economic benefits of the shale revolution NBER Working papers, No. 22914, National Bureau of Economic Research, Inc., 2016.

Grove A.S. Only the paranoid survive: How to exploit the crisis points that challenge every company and career. Currency/Doubleday, New York, 1996, 210 p.

Hanna R., Gross R., Speirs J., Heptonstall P., Gambhir A. Innovation timelines from invention to maturity. UK Energy Research Centre. 2015, 88 p.

Higgins V. Augmented and virtual reality: The future of work, not just play. Professional Safety, Vol. 62, No. 6, 2017, pp. 86-87.

Hubbert M.K. Nuclear energy and the fossil fuels, American Petroleum Institute drilling and production practice. In: Proceedings of Spring Meeting, San Antonio, Texas, 1956, pp. 7-25.

Hussain R., Assavapokee T. Khumawala B. Supply chain management in the petroleum industry: challenges and opportunities. International Journal of Global Logistics and Supply Chain Management, Vol. 1, No. 2, 2006, pp. 90-97.

Khan W.Z., Aalsalem M.Y., Khan M.K., Hossain M.S., Atiquzzaman M. A reliable Internet of Things based architecture for oil and gas industry. In: 2017 19th International conference on advanced communication Technology (ICACT), 2017, February, pp. 705-710.

Kleinschmidt A. The Future of oil and gas: why we will still need oil and gas in the future. 2016). Available via: http:// www.siemens.com/innovation/en/ home/pictures- of- the-future/energy- andefficiency/the- future- of- oil- and- gas-trends.html, [Accessed: 9.10.2019].

Landrø M. 4D Seismic. In: Petroleum Geoscience, Springer. Berlin, Heidelberg, 2015, pp. 489-514.

Lu H., Guo L., Azimi M., Huang K. Oil and gas 4.0 era: A systematic review and outlook. Computers in Industry, Vol. 111, 2019, pp. 68-90.

Markit IHS. Technology and innovation key to cost reduction and capital efficiency as companies strive to meet future energy demand, IHS Says. 2016.

Martinotti S., Nolten J., Steinsbo J.A. Digitizing oil and gas production. McKinsey & Company, 2014.

Mawji O. The crude crash has created oil's technological superpowers. 2016, https://oilprice.com/Energy/Crude-Oil/The-Crude-Crash-Has-Created-Oils-Technological-Superpowers.html.

Mills M.P. Big Data and microseismic imaging will accelerate the smart drilling oil and gas revolution. 2013. Available via: http://www.forbes.com/sites/markpmills/2013/05/08/ big-data-and-microseismic-imaging-will-accelerate-the-smart-drilling-oil-and#6f6e6e9548b2. [Accessed: 14.10.2016].

Mitchell J.V., Marcel V., Mitchell B. What next for the oil and gas industry? Chatham House. London, 2012, 128 p.

Mohammadpoor M., Torabi F. Big Data analytics in oil and gas industry: An emerging trend. Petroleum, Vol. 6, No. 4, 2020, pp. 321-328.

and Exhibition, Paper No. SPE 163717, March 5-7, 2013, The Woodlands, Texas, USA.

Feblowitz J. Oil and gas: into the cloud? Journal of Petroleum Technology, Vol. 63, No. 5, 2011, pp. 32-33.

Fernandez J.D., Fernandez A.E. SCADA systems: vulnerabilities and remediation. Journal of Computing Sciences in Colleges, Vol. 20, No. 4, 2005, pp. 160-168.

Foxon T.J. Inducing innovation for a low carbon future: drivers, barriers and policies. The Carbon Trust. London, 2003.

Garcia R., Calantone R. A critical look at technological innovation typology and innovativeness terminology: a literature review. Journal of Product Innovation Management: An international publication of the product development and management association, Vol. 19, No. 2, 2002, pp. 110-132.

Gausdal A.H., Czachorowski K.V., Solesvik M.Z. Applying blockchain technology: evidence from Norwegian companies. Sustainability, Vol. 10, No. 6, 2018, pp. 1-16.

Giacchetta G., Leporini M., Marchetti B. Economic and environmental analysis of a Steam Assisted Gravity Drainage (SAGD) facility for oil recovery from Canadian oil sands. Applied Energy, Vol. 142, No. C, 2015, pp. 1-9.

Gilje E., Ready R., Roussanov N. Fracking, drilling, and asset pricing: Estimating the economic benefits of the shale revolution NBER Working papers, No. 22914, National Bureau of Economic Research, Inc., 2016.

Grove A.S. Only the paranoid survive: How to exploit the crisis points that challenge every company and career. Currency/Doubleday, New York, 1996, 210 p.

Hanna R., Gross R., Speirs J., Heptonstall P., Gambhir A. Innovation timelines from invention to maturity. UK Energy Research Centre. 2015, 88 p.

Higgins V. Augmented and virtual reality: The future of work, not just play. Professional Safety, Vol. 62, No. 6, 2017, pp. 86-87.

Hubbert M.K. Nuclear energy and the fossil fuels, American Petroleum Institute drilling and production practice. In: Proceedings of Spring Meeting, San Antonio, Texas, 1956, pp. 7-25.

Hussain R., Assavapokee T. Khumawala B. Supply chain management in the petroleum industry: challenges and opportunities. International Journal of Global Logistics and Supply Chain Management, Vol. 1, No. 2, 2006, pp. 90-97.

Ismailov R.G., Veliyev E.F. Emulsifying composition for increasing oil recovery ratio of viscous oils. Azerbaijan Oil İndustry. No. 5, 2021, pp. 22-28 (in Russian).

Khan W.Z., Aalsalem M.Y., Khan M.K., Hossain M.S., Atiquzzaman M. A reliable Internet of Things based architecture for oil and gas industry. In: 2017 19th International conference on advanced communication Technology (ICACT), 2017, February, pp. 705-710.

Kleinschmidt A. The Future of oil and gas: why we will still need oil and gas in the future. 2016). Available via: http://www.siemens.com/innovation/en/ home/pictures- of-the- future/energy- andefficiency/the- future- of- oil- and-gas- trends.html, [Accessed: 9.10.2019].

Landrø M. 4D Seismic. In: Petroleum Geoscience, Springer. Berlin, Heidelberg, 2015, pp. 489-514.

Lu H., Guo L., Azimi M., Huang K. Oil and gas 4.0 era: A systematic review and outlook. Computers in Industry, Vol. 111, 2019, pp. 68-90.

Markit IHS. Technology and innovation key to cost reduction and capital efficiency as companies strive to meet future energy demand, IHS Says. 2016.

Martinotti S., Nolten J., Steinsbo J.A. Digitizing oil and gas production. McKinsey & Company, 2014.

Mawji O. The crude crash has created oil's technological superpowers. 2016, https://oilprice.com/Energy/Crude-Oil/The-Crude-Crash-Has-Created-Oils-Technological-Superpowers.html.

Mueser R. Identifying technical innovations. IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. 32, No. 4, 1985, pp. 158-176.

Perrons R.K. How innovation and R&D happen in the upstream oil and gas industry: Insights from a global survey. Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol.124, 2014, pp. 301-312.

Perrons R.K., Hems A. Cloud computing in the upstream oil & gas industry: A proposed way forward. Energy Policy, Vol. 56, 2013, pp. 732-737.

Perrons R.K., Jensen J.W. Data as an asset: What the oil and gas sector can learn from other industries about "Big Data". Energy Policy, Vol. 81, 2015, pp. 117-121.

PLH Group. Four ways mobile technology affects oil and gas industry. 2015. http://plhgroupinc.com/mobile-technology-affects-oil-and-gasindustry/

Prometheus Group. 5 Innovative Technologies Changing Maintenance Management in the Oil and Gas Sector. 2019, https://www.prometheusgroup.com/posts/5-innovative-technologies-changing-maintenance-management-in-the-oil-and-gas-sector

Rahmanifard H., Plaksina T. Application of artificial intelligence techniques in the petroleum industry: a review. Artificial Intelligence Review, Vol. 52, No. 4, 2019, pp. 2295-2318.

Schumpeter J. The theory of economic development. Harvard University Press. Cambridge, MA, 1934, 255 p.

Schumpeter J.A. Capitalism, socialism and democracy. Harper & Row. New York, 1942, 381 p.

Sebastian J. Optimizing operational efficiency. Oil and Gas Financial Journal, Vol. 12, No. 9, 2015, pp. 1-4.

Sekhar J.A., Dismukes J.P. Generic innovation dynamics across the industrial technology life cycle: Platform equation modeling of invention and innovation activity. Technological Forecasting and Social Change, Vol. 76, No.1, 2009, pp. 192-203.

Shen C. SAGD for heavy oil recovery. In: Enhanced oil recovery field case, Gulf Professional Publishing. 2013, pp. 413-445.

Shenhar A.J., Dvir D., Shulman Y. A two-dimensional taxonomy of products and innovations. Journal of Engineering and Technology Management, Vol. 12, No. 3, 1995, pp. 175-200.

Shoja S., Jalali A. A study of the Internet of Things in the oil and gas industry. In 2017 IEEE 4th International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI), 2017, December, pp. 0230-0236.

Shukla A., Karki H. A review of robotics in onshore oil-gas industry. In 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation 2013, August, pp. 1153-116.

Shukla A., Karki H. Application of robotics in offshore oil and gas industry – A review. Part II. Robotics and Autonomous Systems, Vol. 75, 2016, pp. 508-524.

Sider A., Ailworth E. Oil companies tap new technologies to lower production costs. Wall Street Journal, Sept. 2015.

Suleimanov B.A., Dyshin O.A., Veliyev E.F. Compressive strength of polymer nanogels used for enhanced oil recovery EOR. Paper Number SPE-181960-MS. In: SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2016, October.

Suleimanov B.A., Ismailov F.S., Veliyev E.F., Dyshin O.A. The influence of light metal nanoparticles on the strength of polymer gels used in oil industry. SOCAR Proceedings, Vol. No. 2, 2013, pp. 24-28.

Suleimanov B.A., Latifov Y.A., Veliyev E.F. Softened water application for enhanced oil recovery. SOCAR Proceedings, Vol. 1, 2019, pp. 19-29.

Suleimanov B.A., Latifov Y.A., Veliyev E.F., Frampton H. Low salinity and low hardness alkali water as displacement agent for secondary and tertiary flooding in sandstones. Paper Number SPE-188998-MS. In: SPE Annual Caspian Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2017, November.

Mills M.P. Big Data and microseismic imaging will accelerate the smart drilling oil and gas revolution. 2013. Available via: http://www.forbes.com/sites/markpmills/2013/05/08/big-data-and-microseismic-imaging-will-accelerate-the-smart-drilling-oil-and#6f6e6e9548b2. [Accessed: 14.10.2016].

Mitchell J.V., Marcel V., Mitchell B. What next for the oil and gas industry? Chatham House. London, 2012, 128 p.

Mohammadpoor M., Torabi F. Big Data analytics in oil and gas industry: An emerging trend. Petroleum, Vol. 6, No. 4, 2020, pp. 321-328.

Mueser R. Identifying technical innovations. IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. 32, No. 4, 1985, pp. 158-176.

Nagiyeva N.N. Colloido-dispersion gels for conformance control of injection wells. SOCAR Proccedings, No. 2, 2020, pp. 67-77 (in Russian).

Nagiyeva N.V. Application of preliminary-formed gel-forming particles for water inflow isolation in well. Ashirov Readings, No. 1(1), 2020, pp. 12-18 (in Russian).

Perrons R.K. How innovation and R&D happen in the upstream oil and gas industry: Insights from a global survey. Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol.124, 2014, pp. 301-312.

Perrons R.K., Hems A. Cloud computing in the upstream oil & gas industry: A proposed way forward. Energy Policy, Vol. 56, 2013, pp. 732-737.

Perrons R.K., Jensen J.W. Data as an asset: What the oil and gas sector can learn from other industries about "Big Data". Energy Policy, Vol. 81, 2015, pp. 117-121.

PLH Group. Four ways mobile technology affects oil and gas industry. 2015. http://plhgroupinc.com/mobile-technology-affects-oil-and-gasindustry/

Prometheus Group. 5 Innovative Technologies Changing Maintenance Management in the Oil and Gas Sector. 2019, https://www.prometheusgroup.com/posts/5-innovative-technologies-changing-maintenance-management-in-the-oil-and-gas-sector

Rahmanifard H., Plaksina T. Application of artificial intelligence techniques in the petroleum industry: a review. Artificial Intelligence Review, Vol. 52, No. 4, 2019, pp. 2295-2318.

Schumpeter J. The theory of economic development. Harvard University Press. Cambridge, MA, 1934, 255 p.

Schumpeter J.A. Capitalism, socialism and democracy. Harper & Row. New York, 1942, 381 p.

Sebastian J. Optimizing operational efficiency. Oil and Gas Financial Journal, Vol. 12, No. 9, 2015, pp. 1-4.

Sekhar J.A., Dismukes J.P. Generic innovation dynamics across the industrial technology life cycle: Platform equation modeling of invention and innovation activity. Technological Forecasting and Social Change, Vol. 76, No.1, 2009, pp. 192-203.

Shen C. SAGD for heavy oil recovery. In: Enhanced oil recovery field case, Gulf Professional Publishing. 2013, pp. 413-445.

Shenhar A.J., Dvir D., Shulman Y. A two-dimensional taxonomy of products and innovations. Journal of Engineering and Technology Management, Vol. 12, No. 3, 1995, pp. 175-200.

Shoja S., Jalali A. A study of the Internet of Things in the oil and gas industry. In 2017 IEEE 4th International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI), 2017, December, pp. 0230-0236.

Shukla A., Karki H. A review of robotics in onshore oil-gas industry. In 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation 2013, August, pp. 1153-116.

Shukla A., Karki H. Application of robotics in offshore oil and gas industry – A review. Part II. Robotics and Autonomous Systems, Vol. 75, 2016, pp. 508-524.

Suleimanov B.A., Veliyev E.F. Nanogels for deep reservoir conformance control. In: SPE Annual Caspian Technical Conference & Exhibition, Astana, Kazakhstan, 2016, November.

Suleimanov B.A., Veliyev E.F., Azizagha A.A. Colloidal dispersion nanogels for in-situ fluid diversion. Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 193, 2020, 107411.

Suleimanov B.A., Veliyev E.F., Dyshin O.A. Effect of nanoparticles on the compressive strength of polymer gels used for enhanced oil recovery (EOR). Petroleum Science and Technology, Vol. 33, No.10, 2015, pp. 1133-1140.

Suleimanov B.A., Veliyev E.F., Naghiyeva N.V. Colloidal dispersion gels for in-depth permeability modification. Modern Physics Letters B, Vol. 35, No. 01, 2021, pp. 2150038.

Suleimanov B.A., Veliyev E.F., Naghiyeva N.V. Preformed particle gels for enhanced oil recovery. International Journal of Modern Physics B, Vol. 34, No. 28, 2020, pp. 2050260.

Veliyev E.F. Mechanisms of polymer retention in porous media. SOCAR Proceedings, Vol. 3, 2020, pp. 126-134.

Veliyev E.F., Aliyev A.A. Propagation of nano sized CDG deep into porous media. In: SPE Annual Caspian Technical Conference, Paper Number: SPE-207024-MS, 2021, October.

Veliyev E.F., Aliyev A.A., Guliyev V.V., Naghiyeva N.V. Water shutoff using crosslinked polymer gels. In: SPE Annual Caspian Technical Conference, Paper 198351, 2019, October.

Veliyev E.F., Aliyev A.A., Mammadbayli T.E. Machine learning application to predict the efficiency of water coning prevention. SOCAR Proceedings, Vol. 1, 2021, pp. 104-113.

Wanasinghe T.R., Gosine R.G., James L.A., Mann G.K., De Silva O., Warrian P.J. The Internet of Things in the oil and gas industry: A systematic review. IEEE Internet of Things Journal, Vol. 7, No. 9, 2020, pp. 8654-8673.

Ward R. A billion-dollar digital opportunity for oil companies. New York, USA, McKinsey & Company, March 2016.

Woody T. New drilling technologies could give us so much oil, the climate won't stand a chance. 2013, https://qz.com/117504/new-drilling-technologies-could-give-us-so-much-oil-the-climate-wont-stand-a-chance/

Yerramilli C., Sekhar J.A. A common pattern in long-term metals production. Resources Policy, Vol. 31, No. 1, 2006, pp. 27-36.

Алиев А.А. Улучшение реологических свойств геополимеров щелочной активации с применением технологических жидкостей на безводной основе. Prospecting and Development of Oil and Gas Fields, No. 3(80), 2021, с. 60-67.

Алиев А.А. Гели на основе поливинилпирролидона для изоляции водопритока в скважинах. Ашировские чтения, Т.1, No.1, 2020, с. 5-11.

Велиев Э.Ф. Обзор современных методов увеличения нефтеотдачи пласта с применением потокоотклоняющих технологий. Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР, No. 2, 2020, pp. 50-66.

Велиев Э.Ф. Полимерно-дисперсная система для изменения фильтрационных потоков в пласте. Prospecting and Development of Oil and Gas Fields, No. 1(78), 2021а, с. 61-72.

Велиев Э.Ф. Применение амфифильных блок-полимерных систем для эмульсионного заводнения пласта. Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР, No. 3, 2021б, с. 78-86.

Исмаилов Р.Г., Велиев Э.Ф. Эмульсирующий состав для повышения коэффициента нефтеизвлечения вязких нефтей. Азербайджанское нефтяное хозяйство, No. 5, 2021, с. 22-28.

Нагиева Н.В. Коллоидно-дисперсные гели для выравнивания профиля приемистости нагнетательных скважин. Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР, No. 2, 2020, с. 67-77.

Нагиева Н.В. Применение предварительно сформированных гелеобразующих частиц для изоляции водопритока в скважине. Ашировские чтения, No. 1(1), 2020, с. 12-18.

Sider A., Ailworth E. Oil companies tap new technologies to lower production costs. Wall Street Journal, Sept. 2015.

Suleimanov B.A., Dyshin O.A., Veliyev E.F. Compressive strength of polymer nanogels used for enhanced oil recovery EOR. Paper Number SPE-181960-MS. In: SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2016, October.

Suleimanov B.A., Ismailov F.S., Veliyev E.F., Dyshin O.A. The influence of light metal nanoparticles on the strength of polymer gels used in oil industry. SOCAR Proceedings, Vol. No. 2, 2013, pp. 24-28.

Suleimanov B.A., Latifov Y.A., Veliyev E.F. Softened water application for enhanced oil recovery. SOCAR Proceedings, Vol. 1, 2019, pp. 19-29.

Suleimanov B.A., Latifov Y.A., Veliyev E.F., Frampton H. Low salinity and low hardness alkali water as displacement agent for secondary and tertiary flooding in sandstones. Paper Number SPE-188998-MS. In: SPE Annual Caspian Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2017, November.

Suleimanov B.A., Veliyev E.F. Nanogels for deep reservoir conformance control. In: SPE Annual Caspian Technical Conference & Exhibition, Astana, Kazakhstan, 2016, November.

Suleimanov B.A., Veliyev E.F., Azizagha A.A. Colloidal dispersion nanogels for in-situ fluid diversion. Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 193, 2020, 107411.

Suleimanov B.A., Veliyev E.F., Dyshin O.A. Effect of nanoparticles on the compressive strength of polymer gels used for enhanced oil recovery (EOR). Petroleum Science and Technology, Vol. 33, No.10, 2015, pp. 1133-1140.

Suleimanov B.A., Veliyev E.F., Naghiyeva N.V. Colloidal dispersion gels for in-depth permeability modification. Modern Physics Letters B, Vol. 35, No. 01, 2021, pp. 2150038.

Suleimanov B.A., Veliyev E.F., Naghiyeva N.V. Preformed particle gels for enhanced oil recovery. International Journal of Modern Physics B, Vol. 34, No. 28, 2020, pp. 2050260.

Suleymanov B.A., Ismailov F.S., Veliyev E.F. About impact of nanoparticles of metal on stability of polymer gels based on CMC used during oil production. Oil Industry, No. 1, 2014, pp. 86-88 (in Russian).

Suleymanov B.A., Veliyev E.F. Influence of granulometric composition and nanosized admix on quality of annular space isolation in cementing process of wells. SOCAR Proceedings, No. 4, 2016, pp. 4-10 (in Russian).

Suleymanov B.A., Veliyev E.F., Nagiyeva N.V. Patent №038656. Eurasian Patent Office, 2021 (in Russian).

Veliyev E.F. Application of amphiphilic block polymer systems for emulsive reservoir flooding. SOCAR Proceedings, No. 3, pp.78-66 (in Russian).

Veliyev E.F. Mechanisms of polymer retention in porous media. SOCAR Proceedings, Vol. 3, 2020, pp. 126-134.

Veliyev E.F. Overview of advanced enhanced oil recovery methods by use of flow deviation technology. SOCAR Proceedings, No.2, 2020, pp. 50-66 (in Russian).

Veliyev E.F. Polymer dispersion system for filtration flow change in situ. Prospecting and Development of Oil and Gas Fields, No. 1(78), 2021, pp. 61-72 (in Russian).

Veliyev E.F., Aliyev A.A. Propagation of nano sized CDG deep into porous media. In: SPE Annual Caspian Technical Conference, Paper Number: SPE-207024-MS, 2021, October.

Veliyev E.F., Aliyev A.A., Guliyev V.V., Naghiyeva N.V. Water shutoff using crosslinked polymer gels. In: SPE Annual Caspian Technical Conference, Paper 198351, 2019, October.

Veliyev E.F., Aliyev A.A., Mammadbayli T.E. Machine learning application to predict the efficiency of water coning prevention. SOCAR Proceedings, Vol. 1, 2021, pp. 104-113.

Сулейманов Б.А., Велиев Э.Ф. О влиянии гранулометрического состава и наноразмерных добавок на качество изоляции затрубного пространства в процессе цементирования скважин. Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР, (4), 2016, с. 4-10.

Сулейманов Б.А., Велиев Э.Ф., Нагиева Н.В. (2021). Способ выравнивания профиля приемистости нагнетательной скважины. (ЕА Патент № 038656). Евразийское патентное ведомство.

Сулейманов Б.А., Исмайлов Ф.С., Велиев Э.Ф. О влиянии наночастиц металла на прочность полимерных гелей на основе КМЦ, применяемых при добыче нефти. Нефтяное хозяйство, No. 1, 2014, с. 86-88.

Wanasinghe T.R., Gosine R.G., James L.A., Mann G.K., De Silva O., Warrian P.J. The Internet of Things in the oil and gas industry: A systematic review. IEEE Internet of Things Journal, Vol. 7, No. 9, 2020, pp. 8654-8673.

Ward R. A billion-dollar digital opportunity for oil companies. New York, USA, McKinsey & Company, March 2016.

Woody T. New drilling technologies could give us so much oil, the climate won't stand a chance. 2013, https://qz.com/117504/new-drilling-technologies-could-give-us-so-much-oil-the-climate-wont-stand-a-chance/

Yerramilli C., Sekhar J.A. A common pattern in long-term metals production. Resources Policy, Vol. 31, No. 1, 2006, pp. 27-36.

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК ПРИОРИТЕТНЫЙ ФАКТОР РАЗВИТИЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Велиев Э.Ф, Алиев А.А.
НИПИ «Нефтегаз», SOCAR
AZ1122, Баку, Азербайджан, ул. Г.Зардаби, 88A: elchinf.veliyev@socar.az

Резюме. Нефтяная и нефтехимическая промышленность на сегодняшний день является одной из самых бурно развивающихся отраслей и все еще остается ключевым фактором, лежащим в основе экономики каждой индустриальной страны. Однако в последнее время эта отрасль столкнулась со многими проблемами в связи с падением цен на углеводородное сырье, увеличением себестоимости добычи и ростом уровня неопределенности, связанного с изменением геополитической ситуации на мировой арене. Одним из наиболее актуальных вопросов для отрасли в условиях современной реальности является вопрос: достигнут ли пик добычи углеводородов? Данный вопрос разделил исследователей на два больших лагеря. Первая группа является приверженцами теории Хабберта, предложенной в середине 50-х годов прошлого века, о достижении пика добычи углеводородов в США в начале 1970-х годов, а в мировой добыче – в начале 2000 г. и дальнейшем ее спаде. Вторая группа ученых в корне не согласна с теорией Хабберта, а вернее с возможностью точного прогнозирования данного явления. Вкратце позицию специалистов противников теории Хабберта можно выразить утверждением, что дата достижения пика добычи нефти будет известна лишь постфактум и то не сразу. Оставив в стороне разногласия и аргументы специалистов обоих групп, необходимо выделить важность внедрения инновационных технологий, и при этом не столь важно присваиваемое в зависимости от подхода определение данного механизма: эффективный инструмент для роста добычи углеводородов или инструмент для предупреждения негативных сценариев развития. Роль и необходимость внедрения инновационных технологий переоценить сложно. В работе рассмотрены роль и применение инновационных технологий в качестве инструмента развития нефтегазовой промышленности, выявлены целевые стратегии развития инноваций и описаны наиболее перспективные с этой точки зрения технологии.

Ключевые слова*: инновация, изобретение, пик Хабберта, добыча нефти, стратегия развития*

İNNOVATİV TEXNOLOGİYALAR: NEFT-QAZ SƏNAYESİNİN İNKİŞAFININ PRİORİTET AMİLİ KİMİ

Vəliyev E.F., Əliyev Ə.A.
"Neftqazelmitədqiqatlayihə" İnstitutu, SOCAR
AZ1122, Bakı, Azərbaycan, H.Zərdabi küç., 88A: elchinf.veliyev@socar.az

Xülasə. Neft və neft-kimya sənayesi günümüzün ən sürətlə inkişaf edən sənaye sahələrindən biridir və hələ də bütün sənaye ölkələrinin iqtisadiyyatının əsasını təşkil edən əsas amil olaraq qalır. Bununla belə, karbohidrogen qiymətlərinin aşağı düşməsi, hasilat xərclərinin artması və dünya arenasında dəyişən geosiyasi vəziyyətlə bağlı yüksılın qeyri-müəyyənlik səbəbindən sənaye son dövrdə bir çox problemlərlə üzləşmişdir. Müasir dövrdə neft sənayesinin ən aktual suallarından biri karbohidrogen hasilatının öz pikinə (maksimumuna) çatıb-çatmadığıdır. Bu sual tədqiqatçıları iki böyük qrupa ayırmışdır. Birinci qrup Habbertin keçən əsrin ortalarında təklif etdiyi nəzəriyyənin tərəfdarlarıdır. Bu nəzəriyyə ABŞ-də karbohidrogen hasilatının 1970-ci illərdə, dünyada isə 2000-ci illərdə öz pikinə çatacağını və daha sonra hasilatın getdikcə azalacağını qeyd edir. İkinci qrup tədqiqatçılar Habbert nəzəriyyəsi ilə fundamental olaraq razı deyildirlər, onlar karbohidrogen hasilatının pikini yalnız sonradan – postfaktum – müəyyən oluna biləcəyini vurğulayırlar. Hər iki qrupdan olan mütəxəssislərin fikir ayrılıqlarını və arqumentlərini bir kənara qoyaraq, innovativ texnologiyaların tətbiqinin vacibliyi və sadalanan yanaşmalardan asılı olaraq bu mexanizmə verilən tərif dəqiqləşdirilməlidir: karbohidrogen hasilatının artırılması üçün effektiv vasitə, yoxsa mənfi inkişaf ssenarilərinin qarşısını alacaq bir vasitə? İnnovativ texnologiyaların neft sənayesinin inkişafında rolunu və zəruriliyini inkar etmək mümkün deyil. Məqalədə neft-qaz sənayesinin inkişaf strategiyasında innovativ texnologiyaların rolu və tətbiqi nəzərdən keçirilir, innovasiyaların inkişafı üçün hədəf strategiyalar müəyyən edilir və bu baxımdan ən perspektivli texnologiyalar təsvir olunur.

Açar sözlər: i*nnovasiya, ixtira, Habbert piki, neft hasilatı,inkişaf strategiya*

ANAS Transactions Earth Sciences 2 / 2021

http://www.journalesgia.com

MÜNDƏRİCAT

Məmmədov M.N., Babayeva G.C., Vəliyev A.A., Abbasov K.F., Sarıyev F.H., Bayramov A.Ə. – Lök-Qarabağ zonasının mərkəzi hissəsinin gec yura və erkən təbaşir yaşlı intruziv komplekslərinin formalaşmasının petroloji xüsusiyyətləri 3-15

Eppelbaum L.V. – FUDR metodu: işlənilmə və interpretasiyanın təkmilləşdirilmiş sistemi (Qafqazın filiz yataqlarında sınaqlandırma) 16-38

Qurbanov V.Ş., Nərimanov N.R., Nəsibova G.C., Muxtarova X.Z., Nərimanov R.N., Hüseynova Ş.M. – Cənubi Xəzər meqaçökəkliyində sıxılma gərginliklərinin intensivliyinin keyfiyyətcə qiymətləndirilməsi, onların strukturəməlegəlmə proseslərinə və karbohidrogenlərin genezisinə təsiri 39-49

Paşayev N.V., Paşayeva Ş.V. – Tərsdəllər yatağının orta eosen çöküntülərində quyuyanı zonada süxurların gərginlik vəziyyətinin tədqiqi 50-55

İsrafilov Y.H., Hüseynov T.P. – Azərbaycan Respublikasının su resurslarının dayanıqlı idarə olunmasının problemləri və yolları 56-62

Əhmədova E.V. – GPS məlumatları əsasında Xəzər dənizinin şərq sahili boyu yer səthinin müasir hərəkətlərinin modelləşdirilməsi 63-68

Isayev R.A., Piriverdiyev I.A. – Qeyri-müəyyənlik şəraitində quyuların qazılması zamanı texniki-texnoloji qərarların qəbulu üçün geoloji kəsilişlərin öyrənilməsi 69-74

Əliyev Ə.S., Tatlıyeva Z.İ., Əhmədova R.Y., Süleymanlı D.Q. – Xəzər dənizi səviyyəsinin dəyişilmələri və onun Azərbaycan Respublikasının sahil zonasında nəticələri 75-80

Vəliyev E.F., Əliyev Ə.A. – İnnovativ texnologiyalar: neft-qaz sənayəsinin inkişafının prioritet amili kimi 81-93

CONTENTS

Mammadov M.N., Babaeva G.J., Veliyev A.A., Abbasov K.F., Sariyev F.H., Bayramov A.A. – Petrological factors of formation of central Lok-Garabakh zone intrusion complexes of Upper Jurassic – Early Cretaceous age 3-15

Eppelbaum L.V. – VLF-method of geophysical prospecting: a non-conventional system of processing and interpretation (implementation in the Caucasian ore deposits)..... 16-38

Gurbanov V.Sh., Narimanov N.R., Nasibova G.J., Mukhtarova Kh.Z., Narimanov R.N., Huseynova Sh.M. – Qualitative assessment of compressional stresses within the South Caspian Megadepression and their impact upon structure formation and hydrocarbon generation 39-49

Pashayev N.V., Pashayeva Sh.V. – A study of the stress state of rocks in the near-wellbore zone of the Middle Eocene sediments in the Tarsdallar deposit 50-55

Israfilov Yu.G., Huseynov T.P. – Challenges and sustainable water management in Azerbaijan Republic 56-62

Akhmadova E.V. – Modeling of modern Earth surface movements along the east coast of the Caspian Sea by GPS data 63-68

Isayev R.A., Piriverdiyev I.A. – Study of geological cross-sections for making design and engineering decisions while drilling under uncertainty 69-74

Aliyev A.S., Tatliyeva Z.I., Axmedova R.Y., Suleymanli D.G. – Changes in the level of the Caspian Sea and its consequences in the coastal zone of the Republic of Azerbaijan 75-80

Veliyev E.F., Aliyev A.A. – Innovative technologies as a priority factor of the oil and gas industry development 81-93

ОГЛАВЛЕНИЕ

Мамедов М.Н., Бабаева Г.Дж., Велиев А.А., Аббасов К.Ф., Сарыев Ф.Г., Байрамов А.А. – Петрологические особенности формирования позднеюрско-раннемеловых интрузивных комплексов центральной части Лок-Гарабагской зоны 3-15

Эппельбаум Л.В. – Метод СДВР: улучшенная система обработки и интерпретации (опробование на рудных месторождениях Кавказа) 16-38

Гурбанов В. Ш., Нариманов Н.Р., Насибова Г.Д., Мухтарова Х.З., Нариманов Р.Н., Гусейнова Ш.М. – Качественная оценка интенсивности сжимающих напряжений в Южно-Каспийской мегавпадине, их влияние на структурообразование и генезис углеводородов 39-49

Пашаев Н.В., Пашаева Ш.В. – Исследование напряженного состояния пород в прискважинной зоне среднеэоценовых отложений месторождения Тарсдалляр 50-55

Исрафилов Ю.Г., Гусейнов Т.П. – Проблемы и пути устойчивого управления водными ресурсами Азербайджанской Республики 56-62

Ахмедова Э.В. – Моделирование современных движений поверхности земли вдоль восточного побережья Каспийского моря по данным GPS 63-68

Исаев Р.А., Пиривердиев И.А. – Изучение геологических разрезов для принятия технико-технологических решений при бурении в условиях неопределенности 69-74

Алиев А.С., Татлыева З.И., Ахмедова Р.Ю., Сулейманлы Д.Г. – Изменение уровня Каспийского моря и его последствия в прибрежной зоне Азербайджанской Республики 75-80

Велиев Э.Ф, Алиев А.А. – Инновационные технологии как приоритетный фактор развития нефтегазовой промышленности 81-93