© L.V.Eppelbaum and Y.I.Katz, 2017

SATELLITE GRAVIMETRY AS A POWERFUL TOOL FOR DELINEATION OF REGIONAL TECTONO-GEOPHYSICAL DOMAINS: IMPLEMENTATION FOR THE ARABIAN-AFRICAN REGION

L.V.Eppelbaum[1] and Y.I.Katz[2]

1 – *School of Geosciences, Faculty of Exact Sciences, Tel Aviv University, Tel Aviv 69978, Israel*
(phone: +972-3-6405086; fax: +972-3-6409282; e-mail: levap@post.tau.ac.il)

2 – *Steinhardt Museum of Natural History & National Research Center, Tel Aviv University, Tel Aviv 69978, Israel*
(e-mail: kiyour@mail.ru)

Satellite gravimetry is recognized now as powerful and reliable tool for regional tectono-geodynamic zonation. Regular observation grid and comparatively high accuracy (1-1.5 mGal) of satellite gravity data retracked to the Earth's (together with other kinds of gravity observations) surface makes these data indispensable instrument for examination of deep geological features (mainly, Earth crust and upper mantle). The area under study – Arabian-African region – is very attractive geological-geophysical polygon from geodynamical (high seismic activity, active rift zones and collision processes), structural (presence of mosaic block system of continental and oceanic Earth's crust of different age), geophysical (presence of several greatest gravity anomalies and intricate magnetic pattern) and economical (occurrence of main hydrocarbon resources of the world) points of view. Examination of satellite derived gravity data by use of advanced qualitative methodologies enabled to develop a series of principal new maps indicating the tectono-geophysical zonation of the region, presence of different types of the Earth's crust terranes and slabs. Semi-quantitative analysis was applied for determination of the depths of contrast density masses surface in lithosphere. These data were used, together with other isolated geophysical-geological features, for elaboration and generalization of earlier constructed tectonic maps and schemes. On this basis, a new tectonic map of the Arabian-African region has been developed – geological data were supported by satellite gravity (mainly), magnetic, GPS, seismic, seismological and some other geophysical data analysis.

INTRODUCTION

Satellite derived geophysical (first of all, gravity) data is the powerful tool of regional tectono-geophysical examination of the Earth's crust and upper mantle. It is well known that regional long-term seismological prognosis, strategy of searching economic deposits and many other important geological-geophysical problems are based mainly on results of combined tectono-geophysical zonation.

Some authors' experience of the tectono-geophysical zonation in the Eastern Mediterranean (both sea and land) with satellite derived gravity field examination (Eppelbaum and Katz, 2015a,b) indicates a high effectiveness of the data employment for delineation of different tectono-structural units. Therefore, on the basis of the previous successive application, satellite derived gravity field analysis was applied for the disproportionally large and complex Arabian-African region (Figure 1). The gravity field retracked from the Geosat and ERS-1 altimetry (e.g., Sandwell and Smith, 2009) was utilized by the use of different mathematical apparatus employment enabling to underline these or those tectonic features of the region under study.

The main goals of present investigation are following: (1) employment of a modern powerful regional geophysical tool – satellite derived gravity data and its transformations for unmasking some buried tectonic and geodynamic peculiarities of the study area, (2) development of a novel tectonic map of this area (on the basis of careful examination and generalization of available geological and geophysical data), (3) finding definite relationships between the novel tectonic map and the gravity field transformations.

Application of advanced statistical, informational and transformation methods to satellite derived gravity data led to the development of several maps clearly reflecting the tectono-geophysical features of the region and location of different types of the Earth's crust. Semi-quantitative analysis was applied for determination of the depths of contrast density masses surface in lithosphere.

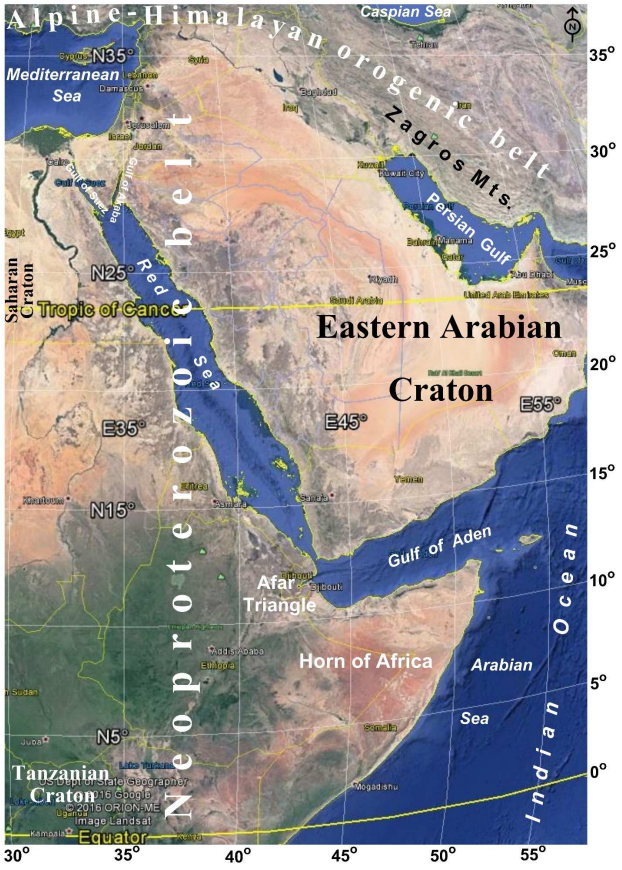


Figure 1. Areal map of the region under study (on the basis of Google Earth image) supplemented by main tectonic elements

Commonly, this investigation indicates the possibility of application of gravity field retracked from satellites for the small-scale tectono-geophysical zonation in both marine and land areas. At the same time, for the areas with the predominant development of mountainous systems some additional reduction may be necessary.

Obviously, further geophysical studies will include combined examination of gravity data with multilevel observed magnetic data and thermal data as well as seismic, GPS and some other methods.

SATELLITE GRAVITY DATA RETRACKED TO THE EARTH'S SURFACE AND THEIR IMPORTANCE

It is known that in the 'pre-satellite gravimetric epoch', regional gravity observations (shipborne and airborne) were as a rule non-regular ones, with large 'white spots' and different accuracies and methodologies of gravity field observations. Besides this, the most part of available shipborne and airborne gravity data is characterized by the error of gravity field computation > 2-3 mGals.

Some evaluation of the satellite derived gravity field accuracy (averaged data from different satellite missions were examined) is shown in Table 1. Apparently reaching the gravity field accuracy of 0.7-0.8 mGal until 2020 will allow to include to the satellite gravimetry a new circle of applied geological-geophysical problems.

Table 1

Accuracy of satellite derived gravity data for different epochs

Epoch	Error of gravity data computation, mGal	Gridding, km	Available data
1965-1970	20	20 x 20	Separate regions of the Earth
1995-2000	8	10 x 10	70% of the Earth
2014-2016	1.5-1	2 x 2	95% of the Earth
2018-2020	0.7-0.8 (?)	1 x 1(?)	All the Earth

The satellite gravity data (joined with other kinds of gravity observations), employed in this analysis, were obtained from the World Gravity DB as retracked from Geosat and ERS-1 altimetry (Sandwell and Smith, 2009; Andersen et al., 2009). A highly positive factor is that these observations were done with regular global 1-minute grids (Sandwell and Smith, 2009) and the error of gravity data computation was estimated at 1-1.5 mGals (Sandwell et al., 2013). The satellite-derived data have the advantage of global coverage that makes the measurements independent to the ruggedness and remoteness. Furthermore, by using the satellite data, is avoided a long-wavelength problem in the gravity field that can be introduced by combination of different surface measurement surveys (Braitenberg and Ebbing, 2009).

It is necessary to note that the maps of vertical gradient of gravity anomalies (T_{zz}) obtained by use the GOCE missions (e.g., Hirt et al., 2011; Rummel et al., 2011) were also tested for revealing essential deep tectono-structural peculiarities of the region under study. However, these maps and their transformations usually reflect only subsurface geological section (first km, and in the best case – first 10-15 of km of the Earth's crust).

The satellite derived gravity retracked from Geosat and ERS-1 (e.g., Sandwell and Smith, 2009) data cannot be related to the conventional type of gravity reduction but can be assumed as close to 'free air' anomalies (Sandwell et al., 2013; Eppelbaum and Katz, 2015a). At the same time, this difference usually is not significant for marine areas

(Sandwell and Smith, 2009; Sandwell et al., 2013) and land areas with relief amplitudes near the mean sea level, but may reach considerable values in the land areas with middle and high-amplitude topography.

Theoretically, free air gravity anomalies are mainly produced by non-uniform density distribution in the Earth's crust and upper mantle and reflect the differences of shape and mass distribution between the real Earth and geodetic ellipsoid (Grushinsky, 1976). Jin-Yu et al. (2014) have formulated two important items: (1) for the areas with gentle terrains (assuming that width of terrain relief in general more than in ten times exceeds the compensation depth), free air gravity anomalies can be applied for crustal isostatic research and for analysis of significant tectonic movements; (2) recent tectonic events and lithospheric structure have more visible signatures just in the free air field. Concerning item (1) we should note that the region under study (see Figure 1) does not basically characterize by high relief amplitudes. In general, we agree with item (2), but propose that not only 'recent events'. Our experience indicates that earlier constructed satellite derived gravity map of the Eastern Mediterranean (retracked to the sea and land surfaces) reflects practically all main structural-tectonic elements of this region (after Eppelbaum and Katz, 2012b). Preliminary computations indicate that the satellite derived gravity field may also be effectively applied for solving different rheological and eustatic problems (e.g., Morner, 1980).

The area under study is limited by coordinates (0^o – 37.0^o north, and 30^o – 57^o east) and presents a giant region of the Near and Middle East and Eastern (and partially – Northern) Africa (see Figure 1). Totally this area covers more than 10 mln. km^2 and its regional geological-geophysical peculiarities are presented in numerous publications (e.g., Stacy et al., 1980; Ben-Avraham and Ginzburg, 1990; Glennie et al., 1990; Said, 1990; Johnson, 1998; Khain, 2001; Ben-Avraham et al., 2002; Davis and Slack, 2002; Pollastro, 2003; Alsharhan, and Nairn, 2004; Robertson, 2004; Stern et al., 2004; Jimenez-Munt et al., 2006; Reilinger et al., 2006; Hansen et al., 2007; Bordenave, 2008; Johnson and Kattan, 2008; Johnson et al., 2008; Milesi et al., 2010; Stern and Johnson, 2010; Motavalli-Anbaran et al., 2011; Nyblade, 2011; Stampfli et al., 2013; Korostelev et al., 2014; Muluneh et al., 2014; Eppelbaum and Katz, 2015a,b; Tunini et al., 2015; Alizadeh et al., 2016; Globig et al., 2016).

Figure 3 shows satellite gravity anomalies distribution (nealy 4 mln. observations were utilized) which obviously has quasi-normal character. The compiled gravity map accompanied by main tectonic features (Figure 4) shows the intricate gravity pattern of the investigated area. Analysis of the gravity field behavior shown in Figure4 enabled to separate two main types of tectonic structures: (1) stable zones of continental and oceanic crust, and (2) mobile belts. First type displays the homogeneous character of the gravity field pattern (for instance, see the Eastern Arabian Craton in Figure 4), whereas second type is characterized by the mosaic and variable behavior of gravity field (especially, active rift zones).

It should be noted that 'youngest' mobile structures (Alpine-Himalayan orogenic belt and active rift systems of the Red Sea – East Africa) significantly differ in the gravity field pattern from the Mesozoic terrane belt and Neoproterozoic belt (Figure 4).

TRANSFORMATIONS OF SATELLITE DERIVED GRAVITY MAP

Some examples of satellite derived gravity field transformations were shown in (Eppelbaum and Katz, 2012b; Gaina et al., 2013; Li et al., 2013; Eppelbaum, 2014; Klokočník et al., 2014; Eppelbaum and Katz, 2015b). For example, computation of first directional derivatives (south-north) of satellite derived gravity field (Eppelbaum and Katz, 2012b) enabled to clearly trace the main tectonic and geophysical peculiarities of the Eastern most Mediterranean, especially a boundary between continental and oceanic crust. Downward continuation of satellite derived gravity field to a depth of 4 km enabled to display a very intricate tectono-gravity pattern for the African Plate and adjacent regions (Gaina et al., 2013). Li et al. (2013) successfully applied continuous wavelet transform to satellite gravity data for delineation of anomalous sources at different depth within the Chad lineament (North-Central Africa). The use of Marussi tensor and some gravity field invariants were successfully applied for computation of transformations derived from satellite observed gravity anomaly in different regions of the world (Klokočník et al., 2014). An informational approach employed to satellite gravity examination in the South Caspian Basin (Eppelbaum, 2014) enabled to obtain new important characteristics about the buried geological targets. Entropy map derived from the satellite gravity anomalies (Eppelbaum and Katz, 2015b) unmasked some buried tectonic peculiarities of the eastern Mediterranean.

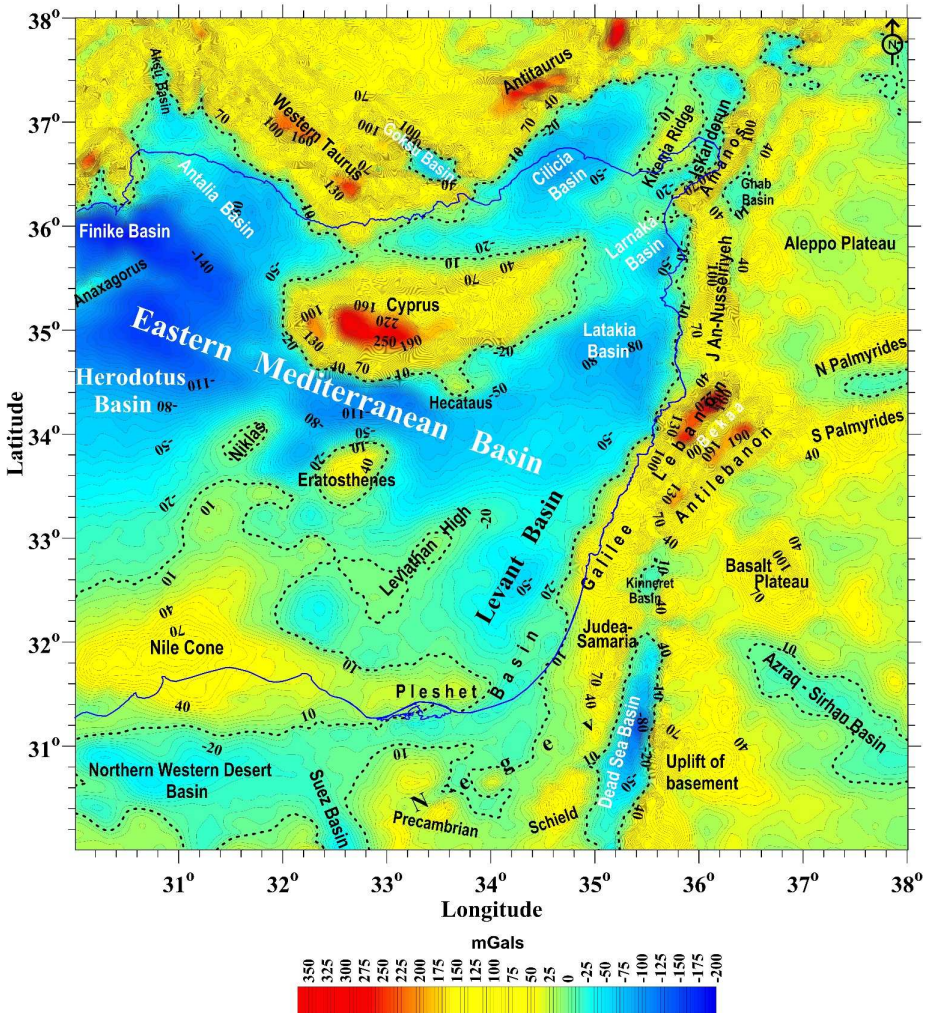


Figure 2. Satellite derived gravity map of the Easternmost Mediterranean with main tectonic units (after Eppelbaum and Katz, 2012b, with modifications). Blue lines outline the Easternmost Mediterranean coast

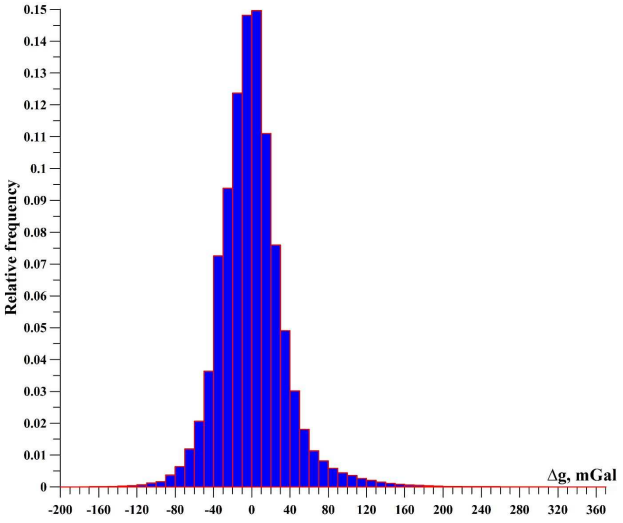


Figure 3. Histogram of satellite derived gravity anomalies distribution for the region under study

In this investigation six most effective computations (totally 12 different transformations were compiled) are presented: multidimensional statistical analysis by the use of sliding window (Figure 5), low-pass filtering (Figure 6), informational approach (Figure 7), gradient operator (Figure 8), entropy processing by sliding window of adaptive form (Figure 9), and 3D inverse methods (Figure10).

Application of the multidimensional statistical analysis (MSA) (Petrov et al., 2011) is carried out on the basis of computation a smoothed gravity field and its dispersion in the sliding window of adaptive (changing) rectangular (or inclined) form. Such a parametrization enabled to compute the effects from the geological targets with different locations along the strike; standard field pattern was automatically detected. Application of the MSA

enabled not only to delineate geodynamical parameters of the studied region (collision zone at the boundary between the Arabian and Eurasian Plates, and active rift zones between the Arabian, Nubian and Somalian Plates, etc.), but also to estimate some tectonic characteristics of the Earth's crust (Figure 5). This map clearly shows zone of development of the oceanic crust of the Easternmost Mediterranean and zone of oceanic crust of the Gulf of Aden and eastern (oceanic) part of the Somalian Plate. Besides this, in this map the Arabian and East African active rift zones and collision zone between the Arabian and Eurasian plates are visibly traced.

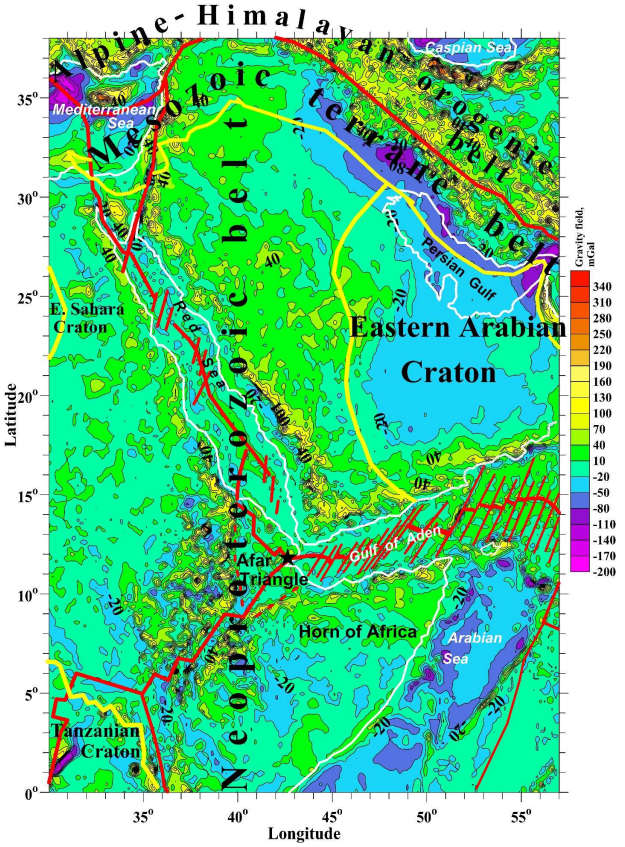


Figure 4. Satellite derived gravity map retracked to the Earth's surface with general tectonic features (cratons, belts and fault systems). Isoline interval is 30 mGal. Red lines indicate fault systems, yellow lines show boundaries of cratons and tectonic belts, and white lines show boundaries between the land and marine areas

Figure 6 presents results of the low-pass gravity field filtering. Here the most contrast crust-mantle structures could be recognized. For example, the Afar triangle is clearly detected. Zones of the Neotethys closing can be identified: Easternmost Mediterranean, Persian Gulf, Zagros Fault Zone, and South Caspian Basin. Subduction zones associated with plate boundaries are reflected by elongated gradient pattern. These nonstable zones are conjugated with large mobile belts: the Alpine-Himalayan belt and the Mesozoic terrane belt. We can suggest that the regional pattern shown in Figure 6 displays relict structures of interaction between the ancient mobile belts, continental lumps and oceans. The zone of active rifting of the Red Sea rift, Gulf of Aden rift and complex structure of the Afar triangle and East African rift system are noticeably fixed. The boundary between the continental and crust in the SE part of the region (where occurs a transfer zone between the Gulf of Aden and Arabian Sea) is visibly detected.

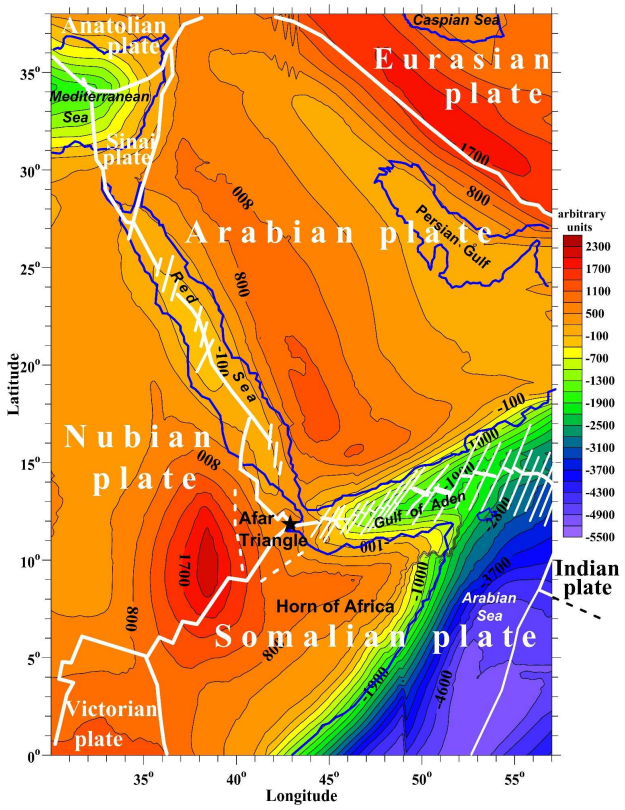


Figure 5. Comparison of the satellite derived gravity field transformed by the use of multidimensional statistical analysis and main plate tectonics units. White lines indicate fault systems, and blue lines show boundaries between the land and marine areas

Informational approach has been earlier tested (Khesin et al., 1996; Eppelbaum and Khesin, 2012) for solving a wide range of geological-geophysical problems. Application of informational approach enabled to reliably fix both continental and oceanic cratons and all belts (Figure 7). To south-east of the Horn of Africa the Arabian Sea Basin with oceanic crust is clearly distinguished. The Eastern Arabian Craton (platform) as well as its framing are noticeably detected.

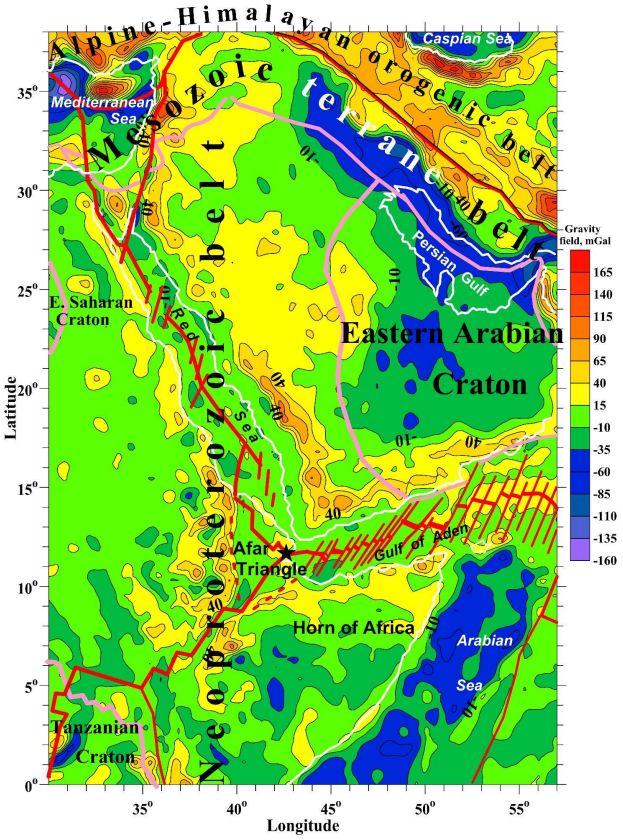


Figure 6. Low-pass filtered gravity map with general tectonic features (cratons, belts and fault systems). Isoline interval is 25 mGal. Symbol ★ designates the triangle junction. Red lines indicate fault systems, pink lines show boundaries of cratons and tectonic belts, and white lines show boundaries between the land and marine areas

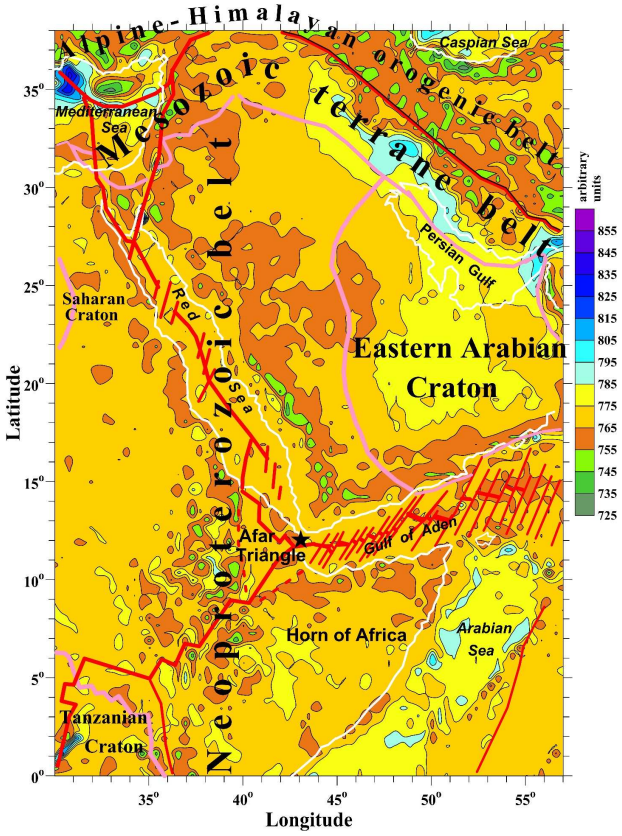


Figure 7. Gravity map transformed by the use of informational approach with general tectonic features (cratons, belts and fault systems). Red lines indicate fault systems, pink lines show boundaries of cratons and tectonic belts, and white lines show boundaries between the land and marine areas

Figure 8 displays the results of gradient operator employment. Here the relatively stable and mobile zones of the Earth's crust are visibly delineated (see also explanation of previous figures).

Computation of entropy map from the satellite derived gravity field was earlier successfully tested by the authors in the Easternmost Mediterranean (Eppelbaum and Katz, 2015a) and other regions. Application of the adaptive form sliding window (Petrov et al., 2011) enables to receive the most reliable entropy estimations in conditions of complex field caused by superimposed influence of targets of different order. Obviously, computation of an entropial map by the same method for the region under study (Figure 9) reproduces mainly deep tectonic units (elements) of the region. Complex pattern of the entropial field in the SE part of the region reflects transfer from Somalian Plate to Indian Plate (this area is characterized by the most mosaic pattern). This map nicely indicates position of the Mesozoic terrane belt and transition zone between the Victorian and Tanzanian plates.

The advanced inverse method developed by Priezzhev (2010) is based on the downward analytical continuation realized in the spectral domain. Applying this methodology, the most density contrast surface (discontinuity) in the upper mantle (lithosphere) was constructed (Figure 10). This map presents an intricate density-tectonic depth pattern of the region. In this map are noticeably recognized such important tectonic features as the Afar Triple Junction and collision zone between the Arabian and Eurasian lithospheric plates. Besides this, we can note increasing of lithospheric thickness in central parts of the Arabian and Somalian Plates. Both these plates are countered by low-thickness lithospheric zones corresponding to active rift zones. As indicated in the map, the thick lithospheric zones are associated with collisional zones at the boundaries between cratons and mobile belts. We suggest that the lowered values in the northern boundaries of the Arabian Plate correspond to subduction zones. The zones of lowered values in the middle of western part of the region correspond to the Neo-

proterozoic belt where ophiolitic and back-arc complexes with a thinned crust (e.g., Stern et al., 2004) are developed. Some very preliminary analysis of heat flow (collected from different sources) indicates that there is a direct correlation between the compiled map (Figure 10) and thermal data.

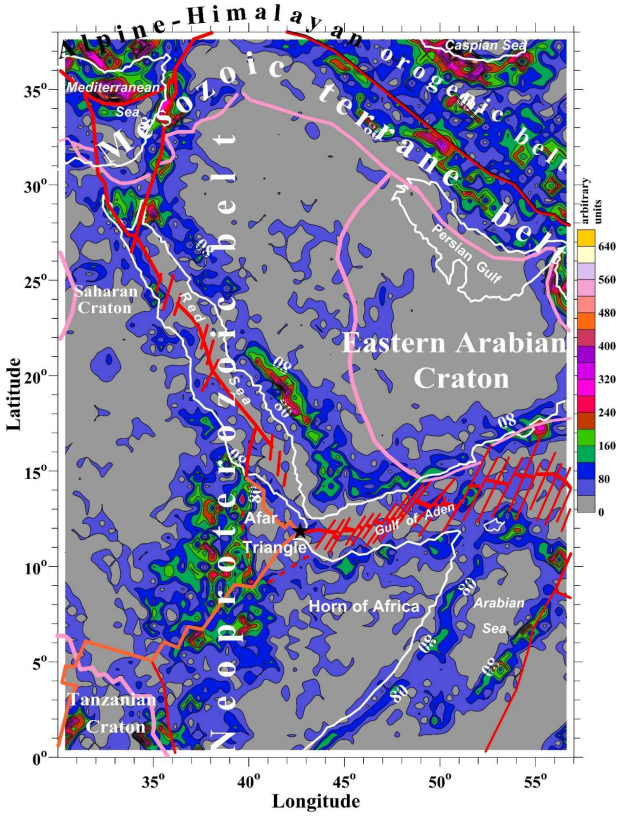


Figure 8. Gravity map transformed by the use of gradient operator with general tectonic features (cratons, belts and fault systems). Red lines indicate fault systems, pink lines show boundaries of cratons and tectonic belts, and white lines show boundaries between the land and marine areas

The depths of contrast density surface (discontinuity) presented in Figure 10 were compared with the results of various geophysical investigations, where some disturbing objects (slabs) were determined at corresponding depths in separate areas of the region (e.g., Yakobson, 1997; Jimenez-Munt et al., 2006; Pasyanos and Nyblade, 2007; Park et al., 2008; Agard et al., 2011; Bastow et al., 2011; Nyblade, 2011; Korostelev et al., 2014; Tunini et al., 2015). The comparison shows reasonably good agreement between the values derived from the satellite gravity data on the one hand, and from the seismic, seismological, temperature and some other data – on the other hand (Table 2).

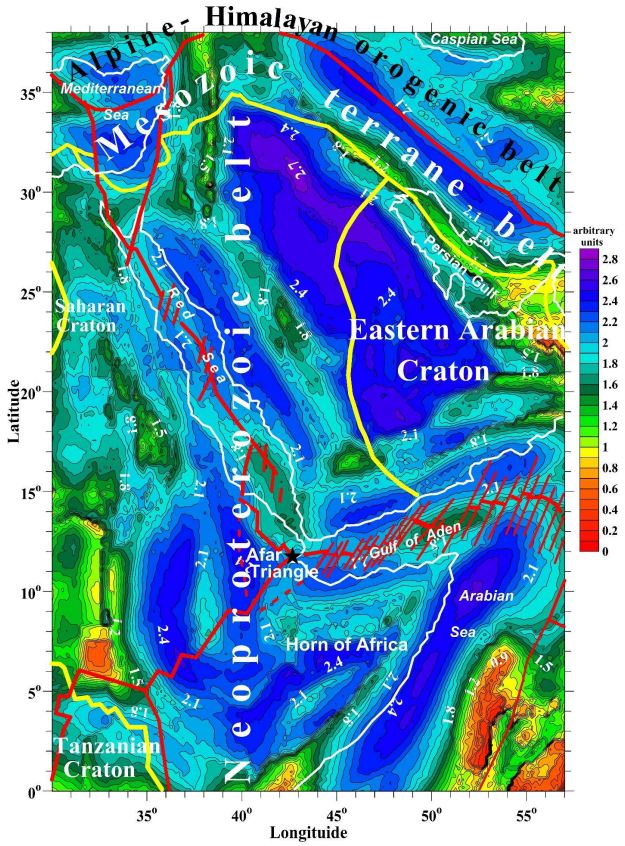


Figure 9. Entropy map transformed from the satellite gravity map accompanied by general tectonic features (cratons, belts and fault systems). Red lines indicate fault systems, yellow lines show boundaries of cratons and tectonic belts, and white lines show boundaries between the land and marine areas

Further geophysical data analysis in the region will include computation and inspection of airborne magnetics (in the areas where these data are available) (for analysis of magnetic anomalies under conditions of oblique magnetization, rugged terrain relief and unknown level of the normal magnetic field a special interpreting system has been developed (e.g., Khesin et al., 1996; Eppelbaum et al., 2004; Eppelbaum and Mishne, 2011; Eppelbaum, 2015)), and satellite derived magnetic data. Thermal flow measurements, which are necessary component of the deep tectono-geophysical analysis (Eppelbaum et al., 2014) will also be examined.

All the data can be used for elaboration of new schemes of long-term seismological prognosis, development of 3D regional physical-geological models and searching different types of economic minerals.

Table 2

Comparison of depth of disturbing bodies occurring in lithosphere (derived from publications of various authors) and map of contrast density masses distribution in lithosphere obtained by the use of satellite derived gravity field transformation

Authors	Applied geophysical method	Latitude	Longitude	Depth of disturbing slab occurrence, km	Depth of slab occurrence, km from map presented in Figure 10
Jimenes-Munt et al., 2003	Seismology	32 – 34°	32 – 34°	120-125	120-130
Jimenes-Munt et al., 2003	Seismology	33 – 36°	38 – 39°	83	85
Tunini et al., 2015	Temperature	30.5°	44°	145	140-145
Tunini et al., 2015	Seismics	30.5°	53 – 53.5°	85	95
Bastow et al., 2011	Seismics	9 – 9.5°	38.5 – 39°	90	90-95
Davis and Slack, 2002	Seismology	3°	37°	120	110
Park et al., 2008	Seismics	24	47	150	135
Hansen et al., 2007	Seismics	31.4°	37.3°	61	70
Yakobson, 1997	Seismics	37.5 – 37.7°	53.8 – 54°	65	63
Mulugeta and Ghebreab, 2001	Analogue modeling	16°	33.5°	100	110

DEVELOPMENT OF A NOVEL TECTONIC MAP FOR THE REGIONS UNDER STUDY

Compiled satellite derived gravity field (Figure 4) and its different transformations (Figures 5-10), described in the previous sections, were utilized for development of a novel tectono-geophysical zonation map of the Arabian-African region. Structurally-geodynamically this region is one of the key Earth's megastructures where are closely disposed remain elements of the Tethys Ocean crust (Ben-Avraham et al., 2002; Robertson, 2004), most ancient Early Permian reversly magnetized Kiama zone (Eppelbaum and Katz, 2012b; Eppelbaum et al., 2014), and the youngest modern oceanic crust of the Afar triangle developed among the continental lumps (Yirgu et al., 2006; Bastow et al., 2011).

Tectonic zonation of this region is based both on the classical geotectonic analysis (e.g., Yanshin, 1965), methods of geotectonic regioning of complex structures and materials of economic deposits prognosis (mostly for the hydrocarbon deposits prospecting).

The tectonic zonation was carried out with application of three main principles of tectonic analysis:

(1) classic basis of space-temporary reflection of structural complexes,

(2) modern structural-geodynamic approach derived from the plate tectonic reconstructions where essential role plays analysis of rift, transform and collision forms of the Earth's development,

(3) revealing of intricate correlation of the mapped tectono-structural elements with lithospheric-mantle complexes delineated by use of both conventional geophysical methods (seismic, seismological, thermal data, etc.) and comprehensive analysis of satellite derived gravity data.

Compiled tectonic map (Figure 11) indicates that the Precambrian basement and Mesozoic-Cenozoic structures play predominant structural-geodynamic role in this region. Precambrian generations include two main structural elements: (1) the Archean platforms (Eastern Arabian, Tanzanian and Eastern Saharan cratons), and (2) the Neoproterozoic belt. In the Neoproterozoic belt, we distinguish: (a) final Proterozoic back-arc belts with ophiolites, and (b) more ancient Early/Middle Proterozoic massifs (detected both in some previous works of various authors and recognized by the authors of this article using a set of geological-geophysical indicators).

In the areas of development of sedimentary Phanerozoic cover in the northern part of the Arabian and African (Nubian) plates, boundaries of the Early/Middle Proterozoic massifs (Tabuk, Haif-Rutfah, Widyan and Nile Cone) and the Neoproterozoic belts (Azraq-Sirhan, Ga'ara and Northern Western Desert) were delineated by the use of: (1) land and airborne geophysical data, and (2) satellite derived gravity data.

Meso-Cenozoic structures of the region contain two tectonic complexes of its forming. 1st complex

(from Permian to present) is associated with the Neotethys Ocean evolution. 2nd complex (from Oligocene to present) is associated with the initial phases of spreading in the Arabian-African segment of the Earth's crust.

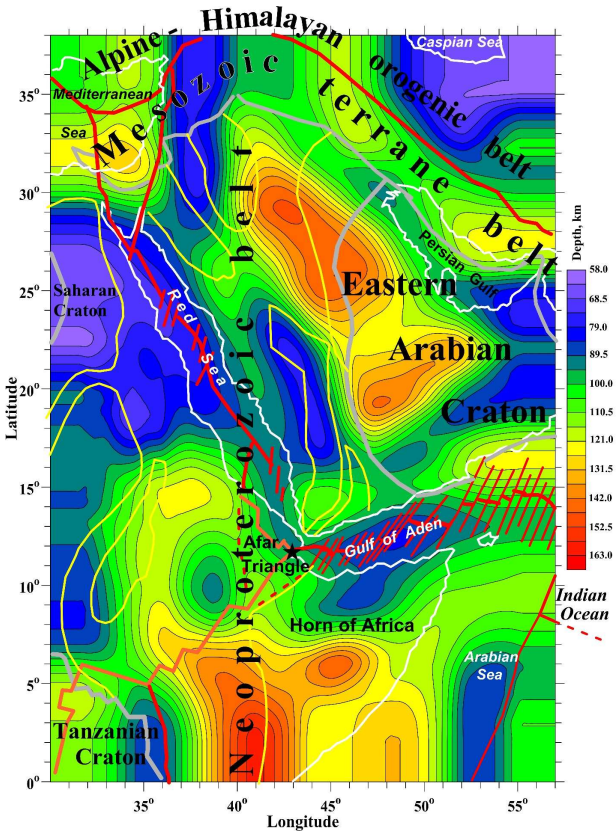


Figure 10. Comparison of map of contrast density masses distribution in the upper mantle obtained by satellite derived gravity map transformation with major tectonic elements (after Eppelbaum and Katz, 2016, with modifications. Red lines indicate fault systems, grey lines show boundaries between cratons and tectonic belts, yellow lines show boundaries between the zones of Early and Late Proterozoic consolidation and Neoproterozoic Belt, and white lines show boundaries between the land marine areas

1st complex structurally and geodynamically is a multiple generation since the Neotethys Ocean evolution was accompanied by processes of spreading, movements of some giant blocks (domains) along transforms, and collisions. These processes have formed structures of three types: (1) the Mesozoic terrane belt, (2) the Cenozoic orogenic belt, and (3) remain depressions of the Neotethys with oceanic crust. In series of our previous publications (Katz and Eppelbaum, 1999; Eppelbaum and Katz, 2012; Eppelbaum et al., 2014; Eppelbaum and Katz, 2015a,b,c, 2016) several novel aspects of structural genesis of the southern side of the Neotethys Ocean were presented. The most important novel aspects are the earlier unknown 'Mesozoic terrane belt' and 'Eastern Mediterranean–Nubian Belt' (EMNB). The last structure is marked by the Cretaceous volcanogenic complexes and diamondiferous kimberlite pipes (Sharkov and Khanna, 1986; Eppelbaum and Katz, 2012a).

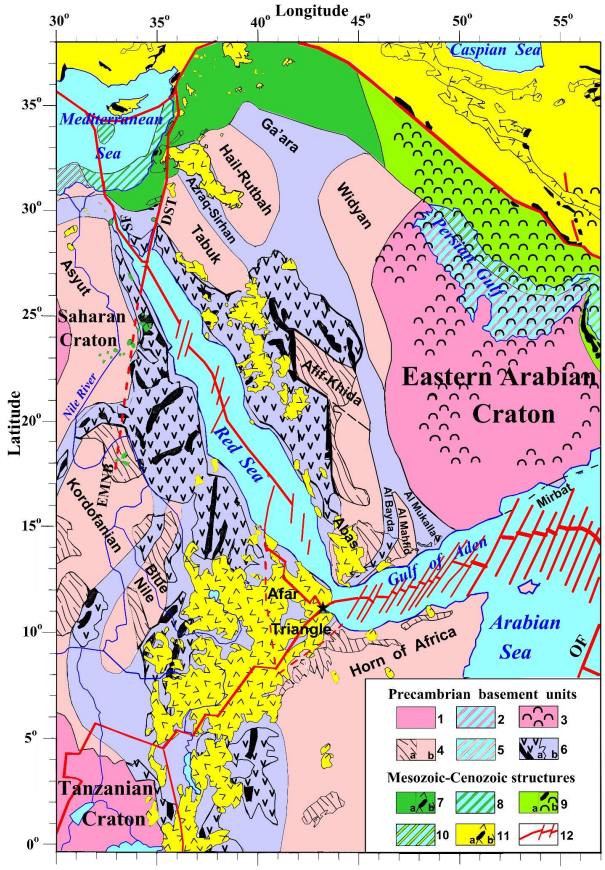


Figure 11. A novel tectonic map of the region under study
(1) Archean cratons, (2) submarine continuation of Archean cratons, (3) Upper Precambrian salt basins, (4) Paleo-Mesoproterozoic basement: (a) exposed, (b) buried at the depth, (5) submarine continuation of Paleo-Mesoproterozoic basement, (6) Neoproterozoic belt: (a) exposed with ophiolites, (b) buried at the depth, (7) Early Cretaceous accretional complex: (a) traps and ophiolitic associations, (b) sedimentary rocks, (8) submarine continuation of the Early Cretaceous accretional complex, (9) Late Cretaceous accretional complex: (a) Neoproterozoic salts and Mesozoic ophiolites, (b) sedimentary rocks, (10) submarine continuation of the Late Cretaceous accretional complex, (11) Cenozoic accretional and fault systems: (a) traps and ophiolites, (b) sedimentary rocks, (12) collisional and active rift systems.
EMNB, Eastern Mediterranean-Nubian Belt; SF, Sinai Fault; DST, Dead Sea Transform, OF, Owen Fault, NWD, Northern Western Desert, symbol ★designates the triangle junction

Western (Levantine) part of the Mesozoic terrane belt is characterized by more ancient (Hauterive) age of consolidation comparing with the eastern part of the belt (Persian-Oman).Its terranes (from Zagros to Makran) and ophiolites were joined to

Arabian platform in the Middle Cretaceous (Cenomanian-Turonian) (Eppelbaum and Katz, 2017).

The Mesozoic terrane belt was delineated in the Eastern Mediterranean by the use of variety of geological and geophysical methods (multilevel gravity and magnetic data examination, thermal data analysis, seismic and seismological data) application (Ben-Avraham et al., 2002; Eppelbaum et al., 2012; Eppelbaum and Katz, 2015a, 2015b, 2016). At the same time, eastern Zagros-Makran part of the Mesozoic terrane belt was never analyzed as a separately developing structural part (unit) of the Arabian craton. In all known paleogeographical reconstructions the Zagros-Makran structure is shown as a part of the Arabian craton northern periphery. However, analysis of facial, sedimentary and structural data (presented in Bordenave, 2008) indicates that there is a sharp discordant joining of the Arabian craton and Zagros belt (Eppelbaum and Katz, 2017). Axes of anticline structures of the Arabian craton have a meridional strike, while axes of the Zagros anticline structures are disposed discordantly to them at SW 35-50^{o}. Besides this, paleogeological maps of Paleozoic (Bordenave, 2008) indicate that Devonian and Carboniferous deposits widely developed within the Arabian craton, do not presented in the Zagros belt. It testifies an uplift of the Zagros suture and its isolated evaluation in the post-Carboniferous time when the Tethys Ocean began to form. Geological factors of the Zagros suture zone isolation indicate that it was possibly a part of terrane belt in the southern part of the Neothetys Ocean forming. It is necessary to take into account that the Zagros structure most likely occupied different tectonic position at the different periods of the geological time: (1) up to Carboniferous period the Zagros zone was a part of the Eastern Arabian Craton, (2) in the interval between Permian and Middle Cretaceous it was a part of the terrane belt within the Neotethys, (3) at present it is a marginal part of the Arabian lithospheric plate (see Figure 1). All three aforementioned items find a direct reflection in the compiled gravity map (Figure 4) and its different transformations (Figures 5 – 10):

(1) Common structural-geophysical properties of the Zagros suture zone and Arabian craton can be recognized in informational (Figure 7) and gradient (Figure 8) gravity field transformations.

(2) Examination of initial gravity map (Figure 4), entropial transformation map (Figure 9) and deep structure map (Figure 10) testify that Zagros is an independent structural unit within the Mesozoic terrane belt. Presence of thick Cenozoic sediments in the eastern part of Arabian Plate makes the delineation of boundaries between the Mesozoic terrane belt and Precambrian platform practically possible only by regional geophysical data analysis. In all three above-mentioned maps (Figures 4, 9 and 10) sharp changing of gravity pattern enables to utilize this property as criterion for delineation of southern boundary of the Mesozoic terrane belt.

(3) Map of satellite gravity field transformed by the use of multistatistical analysis (Figure 5) unambiguously indicates that Zagros is a marginal part of the Arabian lithospheric plate.

2nd complex – Late Cenozoic tectonic element– corresponds to post-Tethyan stage of young rift structures of the Eastern Africa, Arabia and Indian Ocean. Uplift of the deep mantle matter caused development of Cenozoic traps and generation of ore fields and kimberlite pipes. Rift zones and volcanic-tectonic structures shown in the deep structure map (see Figure 11) – elements of the triple junction, transform faults and trap complexes – clearly fixed in the zones of uplift of deep asthenosphere masses. Structure of Arabian sintaxis is associated with the same processes. Beginning of its formation relates (taking into account presence of Cretaceous traps of the EMNB) to Middle Cretaceous (probably, Alb-Cenomanian). In the beginning of Paleogene separation of Arabia from the Eastern Africa is marked by Paleocene (53-60 Ma) diamond-bearing kimberlites (Davis, 1977; Tainton et al., 1999), and active riftogenesis is marked by Oligocene traps (approximately 30 Ma). In the northern part of this sintaxis an eastern part of the Mesozoic terrane belt is disposed. According to Eppelbaum and Katz (2015a, 2015c) this belt has been moved anticlockwise from the east to west. Similar effect was clearly detected at the modern stage of geological history in the Easternmost Mediterranean from the regional GPS data analysis (e.g., McClusky et al., 2000; Reilinger et al., 2006). Interestingly to note that the total pattern of the GPS vectors displays here so-called geodynamical vortex structure (mathematical model of this effect was given in Aleinikov et al., 2001). In the center of this vortex the well-known Cyprus gravity anomaly (CGA) (about +180 mGal in the Bouguer reduction) is located. Gass and Masson-Smith (1963) proposed that this anomaly is caused by a mantle plum; later Gass (1968) modified this hypothesis by the use of plate tectonics model and suggested a model of an overthrusted ocean floor over the African Plate. Eppelbaum and Pilchin (2006) proposed that the Earth's crust of the western Cyprus is composed of a dou-

bled ocean crust formed in ancient times by an obduction of the oceanic crust onto itself with its subsequent immersion and partial destruction.

The CGA borders to the south-east with a block of the most ancient oceanic crust is associated with the detected Kiama zone of inverse polarity (Eppelbaum et al., 2014). Obviously, this zone is categorized by a complex superposition of different geodynamic events (Ben-Avraham et al., 2006; Reilinger et al., 2006; Eppelbaum and Katz, 2015b). Noticeably, the vortex effect in the Easternmost Mediterranean (appearing in the GPS data pattern) is one of key elements for understanding the western part arch of the Mesozoic terrane belt (see Figure 7B in (Eppelbaum and Katz, 2015b).

Comprehensive analysis of published sources indicates absence of a common tectonic map for the region under study. Various authors published mainly isolated and uncoordinated maps and schemes of the area, often contradictory each other. At the same time, such a generalized map is of great necessity for solving different geological-geophysical problems: tectono-geophysical mapping, development of 3D physical-geological models, searching different types of economic deposits and long-term seismological prognosis, etc. Therefore, on the basis of detailed analysis of the following main publications: Glennie et al., 1990; Lenoir et al., 1994; Camelbeeck and Iranga, 1996; Johnson, 1998; Pollastro, 2003; Alsharhan, and Nairn, 2004; Bosworth et al., 2005; Hall et al., 2005; Krasheninnikov et al., 2005; Reilinger et al., 2006; Al-Juboury and Al-Hadidy, 2008; Bordenave, 2008; Johnson and Kattan, 2008; Johnson et al., 2008; Scotese, 2009; Milesi et al., 2010; Stern and Johnson, 2010; Motavalli-Anbaran et al., 2011; Verges et al. 2011; Eppelbaum and Katz, 2012a; Moghadam et al., 2013; Muluneh et al., 2014; Stamps et al., 2014; Eppelbaum and Katz, 2015a,b; Tunini et al., 2015; Alizadeh et al., 2016; Globig et al., 2016, and combined geophysical data examination, a novel tectonic map of the Near and Middle East and Northern-Eastern Africa has been developed (Figure11).

For the tectonic map compiling a classic method of such maps development (e.g., Khain, 2001) – historical principle of structural evolution – was applied. Such an approach enabled us to show for the first time an interaction of tectonic structures of three types: (1) the structure of basement of the African-Arabian platform, (2) structures of this platform northern boundaries (including originally delineated Mesozoic-Cenozoic mobile belts), and (3) active rift systems. Some results obtained for the tectonic zonation of oceanic crust (e.g., Bosworth et al., 2005; Eppelbaum and Katz, 2015a) are omitted due to the comparatively small scale of the tectonic map.

For development of this map, results of various geophysical method application (first of all, satellite gravity),GPS, seismic, seismological, magnetic and thermal data) were widely used. For instance, GPS data presented in (Gripp and Gordon, 2002; Muluneh et al., 2014) were employed for tracing rift zone boundaries between the Somalian and Nubian Plates.

MAIN TECTONO-GEOPHYSICAL CONCLUSIONS

First of all, this investigation indicates the possibility of application of gravity field retracked from satellites for the delineation of regional tectono-structural peculiarities both in marine and land areas. Comparison of the novel tectonic map of the area under study (Figure 11) with compiled satellite derived gravity map (Figure 4) and six computed gravity map transformations (Figures 5-10) enabled to recognize the following regional tectono-geophysical peculiarities: (1) observed gravity map (Figure 4) and its transformations (Figures 5-10) reflect essential structural and geodynamic features of the region under study, (2) gravity field and its transformations contain complex patterns reflecting different types of mobile structures (first of all, active rift zones), (3) the gravity field transformations clearly trace both (a) main tectonic boundaries, and (b) boundaries of other ranks; (4) in all the maps (but in the gravity transformations – to a greater extent) different types of the Earth's crust can be distinguished.

Gravity field transformations presented in Figures 5-9 mostly indicate the tectono-geophysical zonation (qualitative analysis) of the region under study, presence of different types of the Earth's crust and possibly position of some slabs (structures) in the upper mantle. Figure 10 demonstrates depths of distribution of contrast density masses surface in lithosphere (semi-quantitative analysis).

All these maps (Figures 4-11) may be effectively employed for the long-term seismological prognosis. These maps may also be useful sources for development of any kind of physical-geological models (delineating physical-geological domains of various origin) and searching various types of economic minerals in the region under study.

Satellite derived gravity field analysis has demonstrated its unique feasibilities for regional (no additional correction for land retracked satellite gravity was introduced) tectono-geophysical zonation (both qualitative and semi-quantitative). At the same time, in the land areas with highly rugged relief some additional corrections to the satellite gravity anomalies may be necessary.

Further geophysical data analysis in the region under study will include map computation and examination of airborne magnetics and satellite derived magnetic data and thermal data employment, with attraction of other kinds of geophysical materials.

Acknowledgements

The authors thank Dr. S.Yu.Sokolov (Geological Inst. of the Russian Academy of Sciences) and one anonymous Reviewer which critical comments and valuable suggestions were helpful in preparing this paper.

REFERENCES

AGARD, P., OMRANI, G., JOLIVET, L., WHITECHURCH, H., VRIELYNCK, B., SPAKMAN, W., MONIE, P., MEYER, B., WORTEL, R. 2011. Zagros orogeny: A subduction-dominated process. *Geological Magazine*, 148, 5-6, 692-725.

ALEINIKOV, A.L., BELIKOV, V.T., EPPELBAUM, L.V. 2001. Some physical foundations of geodynamics. Kedem Printing-House. Tel Aviv. Israel.

ALIZADEH, A.A., GULIYEV, I.S., KADIROV, F.A., EPPELBAUM, L.V. 2016. Geosciences of Azerbaijan. Volumes I & II. Springer. Heidelberg – N.Y. – London.

AL-JUBOURY, A., AL-HADIDY, A. 2008. Facies and depositional environments of the Devonian-Carboniferous succession of Iraq. *Geological Journal*, 43, 383-396.

ALSHARHAN, A.S., NAIRN, A.E.M. 2004. Sedimentary Basins and Petroleum Geology of the Middle East. Elsevier. Amsterdam – Tokyo.

ANDERSEN, O.B., KNUDSEN, P., BERRY, P.A.M. 2009. The DNSC-08GRA global marine gravity field from double retracked satellite altimetry. *Journal of Geodesy*, 84, 3, 191-199.

BASTOW, I.D., KEIR, D., DALY, E. 2011. The Ethiopia Afar Geoscientific Experiment (EAGLE): Probing the transition from continental rifting to incipient seafloor spreading. In: Volcanism and evolution of the African lithosphere. *The Geol. Society of America, Spec. Paper*, 478, 51-76.

BEN-AVRAHAM, Z., GINZBURG, A. 1990. Displaced terranes and crustal evolution of the Levant and the eastern Mediterranean. *Tectonics*, 9, 613-622.

BEN-AVRAHAM, Z., GINZBURG, A., MAKRIS, J., EPPELBAUM, L. 2002. Crustal structure of the Levant basin, Eastern Mediterranean. *Tectonophysics*, 346, 23-43.

BEN-AVRAHAM, Z., SCHATTNER, U., LAZAR, M., HALL, J.K., BEN-GAI, Y., NEEV, D., RESHEF, M. 2006. Segmentation of the Levant continental margin, eastern Mediterranean. *Tectonics,* 25, TC5002, 1-17.

BORDENAVE, M.L. 2008. The origin of the Permo-Triassic gas accumulations in the Iranian Zagros foldbelt and contiguous offshore areas: A review of the Paleozoic petroleum system. *Jour. of Petroleum Geology*, 31, 1, 3-42.

BOSWORTH, W., HUCHON, P., McCLAY, K. 2005. The Red Sea and Gulf of Aden Basins. *Jour. of African Earth Sciences*, 43, 334-378.

BRAITENBERG, C., EBBING, J. 2009. New insights into the basement structure of the West Siberian Basin from forward and inverse modeling of GRACE satellite gravity data. *Jour. of Geophysical Research*, 114, B06402, 1-15.

CAMELBEECK, T., IRANGA, M.D. 1996. Deep crustal earthquakes and active faults along the Rukwa trough, eastern Africa. *Geophysical Jour. International*, 124, 612-630.

DAVIS, G.L. 1977. The ages and uranium contents of zircons from kimberlites and associated rocks. Carnegie Inst. Yearbook, 76, 631-635.

DAVIS, P.M., SLACK, P.D. 2002. The uppermost mantle beneath the Kenya dome and relation to melting, rifting and uplift in East Africa. *Geophysical Research Letters*, 29, 7, 1117, 1-4.

EPPELBAUM, L.V. 2014. Estimating informational content in geophysical observations on example of searching economic minerals in Azerbaijan. *Proceedings Acad. Sci. Azerb. Rep., Ser.: Earth Sciences*, 3-4, 31-40.

EPPELBAUM, L.V. 2015. Quantitative interpretation of magnetic anomalies from bodies approximated by thick bed models in complex environments. *Environmental Earth Sciences*, 74, 5971-5988.

EPPELBAUM, L., BEN-AVRAHAM, Z., KATZ, Y. 2004. Integrated analysis of magnetic, paleomagnetic and K-Ar data in a tectonic complex region: an example from the Sea of Galilee. *Geophysical Research Letters*, 31, 19, L196022004, 1-4.

EPPELBAUM, L.V., KATZ, Y.I. 2012a. Mineral deposits in Israel: A contemporary view. In: *Israel: Social, Economic and Political Developments. Nova Science Publishers*, N.Y., USA, 1-41.

EPPELBAUM, L.V., KATZ, Y.I. 2012b. Key features of seismo-neotectonic pattern of the Eastern Mediterranean. *Proceedings Acad. Sci. Azerb. Rep., Ser.: Earth Sciences*, 3, 29-40.

EPPELBAUM, L.V., KATZ, Yu.I. 2015a. Newly developed paleomagnetic map of the Easternmost Mediterranean Unmasks geodynamic history of this region. *Central European Jour. of Geosciences* (*Open Geosciences*), 7, 1, 95-117.

EPPELBAUM, L.V., KATZ, Yu.I. 1915b. Eastern Mediterranean: Combined geological-geophysical zonation and paleogeodynamics of the Mesozoic and Cenozoic structural-sedimentation stages. *Marine and Petroleum Geology*, 65, 198-216.

EPPELBAUM, L.V., KATZ, Yu.I. 2015c. Paleomagnetic mapping in various areas of the Easternmost Mediterranean based on an integrated geological-geophysical analysis. In: *New Developments in Paleomagnetism Research, Ser: Earth Sciences in the 21st Century*, Nova Science Publisher, NY, 15-52.

EPPELBAUM, L.V., KATZ, Yu.I. 2016. Tectono-geophysical zonation of the Near and Middle East and Eastern Africa. *International Journal of Geology*, 10, 1-10.

EPPELBAUM, L.V., KATZ, Y.I. 2017. Satellite gravity transforms unmask tectonic pattern of Arabian-African region.

Trans. of the 13th EUG Meet., Geophysical Research Abstracts, Vol. 19, EGU2017-2908, Vienna, Austria, pp. 1-4.

EPPELBAUM, L.V., KATZ, Y.I., BEN-AVRAHAM, Z. 2012. Israel – petroleum geology and prospective provinces. *AAPG European Newsletter*, 4, 4-9.

EPPELBAUM, L.V., KHESIN, B.E. 2012. Geophysical studies in the Caucasus. Springer. Heidelberg – N.Y. – London.

EPPELBAUM, L.V., KUTASOV, I.M., PILCHIN, A.N. 2014. Applied Geothermics. Springer. Heidelberg – N.Y. – London.

EPPELBAUM, L.V., MISHNE, A.R. 2011. Unmanned airborne magnetic and VLF investigations: effective geophysical methodology of the near future. *Positioning*, 2, 3, 112-133.

EPPELBAUM, L.V., PILCHIN, A.N. 2006. Methodology of Curie discontinuity map development for regions with low thermal characteristics: An example from Israel. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 243, 3-4, 536-551.

GAINA, C., TORSVIK, T.H., VAN HINSBERGEN, D.J.J., MEDVEDEV, S., WERNER, S.C., LABAILS, C. 2013. The African Plate: A history of oceanic crust accretion and subduction since the Jurassic. *Tectonophysics*, 604, 4-25.

GASS, I.G., MASSON-SMITH, D. 1963. The geology and gravity anomalies of the Troodos Massif, Cyprus. *Phil. Trans. of the Royal Society of London. Series A, math. and physical sci.*, 255, 417-466.

GASS, I.G. 1968. Is the Troodos Massif of Cyprus a fragment of Mesozoic ocean floor? *Nature*, 220, 5162, 39-42.

GLENNIE, K.W., CLARKE, M.W.H., BOEUF, M.G.A., PILAAR, W.F.H., REINHARDT, B.M. 1990. Inter-relationship of Makran-Oman Mountains belts of convergence. In: *The geology and tectonics of the Oman region*. *Geological Society, London, Special Publications*, 49, 773-786.

GLOBIG, J., FERNANDEZ, M., TORNE, M., VERGES, J., ROBERT, A., FACENNA, C. 2016. New insights into the crust and lithospheric mantle structure of Africa from elevation, geoid, and thermal analysis. *Jour. of geophysical research*: *Solid Earth*, doi: 10.1002/2016JB012972, 1-36.

GRIPP, A., GORDON, R. 2002. Young tracts of hotspots and current plate velocities. *Geophysical Jour. International*, 150, 321-364.

GRUSHINSKY, N.P. 1976. The Theory of the Earth Shape. Nauka. Moscow (in Russian).

HALL, J.K., KRASHENINNIKOV, V.A., HIRSCH, F., BENJAMINI, C., FLEXER, A. (eds.), 2005. Geological framework of the Levant. Volume II: The Levantine Basin and Israel. Jerusalem.

HANSEN, S.E., RODGERS, A.J., SCHWARTZ, S.Y. AND AL-AMRI, A.M.S. 2007. Imaging ruptured lithosphere beneath the Red Sea and Arabian Peninsula. *Earth and Planetary Science Letters*, 259, 256-265.

HIRT, C., GRUBER T., FEATHERSTONE, W. 2011. Evaluation of the first GOCE static gravity field models using terrestrial gravity, vertical deflections and EGM2008 quasigeoid heights. *Journal of Geodesy*, 85, 723-740.

JIMENEZ-MUNT, I., SABADINI, R., GARDI, A. 2006. Active deformation in the Mediterranean from Gibraltar to Anatolia inferred from numerical modeling and geodetic and seismological data. *Jour. of Geophysical Research*, 108, B1, 1-24.

JIN-YU, Y., XUN-HUA, Z., FEI-FEI, Z., BO, H., ZHEN-XING, T. 2014. Preparation of the free-air gravity anomaly map in the seas of China and adjacent areas using multi-source gravity data and interpretation of the gravity field. *Chinese Journal of Physics*, 57, 6, 872-884.

JOHNSON, P.R. 1998. Tectonic map of Saudi Arabia and adjacent areas. *Deputy Ministry for Mineral Resources*, *USGS - TR-98-3*, Saudi Arabia.

JOHNSON, P.R., KATTAN, F.H. 2008. Lithostratigraphic revision in the Arabian shield: The impacts of geochronology and tectonic analysis. *The Arabian Jour. for Science and Engin*., 33, 1, 3-16.

JOHNSON, P.R., KATTAN, F.H. AND AL-SALEH, A.M. 2008. Chapter 4, Neoproterozoic ophiolites in the Arabian Shield: Field relations and structure. In: *Precambrian ophiolites and related rocks*, *developments in Precambrian geology*, 13, 129-162.

KATZ, Y.I., EPPELBAUM, L.V. 1999. Levantine phase of tectonic-thermal activity in the Eastern Mediterranean. *Trans. of the Ann. Meet. of Geol. Soc. of Amer*., *Sect: Planetary Geology*, 31, 7, A119.

KHAIN, V.E. 2001. Tectonics of Continents and Oceans. Scientific World. Moscow (in Russian).

KHESIN, B.E., ALEXEYEV, V.V., EPPELBAUM, L.V. 1996. Interpretation of Geophysical Fields in Complicated Environments. Kluwer Academic Publishers (Springer) Ser.: Modern Approaches in Geophysics. Boston – Dordrecht – London.

KLOKOČNÍK, J., KOSTELECKÝ, J., EPPELBAUM, L., BEZDĚK, A. 2014. Gravity disturbances, the Marussi tensor, invariants and other functions of the geopotential represented by EGM 2008. *Journal of Earth Science Research*, 2, 3, 88-101.

KOROSTELEV, F., BASUYAU, C., LEROY, S., TIBERI, C., AHMED, A., STUART, G.W., KEIR, D., ROLANDONE, F., AL GANAD, F., KHANBARI, K., BOSCHI, L. 2014. Crustal and upper mantle structure beneath south-western margin of the Arabian Peninsula from teleseismic tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15, 2850-2864.

KRASHENINNIKOV, V.A., HALL, J.K., HIRSCH, F., BENJAMINI, H., FLEXER, A. (eds.), 2005. Geological Framework of the Levant, Volume 1: Cyprus and Syria. Jerusalem.

LENOIR, J.-L., KÜSTER, D., LIEGEOIS, J.-R., UTKE, A., HAIDER, A., MATHEIS, G. 1994. Origin and regional significance of late Precambrian and early Palaeozoic granitoids in the Pan-African belt of Somalia. *Geol. Rundsch.*, 83, 624-641.

LI, Y., BRAITENBERG, C., YANG, Y. 2013. Interpretation of gravity data by the continuous wavelet transform: The case of the Chad lineament (North-Central Africa). *Journal of Applied Geophysics*, 90, 62-70.

McLUSKY, S. et al. 2000. Global Position System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Jour. of Geophysical Research*, 105, 5695-5719.

MILESI, J.P., FRIZON DE LAMOTTE, D., DE KOCK, G., TOTEU, F. 2010. Tectonic Map of Africa, 1:10 000 000 scale. Paris. CCGM-CGMW.

MOGHADAM, H.S., CORFU, F., STERN, R.J. 2013. U-Pb zircon ages of Late Cretaceous Nain-Dehshir ophiolites, central Iran. *Jour. of the Geological Soc*., London, 170, 175-184.

MORNER, N.-A. (ed.). 1980. *Earth Rheology, Isostasy and Eustasy*. Wiley. Chichester.

MOTAVALLI-ANBARAN, S.H., ZEYEN, H., BRUNET, M.-F., ANDERSTANI, V.E. 2011. Crustal and lithospheric structure of the Alborz Mountains, Iran, and surrounding areas from integrated geophysical modeling. *Tectonics*, 30, TC5012, 1-16.

MULUGETA, G., GHEBREAB, W. 2001. Modeling heterogeneous stretching during episodic or steady rifting of the continental lithosphere. *Geology*, 29, 10, pp. 895-898.

MULUNEH, A.A., CUFFARO, M., DOGLONI, C. 2014. Left-lateral transtension along the Ethiopian Rift and constrains on the mantle-reference plate motions. *Tectonophysics*, 632, 21-31.

NYBLADE, A.A. 2011. The upper-mantle low-velocity anomaly beneath Ethiopia, Kenya, and Tanzania: Constraints on the origin of the African super swell in eastern Africa and plate versus plume models of mantle dynamics. In: *Volcanism and Evolution of the African Lithosphere*, *The Geol. Society of America*, Spec.Paper 478, 1-14.

PARK, Y., NYBLADE, A.A., RODGERS, A.J., AL-AMRI, A. 2008. S wave velocity structure of the Arabian Shield upper mantle from Rayleigh wave tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9, 7, 1-15.

PASYANOS, M.E., NYBLADE, A.N. 2007. A top to bottom lithospheric study of Africa and Arabia. *Tectonophysics*, 444, 27-44.

PETROV, A.V., ZINOVKIN, S.V., OSIPENKOV, D. Yu., YUDIN, D.B. 2011. Computer technology of statistical and spectrum-correlation data analysis KOSKAD 3D 2011. *Geoinformatics*, 4, 7-13 (in Russian).

POLLASTRO, R.M. 2003. Total petroleum systems of the Paleozoic and Jurassic, Greater Ghawar uplift and adjoining provinces of Central Saudi Arabia and Northern Arabian-Persian Gulf. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 2202-H, 1-75.

PRIEZZHEV, I.I. 2010. Information technologies of integrated interpretation of geophysical data for geological modeling. D. Sci. Thesis, Moscow Geological Prosp. University (in Russian).

REILINGER, R.E., McCLUSKY, S., VERNANT, P., LAWRENCE, S., ERGINTAV, S., CAKMAK, R., OZENER, H., KADIROV, F., GULIEV, I., STEPANYAN, R., NADARIYA, M., HAHUBIA, G., MAHMOUD, S., SAKR, K., ARRAJEHI, A., PARADISSIS, D., AL-AYDRUS, A., PRILEPIN, M., GUSEVA, T., EVREN, E., DMITROTSA, A. FILIKOV, S.V., GOMEZ, F., AL-GHAZZI, R., KARAM, G. 2006. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Jour. of Geophysical Research,* BO5411, doi: 10.1029/2005JB004051, 1-26.

ROBERTSON, A. 2004. Development of concepts concerning the genesis and emplacement of Tethyan ophiolites in the Eastern Mediterranean and Oman regions. *Tectonophysics*, 66, 331-387.

RUMMEL, R., YI. W., STUMMER, C. 2011. GOCE gravitational gradiometry. *Journal of Geodesy*, 85, 11, 777-790.

SAID, R. (ed.). 1990. *The Geology of Egypt*. AA Balkema/Rotterdam/ Brookfield.

SANDWELL, D.T., GARCIA, E., SOOFI, K., WESSEL, P., SMITH, W.H.F. 2013. Toward 1 mGal global marine gravity from CryoSat-2, Envisat, and Jason-1. *The Leading Edge*, 32, 8, 892-899.

SANDWELL, D.T., SMITH, W.H.F. 2009. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge Segmentation versus spreading rate. *Journal of Geophysical Research*, 114, B01411, 1-18.

SCOTESE, C.R. 2009. Late Proterozoic plate tectonics and palaeogeography: a tale of two supercontinents, Rodinia and Pannotia. *Geological Society, London, Special Publications*, 326, 57-83.

SHARKOV, E.V., KHANNA, C. 1987. Evolution of the upper mantle matter within the areas of interplate basaltic magmatism (on example of Western Syria). *Doklady Russian Acad. Sci*., 297, 3, 684-686.

STACY, J.S., DOE, B.R., ROBERTS, R.J., DELEVAUX, M.H., GRAMLICH, J.W. 1980. A lead isotope study of mineralization in the Saudi Arabian shield. *Contrib. Mineral. Petrol*., 74, 175-188.

STAMPFLI, G.M., HOCHARD, C., VÉRARD, C., WILHEM, C., VON RAUMER, J. 2013. The formation of Pangea. *Tectonophysics*, 593, 1-19.

STAMPS, D.S., IAFFALDANO, G., CALAIS, E. 2014. Role of mantle flow in Nubia-Somalia plate divergence. *Geophysical Research Lett*., doi: 10.1002/2014GL062515, 290-296.

STERN, R.J., JOHNSON, P.R. 2010. Continental lithosphere of the Arabian Plate: A geologic, petrologic, and geophysical synthesis. *Earth-Science Reviews*, 101, 29-67.

STERN, R.J., JOHNSON, P.R., KRONER, A., YIBAS, B. 2004. Neoproterozoic ophiolites of the Arabian-Nubian Shield. *Developments in Precambrian Geology*, 13, 95-128.

TAINTON, K.M., SEGGIE, A.M., BAYLY, B.A., TOMLINSON, I., QUADLING, K.E. 1999. Garnet thermobarometry: Implication for mantle heat flow within the Tanzanian craton. *Proceeding of the VIIth International Kimberlite Conference*. Cape Town, South Africa: Red Roof Publishing CC, 852-860.

TUNINI, L., JIMENEZ-MUNT, I., FERNANDES, M., VERGES, J., VILLASENOR, A. 2015. Lithospheric mantle heterogeneities beneath the Zagros Mountains and the Iranian Plateau: A petrological-geophysical study. *Geophysical Jour. International*, 200, 596-614.

VERGES, J., SAURA, E., CASCIELLO, E., FERNANDEZ, M., VILLASENOR, A., JIMENEZ-MUNT, I., GARSIA-CASTELLANOS, D. 2011. Crustal-scale cross-sections across the NW Zagros belt: implications for the Arabian margin reconstruction. *Geological Magazine*, doi:10.1017/S0016756811000331, 1-23.

YAKOBSON, A.N. 1997. Velocity of shear seismic waves in the Southern Caspian lithosphere. *Doklady Russian Acad. of Sci*., 353, 2, pp. 258-260.

YANSHIN, A.L. 1965. Tectonic structure of Eurasia. *Geotectonics* (*Geotektonika*), 5, 7-34 (in Russian).

YIRGU, G., EBINGER, C.J., MAGUIRE, P.K.H. 2006. The Afar volcanic province within the East African Rift System: Introduction. In: *The Afar Volcanic Province within the East African Rift System.* Geological Society, London, Special Publications, 259, 1-6.

Reviewer: Ph.D. (Physics & mathematics) S.Yu.Sokolov (Geological Institute of RAS)

© А.М.Саламов, В.А.Мамедов, О.Ф.Наджафов, Л.С.Исаева, 2017

СОВРЕМЕННОЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКЗОГЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ оз. МИРЗАЛАДИ (Абшеронский п-ов)

А.М.Саламов, В.А.Мамедов, О.Ф.Наджафов, Л.С.Исаева

Институт геологии и геофизики НАНА
AZ1148, Баку, просп. Г.Джавида, 119

Представлены результаты геоэкологических и геофизических исследований, проведенных в бассейне оз. Мирзалади, расположенного в северо-западной части Абшеронского полуострова. Выявлено, что с увеличением антропогенной нагрузки промышленного и коммунально-бытового характера на водосборе озера активизируется процесс загрязнения водной среды и донных отложений. Методом вертикального электрического зондирования исследован геологический разрез до глубины в 40 м, определены предполагаемые мощность и литологический состав отдельных слоев и разрывных нарушений. Моделированы процессы развития экзогенных явлений в береговой зоне озера.

Введение

Практически начиная со второй половины XIX века с усилением нефтегазодобычи и других отраслей хозяйства, связанных с ней, а также с увеличением населения Абшеронского полуострова поэтапно наравне с другими компонентами природы загрязняются и озера региона. Одним из таких озер является Мирзалади, находящееся в северо-западной части полуострова на высоте около 12 м между поселками Новханы и Бинагади.

Район исследования ограничен возвышенностями: Орджандагской на севере, Сараинской на западе, Кечалдаг-Масазырской на юго-западе, Бинагадинской на юге и Фатмаинской на востоке. Водосбор озера характеризуется холмистым рельефом с чередованием возвышенностей в виде вытянутых увалов и плоских долин. Котловина озера имеет тектоническое происхождение, сформировалась в синклинальной мульде, сложенной преимущественно песчанисто-глинистыми отложениями продуктивной толщи (Ширинов, 1965).

Площадь водосбора оз.Мирзалади составляет приблизительно 12 км^2, водосбор с запада граничит с бассейном оз.Масазыр, с севера – оз.Сианшор, а с юга – оз.Бинагади (рис. 1). Площадь водной поверхности озера составляет около 3,4 км^2, длина – 3,8 км, наибольшая ширина – 1,7 км, длина береговой линии – около 13 км. Озеро Мирзалади бессточное, рапное, мелководное, наибольшая глубина – <1м (Мамедов, 2009).

Территория, окружающая озеро – аридная, здесь доминирует климат умеренно-теплых полупустынь и сухих степей с сухим летом. Годовое количество общей солнечной радиации составляет около 130 ккал/см^2, атмосферных осадков – приблизительно 310 мм, а возможная испаряемость более чем в 3 раза превышает годовое количество атмосферных осадков. Преобладающие направления ветра – северные и северо-западные со средней скоростью 5,8 м/сек, сильные ветра (>15 м/сек) наблюдаются 64 дня в году. Дни со снежным покровом в году составляют около 10 (Hacıev, Rəhimov, 1977).

Развитие экзогенных геологических процессов (ЭГП) на территории населенных пунктов и у берегов озер наносит огромный ущерб природному состоянию земной коры, хозяйству и экономике, а также создает многофакторные экологические проблемы для региона. Оценивание и прогнозирование опасности ЭГП, исходя из геолого-структурного и литологического строения района, а также физических характеристик грунтов на выбранном участке, позволяют провести геофизические исследования, выполненные методом ВЭЗ – вертикального электрического зондирования (рис. 2).

Целью данной работы является оценка современного геоэкологического состояния оз.Мирзалади и моделирование развития ЭГП в береговой зоне путем проведения геофизических исследований.

Материалы и методы исследования. Материалами для данной статьи в основном послужили результаты полевых исследований авторов.



Рис. 1. Вид на оз. Мирзалади с восточного берега

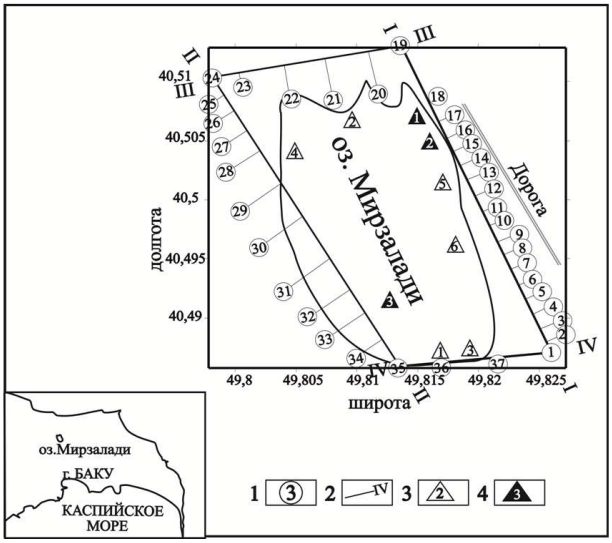


Рис. 2. Схема расположения в акватории оз.Мирзалади геофизических профилей, а также мест отбора проб воды и донных отложений
1 – точки ВЭЗ и их номера; 2 – линии геофизических профилей; 3 – точки отбора проб воды; 4 – точки отбора проб донных отложений

Геофизические работы выполнены методом ВЭЗ с целью более детального литологического расчленения геологического разреза на площади исследования по двум основным и поперечным профилям (рис. 2) в масштабе 1:5000 с помощью четырехэлектродной симметричной установки AMNB с разносами AB/2 = 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10, 10; 12, 12; 14; 16; 18; 20; 22; 24, 24; 26, 26; 28; 30; 32; 34; 36, 36; 38, 38; 40, а также MN/2 = 0,3; 0,3; 0,3; 0,3; 0,3; 0,3; 0,3; 0,3; 0,3; 0,3,1; 0,3,1; 1; 1; 1; 1; 1; 1,2; 1,2; 2; 2; 2; 2; 2,3; 2,3; 2,3; 3 (Попов и др., 1990).

Для измерений использовалась электроразведочная аппаратура ЭРА-МАХ с рабочей частотой 4,88 Гц. Измерительная установка ориентирована по направлению профилей, общая длина которых составляет 8465 погонных метров, координаты точек наблюдения определялись по GPS.

В целях оценки физико-химического состояния вод и донных отложений в 1998-2014 гг. отобрано девять проб: 6 из воды и 3 из поверхностного слоя донных отложений на репрезентативных участках озера. Кроме того, использованы данные химического состава четырех проб воды, полученные в 1993-1995 гг. Министерством экологии и природных ресурсов. В микроэлементном составе донных отложений определены элементы: Li, Rb, Cu, Zn, Cd, Sr, Ba, Ga, Sn, Pb, V, Cr, Mo, Mn, Co, Ni.

В целях оценки роли каждого тяжелого металла (ТМ) в загрязнении донных отложений определены их коэффициенты концентрации (КК).

Анализы проведены по общепринятой методике в соответствующих лабораториях Института геологии и геофизики НАНА. Гидрохимическая классификация вод выполнена по О.А.Алекину (1970).

Результаты и обсуждение

Результаты химических анализов воды и донных отложений показывают, что степень минерализации озерной воды в многолетнем разрезе зависит от сезонов года и объема антропогенного сброса, колеблется от 10 до 450 г/дм^3 и в среднем составляет 100-150 г/дм^3. По гидрохимической классификации О.А.Алекина (1970) вода озера относится к хлоридному и сульфатному классам, натриевой группе, второму типу вод. В процессе уменьшения минерализации вод в отдельные периоды кроме атмосферных осадков немаловажную роль играют неочищенные коммунально-бытовые стоки, поступающие из населенных пунктов (таблица).

В пробах вод количество таких загрязнителей среды, как нефтепродукты колеблется в пределах 0,02-0,38 мг/дм^3 (выше ПДК почти в 8 раз); синтетические поверхностно-активные вещества – 0,064-0,120 мг/дм^3 (около или выше ПДК); фенолы – 0,003-0,040 мг/дм^3 (в 3-40 раз выше ПДК).

Химический состав и степень минерализации вод оз.Мирзалади

№	Дата отбора проб	Катионы, мг/дм^3			Анионы, мг/дм^3			Сумма ионов, г/дм^3	Тип воды
		Ca^{2+}	Mg^{2+}	$N^{+}+K^{+}$	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-		
1	06.1993	484	178	39805	732	2851	59213	109,6	S_{II}^{Na}
2	10.1994	996,3	1198	114123	3350	19201	159211	299,1	Cl_{II}^{Na}
3	05.1995	993,2	1196	115834	3356	19201	160217	300,8	Cl_{II}^{Na}
4	07.1996	440,5	817,4	42091	801,3	20145	4999	114,3	S_{II}^{Na}
5	01.1998	221,0	122,1	168,4	498,3	673,4	4213,2	11,5	Cl_{II}^{Na}
6	11.2014	3,7	10043	159103	19,1	14497	268216	451,9	Cl_{II}^{Na}

Количество растворенного в воде кислорода практически во все сезоны года бывает меньше нормы и колеблется в пределах 2,9-5,9 мг/дм^3, а уровень CO_2 и H_2S часто превышает допустимую норму и составляет соответственно 1,5-30,0 и 0,02-0,05 мг/дм^3. Присутствие в рапе повышенного содержания CO_2 и H_2S, возможно, связано с биохимическими процессами, происходящими в водной среде, или с подпитыванием озера высокоминерализованными водами из глубоких слоев водосбора.

Ежегодно в теплый сезон года под рапой формируется соляная (NaCl) корка толщиной в несколько миллиметров, часть которой собирается для использования в пищевых и технических целях. Под многолетней соляной коркой находятся донные отложения темно-серого цвета. В их минералогическом составе преобладают SiO_2 (24,4%), NaCl (18,6%) и $CaCO_3$ (14,5%). Во всех пробах по определению микроэлементного состава количество кадмия в 1,67-6,7 раза больше его кларка (0,3мг/кг) в осадочных породах. Результаты анализа проб донных отложений, взятых в 2014 году, показаны на рис.3.

Повышенные концентрации Ni, Mo, Pb и Cd в донных отложениях являются дополнительными источниками напряжения геоэкологической ситуации в районе (Мамедов, Алиев, 2005).

В результате проведенных геофизических исследований по удельным электрическим сопротивлениям ($\rho_{у.э.с.}$) были составлены геоэлектрические разрезы, которые затем были преобразованы в литолого-геофизические. Установлено, что $\rho_{у.э.с}$ слоев, слагающих геологическую среду на площади исследования, меняется в интервале от 0,5 до 150 Ом·м, а мощность этих слоев составляет 1,5-35 м. В северо-западной и северо-восточной частях рабочих площадей на поверхность выходят чередующиеся маломощные слои глин и песчаников мощностью 1-8 метров с $\rho_{у.э.с.}$ = 50-150 Ом·м.

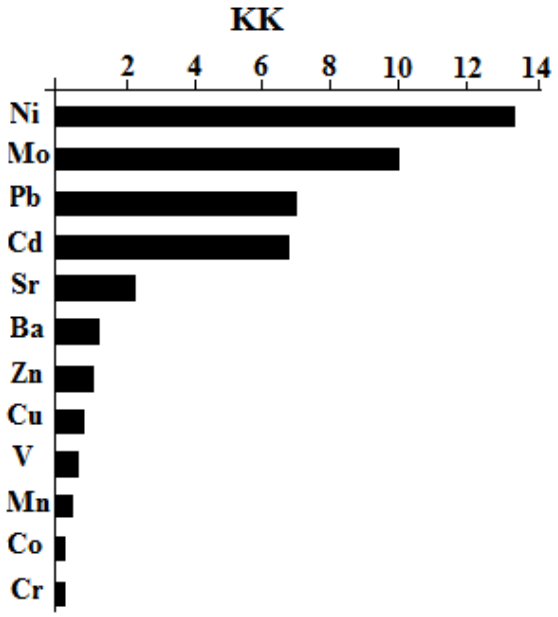


Рис. 3. Значения коэффициента концентрации КК (мг/кг / кларк элемента) микроэлементов в донных отложениях оз. Мирзалади

В результате проведенных исследований были выявлены и трассированы предполагаемые разнонаправленные разрывные нарушения в интервалах ВЭЗ № 10-11, 5-6, 6-7, 3-2, 26-27, 30-31, 33-34,1-37, 20-21 (рис. 4).

Установлено, что оз.Мирзалади расположено на пересечениях разнонаправленных разрывных нарушений.

Выявлено, что на площади исследования верхний слой геологического разреза сложен обломками разных по составу отложений. Мощность этих отложений по территории меняется в интервале 1-9 м, а $\rho_{у.э.с.}$ – от 5 до 20 Ом·м, и они обладают коллекторными свойствами.

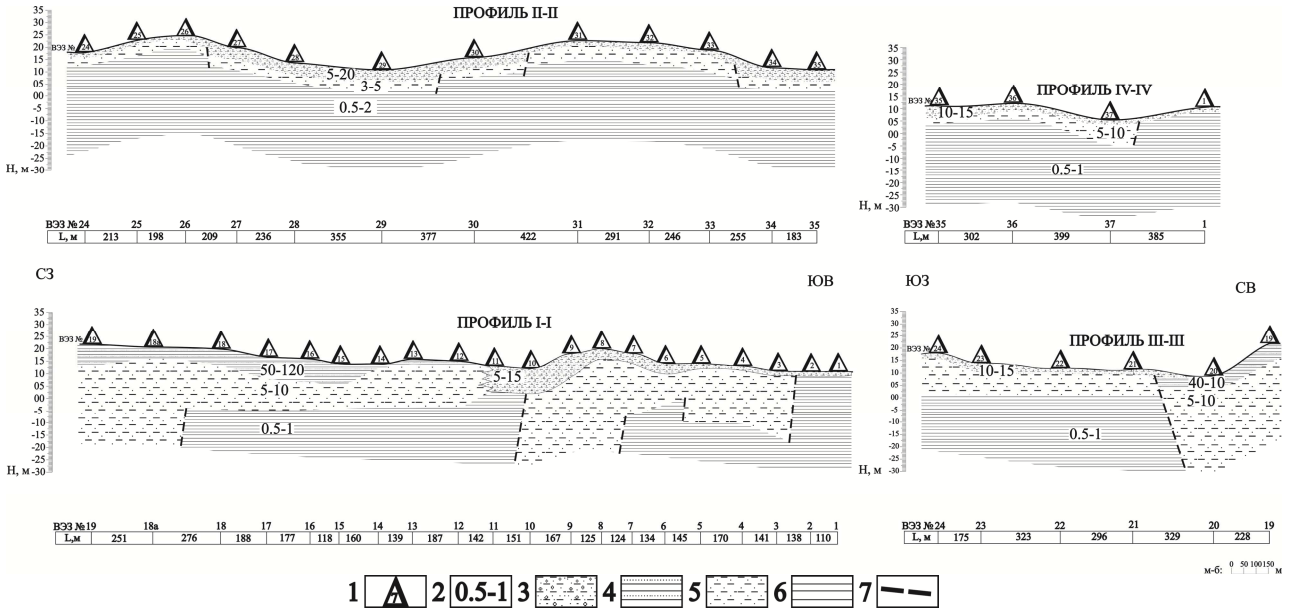


Рис. 4. Предполагаемые литолого-геофизические разрезы по профилям I-I, II-II, III-III и IV-IV
1 – номера точек ВЭЗ; 2 – удельное электрическое сопротивление слоев; 3 – делювиальные отложения; 4 – чередования слоев маломощных глин и песков; 5 – песчанистые глины; 6 – переувлажненные и минерализованные глины; 7 – предполагаемые разрывные нарушения, выявленные по данным геофизических исследований

По физическим параметрам пород, слагающих верхний слой территории исследования, были выделены участки и построены карты распространения предполагаемых изомощностей, а также плотностей пород в естественном состоянии и расположенных под водой. Эти участки наиболее склонны к развитию ЭГП (рис. 5, 6, 7).

В северо-восточной части площади исследований мощность пород, которые предположительно склонны к развитию ЭГП, составляет 9 м, а в восточной и юго-восточной частях она уменьшается до 2-3 м.

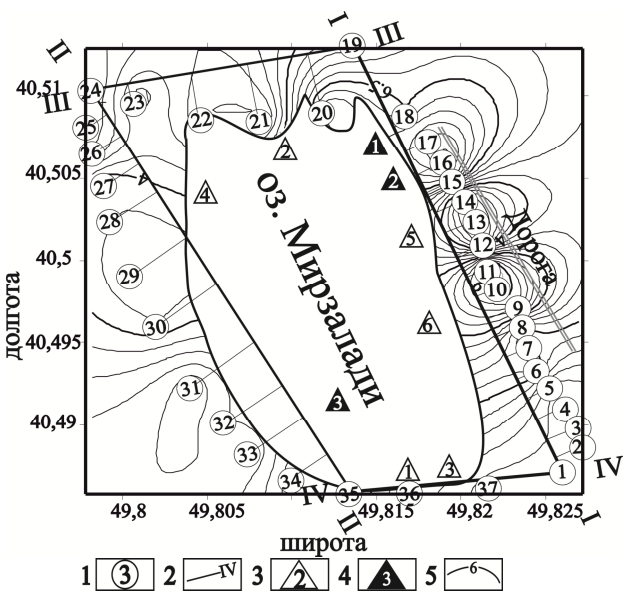


Рис. 5. 2D модель изомощностей пород, подверженных развитию ЭГП (м)
1 – точки ВЭЗ и их номера; 2 – линии геофизических профилей; 3 – точки отбора проб воды; 4 – точки отбора проб донных отложений; 5 – изолинии изомощностей пород

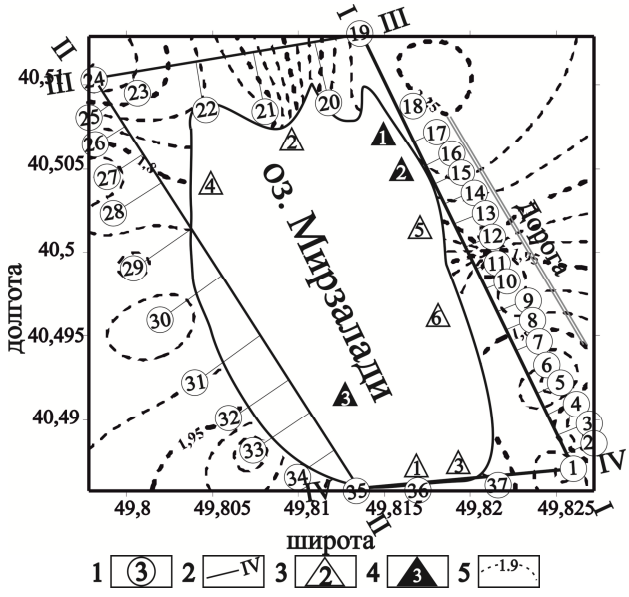


Рис. 6. 2D модель плотностей пород, подверженных развитию ЭГП (т/м^3)
1 – точки ВЭЗ и их номера; 2 – линии геофизических профилей; 3 – точки отбора проб воды; 4 – точки отбора проб донных отложений; 5 – изолинии плотностей пород

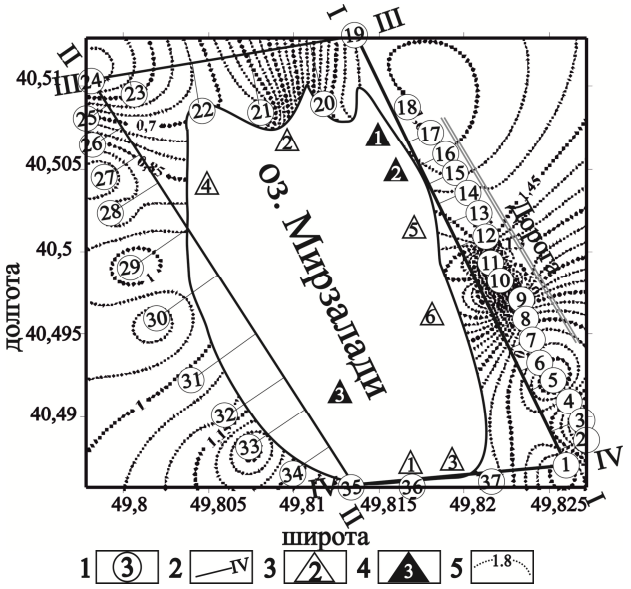


Рис.7. 2D модель плотностей пород, расположенных под водой и подверженных развитию ЭГП (т/м^3)
1 – точки ВЭЗ и их номера; 2 – линии геофизических профилей; 3 – точки отбора проб воды; 4 – точки отбора проб донных отложений; 5 – изолинии плотностей пород под водой

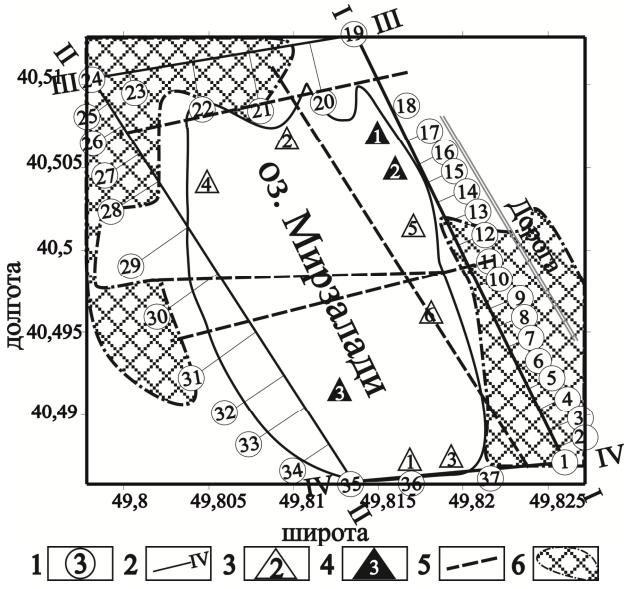


Рис. 8. Результативная карта геофизических исследований
1 – точки ВЭЗ и их номера; 2 – линии геофизических профилей; 3 – точки отбора проб воды; 4 – точки отбора проб донных отложений; 5 – предполагаемые разрывные нарушения, выявленные геофизическими исследованиями; 6 – прогнозируемые участки развития ЭГП в акватории оз.Мирзалади

По площади исследования предполагаемая плотность пород, указывающая на развитие ЭГП, меняется в интервале от 1,6 до 2,3 т/м^3 (рис. 6).

В юго-восточной и северо-западной частях площади исследования плотность пород, слагающих геологическую среду, меняется в интервале 1,6-1,8, а на северо-востоке и юго-западе – увеличивается до 2-2,3 т/м^3.

Предполагаемая плотность пород, распространенных под водой и склонных к развитию ЭГП, колеблется от 0,4 до 1,8 т/м^3 (рис. 6). В северо-западной и юго-восточной ее частях эта величина меняется в интервале 0,4-0,9 т/м^3, а в северо-восточной и юго-западной – увеличивается до 1,2-1,8 т/м^3.

Сравнивая карты предполагаемых изомощностей, а также плотностей пород в естественном состоянии и расположенных под водой, выявлено, что на площади исследования в юго-восточном и северо-западном направлениях мощность, плотность пород и плотность пород, распространенных под водой, уменьшаются (рис.5,6,7).

Учитывая полученные результаты геофизических исследований, предполагается развитие ЭГП в юго-восточной и северо-западной частях акватории оз.Мирзалади (рис. 8).

Принимая во внимание горизонтальную складчатость слоев, предполагается в основном развитие процессов оседания и образования псевдокарстов вокруг оз.Мирзалади.

Выводы:

– обогащение водной среды и донных отложений разнохарактерными загрязнителями (нефтепродукты, синтетические поверхностные активные вещества, фенолы, ТМ и др.) осложняет геоэкологическое состояние озера и его водосбора;

– в районах пересечения предполагаемых разнонаправленных разрывных нарушений (в северо-западной и юго-восточной частях акватории оз.Мирзалади) ожидается развитие ЭГП;

– геологический разрез площади исследования сложен в верхней части наносами, чередованием маломощных глин с песками, песчанистыми глинами, высокоминерализованными и увлажненными глинами;

– в литолого-геофизических разрезах с увеличением глубины наблюдается повышение естественной влажности и минерализации пород;

– смоделирован процесс развития ЭГП в береговой зоне оз.Мирзалади.

В результате проведенных комплексных исследований рекомендуется проведение мониторинга за геоэкологическими, а также экзогенными процессами, происходящими на водосборной площади оз.Мирзалади.

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Фонда развития науки при Президенте Азербайджанской Республики (Грант № EIF-2013-9(15)-46/25/2).

ЛИТЕРАТУРА

АЛЕКИН, О.А. 1970. Основы гидрохимии. Гидрометеоиздат. Ленинград. 444.

МАМЕДОВ, В.А. 2009. Экогеографические проблемы озер аридных зон Азербайджана. *Известия ДГПУ РФ, естественные и точные науки*, Махачкала, 2, 104-109.

МАМЕДОВ, В.А., АЛИЕВ, Г.И. 2005. Микроэлементы в водной среде озер Абшеронского полуострова и их роль в загрязнении окружающей среды. *Известия НАНА. Науки о земле*, 2, 119-125.

ПОПОВ, Е.А., ТЕН, К.М., ФУНТИКОВ, Г.Н. и др. 1990. Методические рекомендации по использованию ВЭЗ для детального расчленения разреза при решении геологических и инженерно-геологических задач. Ротапринт. Москва. 52 с.

ШИРИНОВ, Н.Ш. 1965. Геоморфология Апшеронской нефтеносной области. Изд. АН Азерб. ССР. Баку. 188 с.

HACIYEV, Q.Ə., RƏHİMOV, B.Ə. 1977. Azərbaycan SSR inzibati rayonlarının iqlim səciyyəsi. Elm. Bakı. 270 s.

Рецензент: академик Р.М.Мамедов

© Б.А.Сулейманов, Х.А.Фейзуллаев, 2017

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ВОДОПРИТОКОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЗОНАЛЬНО-НЕОДНОРОДНЫХ НЕФТЯНЫХ ПЛАСТОВ

Б.А.Сулейманов, Х.А.Фейзуллаев

НИПИ "Нефтегаз" SOCAR,
Az1012, Баку, пр-т Г.Зардаби, 88а
E-mail: Baghir.Syleymanov@sokar.az

Предложена математическая модель изоляции водопритока в однородном и зонально-неоднородном горизонтальном пласте в процессе двухфазной трехкомпонентной фильтрации флюидов с учетом капиллярных явлений, степени изоляции (фактора остаточного сопротивления) и глубины проникновения изолирующего агента. Модель позволяет выбрать как наилучший момент воздействия на залежь, так и необходимую степень изоляции.

Введение

Низкий коэффициент извлечения нефти является основной проблемой при разработке нефтяных месторождений. При этом практика разработки нефтяных месторождений показывает, что высокие темпы добычи нефти в неоднородных коллекторах приводят к быстрому прорыву закачиваемых вод и обводнению добываемой продукции. Учитывая, что низкий уровень цен на нефть не позволяет реализовать дорогостоящие проекты по увеличению нефтеотдачи, возникает задача ограничения водопритока путем обработки нефтедобывающих скважин. Существует достаточно широкий круг методов, позволяющих решать указанную задачу путем применения тампонажных растворов, осадкообразующих реагентов, гелей, модификаторов смачиваемости, ICD устройств и т.д. (Dai et al., 2014; Sengupta et al., 2012; Seright, Liang, 1995; Fulleylove et al., 1996; Sydansk, Seright, 2006; Aboukshem et al., 2008; Девятов и др., 1995).

В ряде работ (Девятов и др., 1995; Ентов, Турецкая, 1995; Куликов и др., 2004; Seright, 1988; Seright, 1995; Surguchev, 1998) приведены важные с практической точки зрения результаты математического моделирования ограничения водопритока изолирующими композициями. Однако остаются нерешенными главные проблемы: выбор оптимального момента изоляции с учетом обводненности продукции; определение влияния степени изоляции (фактора остаточного сопротивления), глубины проникновения водоизолирующей композиции и продолжительности эффекта изоляции (или времени вымывания композиции из пласта), а также учета капиллярных эффектов на нефтеотдачу пластов. Следует отметить, что необходимость моделирования изоляции водопритока вызвана тем, что в гидродинамических симуляторах оно непосредственным образом не выполняется (Ентов, Турецкая, 1995).

Анализ литературы показывает, что в более чем 70% случаев изоляция водопритоков производится различными модификациями гелевых технологий. В связи с этим построение математической модели и исследование изолирующей способности гелей с учетом реальных условий их работы представляет как научный, так и практический интерес.

Постановка задачи и математическая модель

Рассматривается двумерная задача вытеснения нефти водой из горизонтального зонально-неоднородного по проницаемости пласта (рис.1). Принимаем, что в пласте размещены добывающие и нагнетательные скважины. Предполагается, что внешние границы пласта непроницаемы. В нагнетательных скважинах задано количество закачиваемой воды, а в добывающих скважинах – суммарный дебит нефтяной и водной фазы.

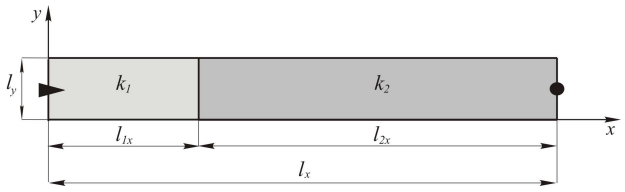


Рис. 1. Схема распределения параметров в зонально-неоднородном пласте

Процесс вытеснения и последующая изоляция водопритока в рамках двухфазной и трехкомпонентной (вода, нефть, гель) фильтрации с учетом источников и стоков описывается системой уравнений (Ентов, Турецкая, 1995; Куликов и др., 2004; Азиз, Сеттари, 1982):

$$\frac{\partial ms}{\partial t} + div\, V_в = \sum_{\nu=1}^{m_1} Q^н_{в\nu}(t)\delta(x - x^н_\nu,\, y - y^н_\nu) + \sum_{e=1}^{m_2} Q^э_{вe}(t)\delta(x - x^э_e,\, y - y^э_e), \quad (1)$$

$$\frac{\partial m(1-s)}{\partial t} + div\, V_н = \sum_{e=1}^{m_2} Q^э_{нe}(t)\delta(x - x^э_e,\, y - y^э_e),$$

$$Q^э_{нe}(t) = \begin{cases} Q^о_{нe}(t), & t < T \\ Q^э_{нe}(t), & t \ge T \end{cases}, \quad (2)$$

уравнением баланса водоизолирующего геля в суммарном потоке фаз

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[msc + m(1-s)\varphi(c) + a(s,c)\right] + div(cV_в + \varphi(c)V_н) = \sum_{e=1}^{m_2} (cQ^э_{вe}(t) + \varphi(c)Q^э_{нe}(t))\delta(x - x^э_e,\, y - y^э_e) + div\left[D(s,c)grad\, c\right],$$

$$c(x,y,t) = \begin{cases} 0, & t < T \\ c_*(x,y,t), & t \ge T \end{cases} \begin{array}{l} \text{, до начала изоляции} \\ \text{, после начала изоляции} \end{array} \quad (3)$$

скоростью движения фаз

$$V_в = -\frac{kf_в(s,c)}{\mu_в(p,c)} gradp_в,$$

$$V_н = -\frac{kf_н(s,c)}{\mu_н(p,c)} gradp_н, \quad (4)$$

уравнением капиллярного равновесия

$$p_н - p_в = p_k(s,c), \quad (5)$$

здесь t – время; Т – время, которое проходит с начала закачки воды до ее прорыва в эксплуатационную скважину; x и y – координаты; m – пористость; s – водонасыщенность; $V_в$ и $V_н$ – скорости фильтрации водной и нефтяной фаз; c и $\varphi(c)$ – объемные концентрации геля в водной и нефтяной фазах; $a(s,c)$ – количество (объем) геля, сорбированного в единице объема пористой среды; m_1 и m_2 – количество нагнетательных и добывающих скважин соответственно; $(x^н_\nu, y^н_\nu)$ и $(x^э_e, y^э_e)$ – координаты нагнетательных и эксплуатационных скважин; $Q^н_{в\nu}(t)$ – объемный расход воды на единицу толщины пласта ν-ой нагнетательной скважины; $Q^э_{вe}(t)$ и $Q^э_{нe}(t)$ – объемные дебиты на единицу толщины пласта e-ой добывающей скважины по водной и нефтяной фазам; $Q^э_{нe}(t)$ – объем закачки водоизолирующего агента на единицу толщины пласта e-ой добывающей скважины в единицу времени; $D(s,c) = (D_x(s,c), D_y(s,c))$ – вектор эффективных коэффициентов диффузии тампонирующего материала; k – абсолютная проницаемость пористой среды; $f_в(s,c)$ и $f_н(s,c)$ – относительные фазовые проницаемости водной и нефтяной фаз; $\mu_в(p,c), \mu_н(p,c)$ – вязкости водной и нефтяной фаз; $p_в$, $p_н$ – давления в водной и нефтяных фазах; $p_k(s,c)$ – капиллярное давление.

Начальные и граничные условия:

$$s(x,y,t)\big|_{t=0} = s_0(x,y), \quad c(x,y,t)\big|_{t=0} = c_0(x,y), \quad (0 \le x \le l_x;\ 0 \le y \le l_y), \quad (6)$$

$$\frac{\partial p_в}{\partial x}\Big|_{x=0,l_x} = 0,\ \frac{\partial p_н}{\partial x}\Big|_{x=0,l_x} = 0,\ \frac{\partial c}{\partial x}\Big|_{x=0,l_x} = 0,\ 0 \le y \le l_y,$$

$$\frac{\partial p_в}{\partial y}\Big|_{y=0,l_y} = 0,\ \frac{\partial p_н}{\partial y}\Big|_{y=0,l_y} = 0,\ \frac{\partial c}{\partial y}\Big|_{y=0,l_y} = 0,\ 0 \le x \le l_x. \quad (7)$$

где l_x и l_y – соответственно длина и ширина пласта.

Неизвестными в системе уравнений (1)-(7) являются водонасыщенность s, концентрация геля в водной фазе c и давление p.

Для решения гидродинамической задачи (1)-(7) был применен метод сеток (Азиз, Сетта-

ри, 1982). При этом использована схема, “неявная по давлению и концентрации геля в водной фазе и явная по водонасыщенности”. Разностная система уравнений для определения давления и концентрации геля в водной фазе была решена с помощью итерационных поточечных методов Якоби, а по водонасыщенности – методов Эйлера (Азиз, Сеттари, 1982).

Численные расчеты

С целью выявления возможности увеличения нефтеотдачи путем изоляции водопритока в добывающей скважине были проведены численные расчеты. В расчетах рассматривался горизонтальный зонально-неоднородный пласт. Принималось, что в пласте размещены добывающая и нагнетательная скважины, расположенные согласно рис.1. Вытеснение нефти осуществляется закачкой воды при постоянном перепаде давления 2,4 *МПа* (рис.1). Степень изоляции (фактор остаточного сопротивления) определялась как отношение фазовой проницаемости по воде до и после изоляции водопритока:

$$k_{из} = \frac{f_в(s,c)}{f_{вп}(s,c)},$$

где $k_{из}$ – коэффициент изоляции (фактор остаточного сопротивления); $f_в(s,c)$ – относительные фазовые проницаемости воды до изоляции; $f_{вп}(s,c)$ – относительные фазовые проницаемости воды после изоляции.

Расчет проведен при следующих значениях определяющих параметров (Sengupta et al., 2012):

$$l_x = 500\,м;\ l_y = 500\,м;\ Q^н_{вн}(t) = 320\,\frac{м^3}{сут.};$$

$$k_1 = (0.05 \div 1)\cdot 10^{-12}\ м^2;\quad k_2 = (0.05 \div 1)\cdot 10^{-12} м^2;$$

$$s_0(x,y) = 0.2;\quad c_0(x,y) = 0;\ a(s,c) = 0;\ \varphi(c) = c/2;$$

$$\mu_в(p,c) = 1 + 0.55c - 0.3c^2\,(мПа\cdot с);$$

$$\mu_н(p,c) = 14.6 - 14.7c + 5.5c^2\,(мПа\cdot с);$$

$$f_в(s,c) = \begin{cases} 0, & s \le 0.2 \\ \left(\dfrac{s-0.2}{0.81}\right)^3, & 0.2 \le s \le 1 \end{cases};$$

$$f_н(s,c) = \begin{cases} \left[\left(\dfrac{0.83-s}{0.834}\right)^3 - \left(\dfrac{0.74-s}{0.715}\right)^3\right]c + \left(\dfrac{0.74-s}{0.74}\right)^3, & 0 \le s \le 0.74 \\ \left(\dfrac{0.83-s}{0.834}\right)^3 c, & 0.74 \le s \le 0.83 \\ 0, & s \ge 0.83 \end{cases}$$

$$p_k(s,c) = П \cdot J(s);$$

$$J(s) = \frac{0.2(0.9-s)}{(1.2-s)^2(2s-s^2)};$$

$$D(s,c) = D_0 \cdot (2-s),\quad П = 10^5\,Па,$$
$$D_0 = 10^{-5}\,м^2/с;\quad h_x = h_y = 20м;$$
$$c(x^э_e, y^э_e, T) = 0.05.$$

Расчеты проводились для двух вариантов разработки:

Базовый вариант. Зонально-неоднородный (с различным отношением проницаемостей и длин зон) пласт разрабатывается в режиме вытеснения водой.

Вариант с изоляцией водопритока. Нефтяной пласт разрабатывается в режиме вытеснения водой. После прорыва воды при различных уровнях обводненности продукции осуществляется ограничение водопритока с различной степенью изоляции. Изоляция осуществляется путем закачки в пласт водоизолирующего агента объемом 60 м^3 (Старковский А., Старковский В., 2009; Старковский, 2013). Рассмотрены пласты: однородный (различной проницаемости) и зонально-неоднородный с различным отношением проницаемостей ($k_1/k_2 = 0.05-20$) и длин зон нагнетания и отбора ($l_{1x}/l_x = 0.25-1$). Процесс ограничения притока воды осуществлялся при следующей обводненности продукции: 38% (сразу после прорыва воды), 50% (средняя обводненность), 96% (высокая обводненность). Рассмотрены следующие степени изоляции (фактор остаточного сопротивления): 30, 60, 90.

Результаты расчетов представлены в таблицах 1-5.

Таблица 1

Результаты расчетов для зонально-неоднородного пласта при $l_{1x} = 0{,}25 l_x$

Обводнённость, %	$k_1/k_2 = 0{,}05$					$k_1/k_2 = 0{,}5$					$k_1/k_2 = 2$					$k_1/k_2 = 20$				
	Глубина проникновения, м	Время вымывания, сут.	КИН (степень изоляции)			Глубина проникновения, м	Время вымывания, сут	КИН (степень изоляции)			Глубина проникновения, м	Время вымывания, сут.	КИН (степень изоляции)			Глубина проникновения, м	Время вымывания, сут.	КИН (степень изоляции)		
			Базовый вариант	Вариант с изоляцией	Эффект от изоляции			Базовый вариант	Вариант с изоляцией	Эффект от изоляции			Базовый вариант	Вариант с изоляцией	Эффект от изоляции			Базовый вариант	Вариант с изоляцией	Эффект от изоляции
96	241	72	0,552	0,612 (30)	0,060	235	109	0,493	0,601 (30)	0,108	230	176	0,403	0,579 (30)	0,176	147	243	0,281	0,540 (30)	0,259
		98		0,634 (60)	0,082		115		0,613 (60)	0,120		188		0,596 (60)	0,193		268		0,565 (60)	0,284
		112		0,638 (90)	0,086		128		0,616 (90)	0,123		203		0,605 (90)	0,202		285		0,578 (90)	0,297
50	244	109	0,474	0,595 (30)	0,121	240	184	0,351	0,561 (30)	0,210	236	245	0,269	0,534 (30)	0,265	158	301	0,155	0,499 (30)	0,344
		131		0,614 (60)	0,140		201		0,583 (60)	0,232		271		0,562 (60)	0,293		324		0,533 (60)	0,378
		143		0,620 (90)	0,146		223		0,593 (90)	0,242		290		0,575 (90)	0,306		338		0,549 (90)	0,394
38	250	115	0,453	0,591 (30)	0,138	247	214	0,328	0,555 (30)	0,227	244	259	0,250	0,527 (30)	0,277	185	314	0,143	0,493 (30)	0,350
		140		0,609 (60)	0,156		238		0,577 (60)	0,249		282		0,555 (60)	0,305		342		0,528 (60)	0,385
		152		0,616 (90)	0,163		250		0,588 (90)	0,260		296		0,569 (90)	0,319		357		0,545 (90)	0,402

Таблица 2

Результаты расчетов для зонально-неоднородного пласта при $l_{1x} = 0{,}5 l_x$

Обводнённость, %	$k_1/k_2 = 0{,}05$					$k_1/k_2 = 0{,}5$					$k_1/k_2 = 2$					$k_1/k_2 = 20$				
	Глубина проникновения, м	Время вымывания, сут.	КИН (степень изоляции)			Глубина проникновения, м	Время вымывания, сут	КИН (степень изоляции)			Глубина проникновения, м	Время вымывания, сут.	КИН (степень изоляции)			Глубина проникновения, м	Время вымывания, сут.	КИН (степень изоляции)		
			Базовый вариант	Вариант с изоляцией	Эффект от изоляции			Базовый вариант	Вариант с изоляцией	Эффект от изоляции			Базовый вариант	Вариант с изоляцией	Эффект от изоляции			Базовый вариант	Вариант с изоляцией	Эффект от изоляции
96	241	86	0,529	0,610 (30)	0,081	235	114	0,489	0,597 (30)	0,108	230	165	0,429	0,582 (30)	0,153	147	229	0,348	0,556 (30)	0,208
		110		0,625 (60)	0,096		132		0,610 (60)	0,121		178		0,599 (60)	0,170		254		0,578 (60)	0,230
		126		0,630 (90)	0,101		143		0,614 (90)	0,125		192		0,607 (90)	0,178		266		0,589 (90)	0,241
50	244	119	0,422	0,580 (30)	0,158	240	190	0,339	0,557 (30)	0,218	236	239	0,284	0,539 (30)	0,255	158	281	0,208	0,515 (30)	0,307
		142		0,600 (60)	0,178		212		0,579 (60)	0,240		274		0,565 (60)	0,281		302		0,546 (60)	0,338
		154		0,608 (90)	0,186		234		0,590 (90)	0,251		293		0,578 (90)			314		0,560 (90)	0,352
38	250	124	0,398	0,575 (30)	0,177	247	217	0,314	0,550 (30)	0,236	244	252	0,262	0,531 (30)	0,269	185	303	0,191	0,509 (30)	0,318
		153		0,595 (60)	0,197		243		0,573 (60)	0,259		273		0,558 (60)	0,296		328		0,540 (60)	0,349
		164		0,604 (90)	0,206		259		0,584 (90)	0,270		291		0,572 (90)	0,310		342		0,556 (90)	0,365

Таблица 3

Результаты расчетов для зонально-неоднородного пласта при $l_{1x} = 0{,}75 l_x$

Обводнённость, %	$k_1 / k_2 = 0{,}05$					$k_1 / k_2 = 0{,}5$					$k_1 / k_2 = 2$					$k_1 / k_2 = 20$				
	Глубина проникновения, м	Время вымывания, сут.	КИН (степень изоляции)			Глубина проникновения, м	Время вымывания, сут	КИН (степень изоляции)			Глубина проникновения, м	Время вымывания, сут.	КИН (степень изоляции)			Глубина проникновения, м	Время вымывания, сут.	КИН (степень изоляции)		
			Базовый вариант	Вариант с изоляцией	Эффект от изоляции			Базовый вариант	Вариант с изоляцией	Эффект от изоляции			Базовый вариант	Вариант с изоляцией	Эффект от изоляции			Базовый вариант	Вариант с изоляцией	Эффект от изоляции
96	126	86 112 125	0,506	0,607 (30) 0,616 (60) 0,622 (90)	0,101 0,110 0,116	123	112 132 144	0,486	0,592 (30) 0,607 (60) 0,613 (90)	0,106 0,121 0,127	120	161 172 183	0,455	0,586 (30) 0,601 (60) 0,609 (90)	0,131 0,146 0,154	114	198 225 234	0,415	0,573 (30) 0,591 (60) 0,600 (90)	0,158 0,176 0,185
50	129	124 149 161	0,370	0,566 (30) 0,587 (60) 0,597 (90)	0,196 0,217 0,227	125	185 211 232	0,327	0,552 (30) 0,576 (60) 0,586 (90)	0,225 0,249 0,259	122	231 259 273	0,3	0,543 (30) 0,569 (60) 0,580 (90)	0,243 0,269 0,280	117	274 296 314	0,261	0,532 (30) 0,559 (60) 0,572 (90)	0,271 0,298 0,311
38	132	132 156 166	0,344	0,558 (30) 0,581 (60) 0,591 (90)	0,214 0,237 0,247	127	217 241 254	0,301	0,545 (30) 0,569 (60) 0,581 (90)	0,244 0,268 0,280	125	246 265 282	0,274	0,536 (30) 0,562 (60) 0,574 (90)	0,262 0,288 0,300	119	298 319 341	0,239	0,524 (30) 0,553 (60) 0,566 (90)	0,285 0,314 0,327

Таблица 4

Результаты расчетов для зонально-неоднородного пласта при $l_{1x} = 0{,}9\,l_x$

Обводнённость, %	$k_1/k_2 = 0{,}05$					$k_1/k_2 = 0{,}5$					$k_1/k_2 = 2$					$k_1/k_2 = 20$				
	Глубина проникновения, м	Время вымывания, сут.	КИН (степень изоляции)			Глубина проникновения, м	Время вымывания, сут	КИН (степень изоляции)			Глубина проникновения, м	Время вымывания, сут.	КИН (степень изоляции)			Глубина проникновения, м	Время вымывания, сут.	КИН (степень изоляции)		
			Базовый вариант	Вариант с изоляцией	Эффект от изоляции			Базовый вариант	Вариант с изоляцией	Эффект от изоляции			Базовый вариант	Вариант с изоляцией	Эффект от изоляции			Базовый вариант	Вариант с изоляцией	Эффект от изоляции
96	89	101 129 142	0,493	0,606 (30) 0,611 (60) 0,617 (90)	0,113 0,118 0,124	85	105 138 154	0,484	0,591 (30) 0,605 (60) 0,612 (90)	0,107 0,121 0,128	81	121 149 168	0,471	0,588 (30) 0,603 (60) 0,610 (90)	0,117 0,132 0,139	76	165 178 201	0,417	0,582 (30) 0,599 (60) 0,607 (90)	0,165 0,182 0,190
50	96	144 168 185	0,338	0,567 (30) 0,578 (60) 0,590 (90)	0,229 0,240 0,252	91	151 187 201	0,320	0,550 (30) 0,573 (60) 0,584 (90)	0,230 0,253 0,264	86	164 199 213	0,310	0,546 (30) 0,571 (60) 0,582 (90)	0,236 0,261 0,272	82	193 211 225	0,293	0,541 (30) 0,567 (60) 0,578 (90)	0,248 0,274 0,285
38	103	149 172 194	0,311	0,549 (30) 0,573 (60) 0,584 (90)	0,238 0,262 0,273	96	158 191 203	0,293	0,542 (30) 0,567 (60) 0,578 (90)	0,249 0,274 0,293	92	173 217 235	0,282	0,538 (30) 0,564 (60) 0,576 (90)	0,256 0,282 0,294	88	196 231 249	0,267	0,534 (30) 0,560 (60) 0,573 (90)	0,267 0,293 0,306

Таблица 5

Результаты расчетов для однородного пласта

Обводнённость, %	$k = 0{,}05$ мкм^2					$k = 1$ мкм^2					$k = 2$ мкм^2				
	Глубина проникновения, м	Время вымывания, сут.	КИН (степень изоляции)			Глубина проникновения, м	Время вымывания, сут	КИН (степень изоляции)			Глубина проникновения, м	Время вымывания, сут.	КИН (степень изоляции)		
			Базовый вариант	Вариант с изоляцией	Эффект от изоляции			Базовый вариант	Вариант с изоляцией	Эффект от изоляции			Базовый вариант	Вариант с изоляцией	Эффект от изоляции
96	143	128 139 147	0,484	0,605 (30) 0,607 (60) 0,614 (90)	0,121 0,123 0,130	234	95 112 125	0,482	0,589 (30) 0,604 (60) 0,611 (90)	0,107 0,122 0,129	251	74 93 101	0,479	0,585 (30) 0,601 (60) 0,609 (90)	0,106 0,122 0,130
50	154	201 219 232	0,318	0,551 (30) 0,573 (60) 0,585 (90)	0,233 0,255 0,267	238	176 186 194	0,315	0,548 (30) 0,572 (60) 0,583 (90)	0,233 0,257 0,268	261	126 132 148	0,312	0,545 (30) 0,569 (60) 0,581 (90)	0,233 0,257 0,269
38	179	234 258 271	0,290	0,542 (30) 0,567 (60) 0,579 (90)	0,252 0,277 0,289	246	215 231 242	0,287	0,540 (30) 0,565 (60) 0,577 (90)	0,253 0,278 0,290	274	161 172 183	0,285	0,536 (30) 0,562 (60) 0,575 (90)	0,251 0,277 0,290

В первую очередь, следует отметить, что **при реализации базового варианта** коэффициент извлечения нефти (КИН) существенно зависит от отношения проницаемостей зоны нагнетания и отбора, причем КИН выше при $\kappa_1<\kappa_2$, что согласуется с результатами работ (Косяков, Родионов, 2010; Косяков, Родионов, 2012; Соляной и др., 2012). В указанных работах получен комплексный критерий эффективности взаимного расположения скважин. В случае, когда вязкость нефти больше вязкости воды он определяется по формуле $k=k_1m_1h_1^2/k_2m_2h_2^2<1$ (Косяков, Родионов, 2012; Соляной и др., 2012). Вместе с тем можно предложить следующий физический механизм протекания процесса. Действительно, пористую среду можно заменить капилляром равной пропускной способности, тогда получим систему из двух капилляров различного диаметра, при этом в случае $k_1<k_2$ будет иметь место расширение потока (эффект диффузора), а в обратном случае – сужение потока (эффект конфузора) (Корганов, Мирзаджанзаде, 1952; Сулейманов, Эфендиева, 2004). Согласно (Сулейманов, Эфендиева, 2004), при расширении потока, вызванном переходом от низкой проницаемости к высокой, местные сопротивления выше, чем при обратном случае, а это при прочих равных условиях способствует снижению скорости движения фронта вытеснения и увеличению КИН при $k_1<k_2$ (эффект диффузора).

Численная реализация **варианта с изоляцией водопритока** позволила выявить следующие основные закономерности (см. табл. 1-5). Степень изоляции водопритока существенно влияет на эффективность процесса, причем на любом этапе разработки месторождения (при различной обводненности продукции и различных значениях параметров k_1/k_2, l_{1x}/l_x) регулированием степени изоляции можно добиться существенного увеличения КИН. Эффект от изоляции (разность значений КИН по базовому варианту и варианту с изоляцией) значительно выше при осуществлении процесса при низкой обводненности (сразу после прорыва воды). Во всех рассмотренных случаях эффект от изоляции при $k_1>k_2$ всегда выше, чем при $k_1<k_2$, а конечный КИН всегда выше в противоположном случае. Указанный эффект связан с тем, что глубина проникновения изолирующего агента, время его вымывания существенно зависят от проницаемости зоны отбора.

Выводы

- Предложена математическая модель изоляции водопритока в однородном и зонально-неоднородном горизонтальном пластах в процессе двухфазной трехкомпонентной фильтрации флюидов с учетом капиллярных явлений, степени изоляции и глубины проникновения изолирующего агента;
- Степень изоляции водопритока существенно влияет на эффективность указанного процесса, причем на любом этапе разработки месторождения регулированием степени изоляции можно добиться значительного увеличения КИН;
- Глубина проникновения изолирующего агента, время его вымывания существенно зависят от проницаемости зоны отбора, что и обеспечивает высокую эффективность изоляции при $k_1>k_2$;
- Предложенная модель позволяет выбрать как наилучший момент воздействия на залежь, так и необходимую степень изоляции (фактор остаточного сопротивления).

ЛИТЕРАТУРА

АЗИЗ, Х., СЕТТАРИ, Э. 1982. Математическое моделирование пластовых систем. Недра. Москва.

ДЕВЯТОВ, В.В., АЛМАЕВ, Р.Х., ПАСТУХ, П.И., САНКИН, В.М. 1995. Применение водоизолирующих химреагентов на обводненных месторождениях Шаимского района. ВНИИОЭНГ. Москва.

ЕНТОВ, В.М., ТУРЕЦКАЯ, Ф.Д. 1995. Гидродинамическое моделирование разработки неоднородных нефтяных пластов. *Механика жидкости и газа,* 6, 87-93.

КОРГАНОВ, И.И., МИРЗАДЖАНЗАДЕ, А.Х. 1952. Соотношение между фильтрацией жидкости из пласта в скважину и инфильтрацией в пласт. *Доклады АН Азербайджанской ССР,* 8(2), 63-69.

КОСЯКОВ, В.П., РОДИОНОВ, С.П. 2010. Получение точных решений задачи Бакли-Леверетта в зонально-неоднородном пласте с учетом теплофизических свойств на основе аналитического решения. *Вестник ТюмГУ,* 6, 36-42.

КОСЯКОВ, В.П., РОДИОНОВ, С.П. 2012. Определение наилучшего варианта расстановки галереи скважин в зонально-неоднородном пласте с учетом теплофизических свойств на основе аналитического решения. *Вестник ТюмГУ,* 4, 14-21.

КУЛИКОВ, А.Н., СТРОГАНОВ, В.М., СТРОГАНОВ, А.М. и др. 2004. Обобщение результатов селективной изоляции водопритоков с использованием кремнийорганиче-

ских тампонажных материалов АКОР на месторождениях ОАО "Юганскнефтегаз". *Интервал*, 9.

СОЛЯНОЙ, П.Н., ПИЧУГИН, О.Н., РОДИОНОВ, С.П., КОСЯКОВ, В.П. 2012. Исследование эффективности взаимного расположения нагнетательных и добывающих скважин в зонально-неоднородном нефтяном пласте. *Нефтяное хозяйство*, 8, 126-128.

СТАРКОВСКИЙ, А.В., СТАРКОВСКИЙ, В.А. 2009. Последовательная обработка скважины щелочными силикатными гелями как способ повышения нефтеотдачи. *Нефтяное Хозяйство,* 7, 105-107.

СТАРКОВСКИЙ, В.А. 2013. Обоснование технологии селективной изоляции притока воды в добывающих скважинах на нефтяных месторождениях композициями на основе щелочных силикатных гелей. Автореферат дис.…канд.тех.наук. ОАО “ВНИИнефть”. 25с.

СУЛЕЙМАНОВ, Б.А., ЭФЕНДИЕВА, А.А. 2004. О фильтрации и инфильтрации в зонально-неоднородной пористой среде. *Инженерно-физический журнал,* 77(6), 120-123.

ABOUKSHEM, A.A., AL KATHEERI, A.B., KENAWY, M.M. 2008. Successful application of swell packer technology to shut-off water production in horizontal wells – case studies from onshore Abu Dhabi. *Presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, Abu Dhabi, UAE, 3-6 November.

DAI, C., ZHAO, G., YOU, Q., ZHAO, M. 2014. A study on environment-friendly polymer gel for water shut-off treatments in low-temperature reservoirs. *J. Applied Polymer Science,* 131, 8. DOI: 10.1002/app.40154

FULLEYLOVE, R.J., MORGAN, J.C., STEVENS, D.G., THRASHER, D.R. 1996. Water shut-off in oil production wells – lessons from 12 treatments. *Presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference,* Abu Dhabi, United Arab Emirates, 13-16 October.

SENGUPTA, B., SHARMA, V.P., UDAYABHANU, G. 2012. Gelation studies of an organically cross-linked polyacrylamide water shut-off gel system at different temperatures and pH. *J. Petroleum Science and Engineering*, 81, 145-150.

SERIGHT, R.S. 1988. Placement of gels to modify injection profiles. *Presented at the SPE Enhanced Oil Recovery Symposium*, Tulsa, Oklahoma, 16-21 April.

SERIGHT, R.S. 1995. Reduction of gas and water permeabilities using gels. *SPE Production & Facilities,* 10, 2.

SERIGHT, R.S., LIANG, J. 1995. A comparison of different types of blocking agents. *Presented at the SPE European Formation Damage Conference*, The Hague, Netherlands, 15-16 May.

SURGUCHEV, L.M. 1998. Water shut-off: simulation and laboratory evaluation. *Presented at the European Petroleum Conference*, The Hague, Netherlands, 20-22 October.

SYDANSK, R.D., SERIGHT, R.S. 2006. When and where relative permeability modification water shut-off treatments can be successfully applied. *Presented at the SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery*, Tulsa, Oklahoma, USA, 22-26 April.

Рецензент: член-корреспондент НАН Азербайджана Г.И.Джалалов

© Р.Г.Гардашов, 2017

ОБ АППРОКСИМАЦИИ МГНОВЕННОЙ ФОРМЫ НЕРОВНОЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ СОЛНЕЧНЫХ БЛИКОВ

Р.Г.Гардашов

Институт географии им. акад. Г. Алиева НАН Азербайджана
AZ1143, Баку, просп. Г.Джавида, 115

Разработан метод определения состояния морской поверхности с использованием параметров, которые определяются по изображениям бликов Солнца на взволнованной морской поверхности. На примере показана корректность предложенного метода.

Основные формулы. В каждый момент времени морскую поверхность $z = \zeta(x, y)$ можно представить как суперпозиции гармонических волн с амплитудами c_i, волновыми векторами $\vec{k}_i = (k_{ix}, k_{iy})$ и фазами φ_i (Longuet-Higgins, 1969):

$$\zeta(x, y) = \sum_{i=1}^{n} c_i \cos(k_{ix}x + k_{iy}y + \varphi_i). \qquad (1)$$

Как видно из (1), для определения мгновенной формы поверхности $\zeta(x, y)$ необходимо знать $c_i, k_{ix}, k_{iy}, \varphi_i$ $(i = 1,2,...,n)$, всего $4n$ неизвестных. Для нахождения этих неизвестных можно получить $4n$ нелинейных уравнения, которые определяются параметрами, выводимыми из изображения бликов Солнца (или другого источника света малого углового размера). Этими (известными) параметрами являются: координаты зеркальных точек $(x_j, y_j), j = 1,2,...,m$; наклоны $\zeta_x(x_j, y_j)$, $\zeta_y(x_j, y_j)$; и величины $\rho_i = \rho(x_j, y_j)$ (обратные модулю гауссовой кривизны и пропорциональные размерам бликов) в зеркальных точках:

$$\rho_i = \frac{\left(1 + \zeta_x^2 + \zeta_y^2\right)^2}{\left|\zeta_{xx}(x_j, y_j)\zeta_{yy}(x_j, y_j) - \zeta_{xy}^2(x_j, y_j)\right|}. \qquad (2)$$

Если изображение поверхности получено с достаточно большого расстояния, то зеркальные точки (x_j, y_j) удовлетворят системе уравнений:

$$\begin{cases} \zeta_x(x, y) = \gamma_x = const \\ \zeta_y(x, y) = \gamma_y = const \end{cases}. \qquad (3)$$

В частном случае, когда зондирование поверхности производится в вертикальном направлении, то $\gamma_x = 0$ и $\gamma_y = 0$.

Для простаты дальнейших выкладок обозначим:

$$\alpha_i = k_{ix}x + k_{iy}y + \varphi_i. \qquad (4)$$

Тогда из (1) имеем:

$$\begin{cases} \zeta_x(x, y) = -\sum_{i=1}^{n} c_i k_{ix} \sin\alpha_i \\ \zeta_y(x, y) = -\sum_{i=1}^{n} c_i k_{iy} \sin\alpha_i \\ \zeta_{xx}(x, y) = -\sum_{i=1}^{n} c_i k_{ix}^2 \cos\alpha_i \\ \zeta_{yy}(x, y) = -\sum_{i=1}^{n} c_i k_{ix}^2 \cos\alpha_i \\ \zeta_{xy}(x, y) = -\sum_{i=1}^{n} c_i k_{ix} k_{iy} \cos\alpha_i \end{cases}. \qquad (5)$$

Таким образом, учитывая, что в зеркальных точках имеет место (2) и (3), получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} c_i k_{ix} \sin\alpha_{ij} = -\gamma_x \\ \sum_{i=1}^{n} c_i k_{iy} \sin\alpha_{ij} = -\gamma_y \\ \left|\sum_{i=1}^{n} c_i k_{ix}^2 \cos\alpha_{ij} \cdot \sum_{i=1}^{n} c_i k_{iy}^2 \cos\alpha_{ij} - \left(\sum_{i=1}^{n} c_i k_{ix} k_{iy} \cos\alpha_{ij}\right)^2\right| \\ = \frac{\left(1 + \zeta_x^2 + \zeta_y^2\right)^2}{\rho_i}, \quad j = 1,2,...m \end{cases}, \qquad (6)$$

где

$$\alpha_{ij} = k_{ix}x_j + k_{iy}y_j + \varphi_i \quad \begin{pmatrix} i = 1,2,...,n \\ j = 1,2,...,m \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Число уравнений в системе (6) равно $3m$, а число неизвестных – $4n$. При условии $3m = 4n$ число неизвестных равно числу уравнений, из решения системы (6) находятся неизвестные величины $c_i, k_{ix}, k_{iy}, \varphi_i$ $(i = 1,2,...,n)$ и, следовательно, по (1) определяем мгновенное положение морской поверхности.

Отметим, что решение системы (6) эквивалентно нахождению нулей функции:

$$\begin{aligned} & f(c_1, k_{1x}, k_{1y}, \varphi_1, ..., c_n, k_{nx}, k_{ny}, \varphi_n) \\ & = \sum_{j=1}^{m} \left\{ \left(\sum_{i=1}^{n} c_i k_{ix} \sin\alpha_{ij} + \gamma_x \right)^2 \right. \\ & + \left(\sum_{i=1}^{n} c_i k_{iy} \sin\alpha_{ij} + \gamma_y \right)^2 \\ & + \left[\left| \sum_{i=1}^{n} c_i k_{ix}^2 \cos\alpha_{ij} \cdot \sum_{i=1}^{n} c_i k_{iy}^2 \cos\alpha_{ij} \right. \right. \\ & \left. - \left(\sum_{i=1}^{n} c_i k_{ix} k_{iy} \cos\alpha_{ij} \right)^2 \right| \\ & \left. \left. - \frac{\left(1 + \zeta_x^2 + \zeta_y^2\right)^2}{\rho_i} \right]^2 \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для решения систем нелинейных уравнений с большой точностью и скоростью разработаны эффективные численные методы (Ostrowski, 1966) и основанные на них стандартные программы (например, на Fortran и Matlab) (Press et al., 1992).

Пример определения спектра. На простом примере покажем корректность поставленной задачи. Пусть поверхность состоит из 3 гармоник, распространяющихся в разных направлениях.

$$\begin{aligned} \zeta(x,y) &= c_1 \cos(k_{1x}x + k_{1y}y + \varphi_1) \\ &+ c_2 \cos(k_{2x}x + k_{2y}y + \varphi_2) \\ &+ c_3 \cos(k_{3x}x + k_{3y}y + \varphi_3) \end{aligned} \quad (9)$$

Рассмотрим случай зондирования в вертикальном направлении. Тогда $\gamma_x = 0$ и $\gamma_y = 0$. Зеркальные точки определяются как решение системы (3), которая для поверхности (9) принимает вид:

$$\begin{cases} c_1 k_{1x} \sin(k_{1x}x + k_{1y}y + \varphi_1) \\ + c_2 k_{2x} \sin(k_{2x}x + k_{2y}y + \varphi_2) \\ + c_3 k_{3x} \sin(k_{3x}x + k_{3y}y + \varphi_3) = 0 \\ c_1 k_{1y} \sin(k_{1x}x + k_{1y}y + \varphi_1) \\ + c_2 k_{2y} \sin(k_{2x}x + k_{2y}y + \varphi_2) \\ + c_3 k_{3y} \sin(k_{3x}x + k_{3y}y + \varphi_3) = 0 \end{cases}. \quad (10)$$

На основе численного моделирования решим прямую и обратную задачу.

Решение прямой задачи. Для численного моделирования поверхности (9) выберем значения параметров, приведённые в табл. 1.

На рис. 1 показано 3D изображение этой поверхности в области: $[0,15]\times[0,15]$. В рассматриваемой области имеются 5 зеркальных точек (бликов). Зеркальные точки 1, 4 – седлообразного типа, а 2, 3, 5 – эллиптического.

Численное решение системы (10) методом Ньютона-Рафсона в этой области дают характеристики зеркальных точек, приведённых в табл. 2.

Решение обратной задачи. Теперь допустим, что мы имеем изображение бликов, характеристики которых совпадают с характеристиками зеркальных точек, которые приведены в табл. 2.

Используя эти характеристики зеркальных точек, восстановим поверхность (9), которая состоит из суперпозиций 3 гармоник. Для этого мы должны решить систему (6) и найти 12 неизвестных: $c_1, k_{1x}, k_{1y}, \varphi_1, c_2, k_{2x}, k_{2y}, \varphi_2, c_3, k_{3x}, k_{3y}, \varphi_3$.

Таблица 1

Значения параметров

$c_1 = 1$	$k_1 = \left\|\vec{k}_1\right\| = \frac{2\pi}{8}$	$k_{1x} = k_1 \cos 0^0 \approx 0.7854$	$k_{1y} = k_1 \sin 0^0 = 0$	$\varphi_1 = 30^0$
$c_2 = 2$	$k_2 = \left\|\vec{k}_2\right\| = \frac{2\pi}{10}$	$k_{2x} = k_2 \cos 30^0 \approx 0.5441$	$k_{2y} = k_2 \sin 30^0 \approx 0.3142$	$\varphi_2 = 30^0$
$c_3 = 3$	$k_3 = \left\|\vec{k}_3\right\| = \frac{2\pi}{12}$	$k_{3x} = k_3 \cos 45^0 \approx 0.3702$	$k_{3y} = k_3 \sin 45^0 \approx 0.3702$	$\varphi_3 = 30^0$

Чтобы система (6) содержала 12 уравнений, мы должны использовать 4 зеркальные точки (из условия $3m = 4n$ получаем $m = 4$, т.к. $n = 3$). Следовательно, система (6) приобретает вид:

$$\begin{cases} c_1 k_{1x} \sin\alpha_{11} + c_2 k_{2x} \sin\alpha_{21} + c_3 k_{3x} \sin\alpha_{31} = 0 \\ c_1 k_{1y} \sin\alpha_{11} + c_2 k_{2y} \sin\alpha_{21} + c_3 k_{3y} \sin\alpha_{31} = 0 \\ c_1 k_{1x} \sin\alpha_{12} + c_2 k_{2x} \sin\alpha_{22} + c_3 k_{3x} \sin\alpha_{32} = 0 \\ c_1 k_{1y} \sin\alpha_{12} + c_2 k_{2y} \sin\alpha_{22} + c_3 k_{3y} \sin\alpha_{32} = 0 \\ c_1 k_{1x} \sin\alpha_{13} + c_2 k_{2x} \sin\alpha_{23} + c_3 k_{3x} \sin\alpha_{33} = 0 \\ c_1 k_{1y} \sin\alpha_{13} + c_2 k_{2y} \sin\alpha_{23} + c_3 k_{3y} \sin\alpha_{33} = 0 \\ c_1 k_{1x} \sin\alpha_{14} + c_2 k_{2x} \sin\alpha_{24} + c_3 k_{3x} \sin\alpha_{34} = 0 \\ c_1 k_{1y} \sin\alpha_{14} + c_2 k_{2y} \sin\alpha_{24} + c_3 k_{3y} \sin\alpha_{34} = 0 \\ \left| \sum_{i=1}^{3} c_i k_{ix}^2 \cos\alpha_{i1} \cdot \sum_{i=1}^{3} c_i k_{iy}^2 \cos\alpha_{i1} - \left(\sum_{i=1}^{3} c_i k_{ix} k_{iy} \cos\alpha_{i1} \right)^2 \right| = \frac{1}{\rho_1} \\ \left| \sum_{i=1}^{3} c_i k_{ix}^2 \cos\alpha_{i2} \cdot \sum_{i=1}^{3} c_i k_{iy}^2 \cos\alpha_{i2} - \left(\sum_{i=1}^{3} c_i k_{ix} k_{iy} \cos\alpha_{i2} \right)^2 \right| = \frac{1}{\rho_2} \\ \left| \sum_{i=1}^{3} c_i k_{ix}^2 \cos\alpha_{i3} \cdot \sum_{i=1}^{3} c_i k_{iy}^2 \cos\alpha_{i3} - \left(\sum_{i=1}^{3} c_i k_{ix} k_{iy} \cos\alpha_{i3} \right)^2 \right| = \frac{1}{\rho_3} \\ \left| \sum_{i=1}^{3} c_i k_{ix}^2 \cos\alpha_{i4} \cdot \sum_{i=1}^{3} c_i k_{iy}^2 \cos\alpha_{i4} - \left(\sum_{i=1}^{3} c_i k_{ix} k_{iy} \cos\alpha_{i4} \right)^2 \right| = \frac{1}{\rho_4} \end{cases}, \quad (11)$$

где

$$\alpha_{ij} = k_{ix} x_j + k_{iy} y_j + \varphi_i \begin{pmatrix} i = 1,2,3 \\ j = 1,2,3,4 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Численное решение системы (11) методом Ньютона-Рафсона дают значения неизвестных, приведённых в табл. 3.

Сравнение значений восстановленных параметров поверхности с их исходными величинами показывает, что обратная задача решается с большой точностью. Сходимость к решению в методе Ньютона-Рафсона обеспечивается благодаря возможности выделения промежутков, внутри которых лежат решения системы уравнений.

Заключение. Изложенный метод позволяет построить мгновенную форму морской поверхности по характеристикам зеркальных точек (бликов) в мгновенном изображении поверхности. При этом принимается, что число гармоник, образующих поверхность априори известно. По-видимому, этот недостаток можно будет устранить, используя информацию, которую доставляют блики, неучтённые при составлении системы уравнений.

Вообще, знание мгновенного положения морской поверхности важно для решения ряда практических задач космической океанологии, таких как установление лазерной связи спутника с подводной лодкой, перенос изображения через морскую поверхность, обнаружение в спектре поверхности “опасной гармоники” (цунами) и т.д. Поэтому мы предполагаем, что предложенный новый подход получит свое дальнейшее развитие в основном в следующих направлениях: 1) разработка способа определения числа гармоник в спектре поверхности через характеристики бликов, 2) нахождение эффективного численного метода, адаптированного к решению полученной системы уравнений с достаточно большим числом неизвестных.

Таблица 2

Характеристики зеркальных точек

$x_1 = 3.67$ $y_1 = 12.61$	$x_2 = 6.69$ $y_2 = 8.98$	$x_3 = 10.57$ $y_3 = 13.33$	$x_4 = 11.97$ $y_4 = 3.69$	$x_5 = 2.64$ $y_5 = 5.03$
$\rho_1 = 3.28$	$\rho_2 = 3.58$	$\rho_3 = 4.71$	$\rho_4 = 6.32$	$\rho_5 = 3.09$

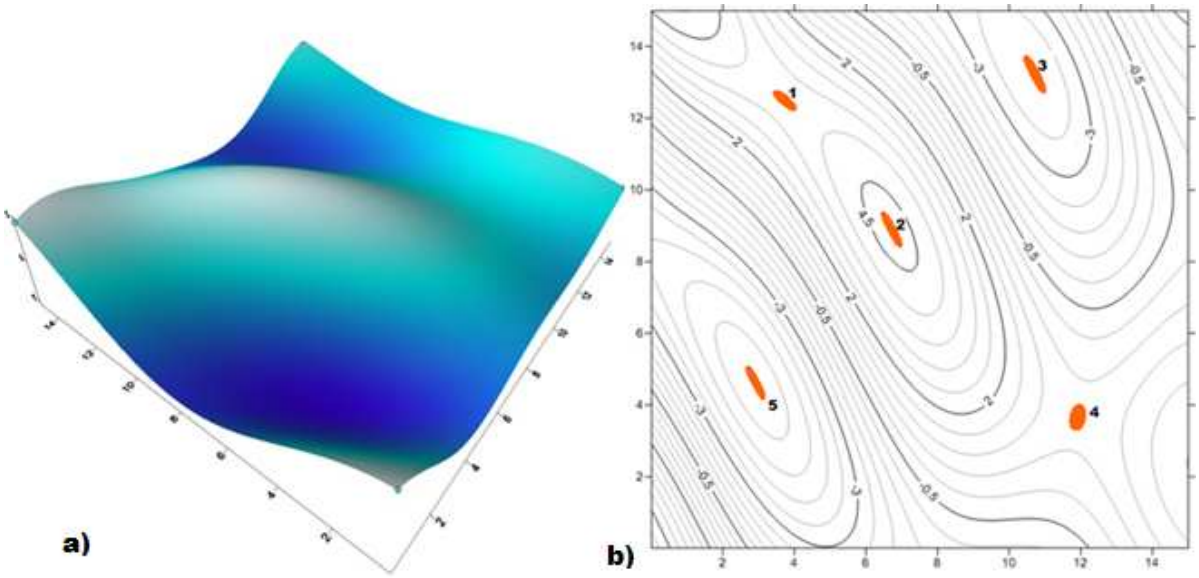


Рис. 1. a) 3D изображение моделируемой поверхности; **b)** расположение бликов

Таблица 3

Значения восстановленных параметров поверхности

$c_1 \approx 0.98$	$k_{1x} \approx 0.78$	$k_{1y} \approx 0.01$	$\varphi_1 \approx 30.4^0$
$c_2 \approx 2.03$	$k_{2x} \approx 0.54$	$k_{2y} \approx 0.31$	$\varphi_2 \approx 44.9^0$
$c_3 \approx 3.04$	$k_{3x} \approx 0.37$	$k_{3y} \approx 0.37$	$\varphi_3 \approx 0.1^0$

ЛИТЕРАТУРА

LONGUET-HIGGINS, M. S. 1969. The distribution of the sizes of images reflected in a randomsurface. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1, 91-100.

OSTROWSKI, A.M. 1966. Solutions of equations and systems of equations. Academic Press. New York.

PRESS, W.H. et al. 1992. Numerical recipes in Fortran 77. The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press. 1447 pp.

Рецензент: к.ф.-м.н. Л.С.Долин (Институт прикладной физики РАН)

© Q.İ.Rüstəmov, A.N.İsayev, 2017

ŞİRVAN DÜZÜ AQROLANDŞAFTLARININ GEOKİMYƏVİ ŞƏRAİTİNƏ MİKROELEMENTLƏRİN TƏSİRİNİN BƏZİ QANUNAUYĞUNLUQLARI

Q.İ.Rüstəmov, A.N.İsayev

AMEA akad. H.Ə.Əliyev ad. Coğrafiya İnstitutu
Az1143, Bakı, H.Cavid prosp., 115

Şirvan düzü aqrolandşaftlarında 2012-2015-ci illərdə aparılan elmi tədqiqatlar nəticəsində aqrolandşaftların geokimyəvi xüsusiyyətləri öyrənilmiş, mikroelementlərin miqrasiyası və paylanma qanunauyğunluqları müəyyən edilmişdir. Məqalədə Şirvan düzü aqrolandşaftlarının geokimyəvi xüsusiyyətlərinin yaxşılaşdırılmasına yönələn və konkret elmi dəlillərə əsaslanan tövsiyə xarakterli təkliflər verilmişdir. Əldə edilən məlumatlar əsasında ilk dəfə olaraq tədqiqat ərazisi üçün Coğrafi İnformasiya Sistemləri (ArcGİS) kompüter proqramından istifadə etməklə 1: 200 000 miqyaslı "Şirvan düzü aqrolandşaftlarının geokimyəvi xəritəsi (mikroelementlərə görə)" və "Şirvan düzü aqrolandşaftlarının tibbi-ekogeokimyəvi xəritəsi" tərtib edilmişdir.

Mövzunun aktuallığı. Ekoloji aspektdə geokimyəvi tədqiqatların aparılması zərurəti insanların təsərrüfat fəaliyyəti ilə əlaqədar ekoloji şəraitin dəyişilməsi, eləcə də ərazinin təbii potensialından daha səmərəli istifadə edilməsi problemlərinin meydana çıxması səbəblərindən irəli gəlmişdir. Bu baxımdan təbii və antropogen landşaftların insanların təsərrüfat fəaliyyətinin zərərli təsirlərindən mühafizəsi, canlı varlıqların məskunlaşdıqları ərazilərdə təbii mühitin daha da sağlamlaşdırılması üçün ekoloji-geokimyəvi şəraiti öyrənmək məqsədilə Şirvan düzündə elmi tədqiqat işlərinin aparılması olduqca zəruridir.

Şirvan düzündəki aqrolanşaftların müxtəlif sahələrinin (yonca, biyan, yerkökü, çəltik və s.) intensiv inkişafı və gələcək perspektivləri ərazidə geokimyəvi şəraitin, landşaftların geokimyasının ətraf mühitə təsirinin, bitkilərdə, torpaqda və təbii sularda müxtəlif birləşmələr şəklində toplanan kimyəvi elementlərin geokimyəvi xüsusiyyətlərinin öyrənilməsi məsələlərinin aktual olduğunu göstərir.

Tədqiqatların metodikası. 2012-2015-ci illərdə Şirvan düzü aqrolandşaftlarında apardığımız tədqiqat işləri zamanı 38 istinad nöqtəsi seçilmiş, həmin məntəqələrdə 38 torpaq kəsiminin qoyulduğu yerlərdə torpaq, bitki və su nümunələri götürülmüşdür. Bütün nümunələr laboratoriya şəraitində analizlər üçün ilkin emaldan keçirilmiş və analizlər aparılanadək xüsusi şəraitdə saxlanılmışdır. Analizlər AMEA Coğrafiya İnstitutunun Meşə torpaqlarının coğrafiyası laboratoriyasında və Landşaftşünaslıq və landşaft planlaşdırılması şöbəsində aparılmış, torpaq, süxur, dib çöküntüləri və su nümunələri spektral analiz metodu ilə "Elvax-CEP 01" markalı rentgen-flüoressent spektrometri vasitəsilə tədqiq edilmişdir.

Tədqiqatların aparılmasında A.İ.Perelmanın "Landşaft komponentlərinin müqayisəli və əlaqəli tədqiqi" metodundan istifadə edilmişdir (Перельман, 1989).

İşin məzmunu. Şirvan düzü aqrolandşaftlarından götürülmüş nümunələrin analizlərinə əsasən mikroelmentlərin izafiliyi və çatışmazlığı aşkar edilmiş, alınan faktiki materiallar əvvəllər aparılan tədqiqat işləri ilə müqayisə edilərək, əldə edilmiş məlumatlar əsasında ilk dəfə olaraq Coğrafi İnformasiya Sistemləri kompüter proqramından istifadə etməklə 1 : 200 000 miqyaslı "Şirvan düzü aqrolandşaftlarının geokimyəvi xəritəsi (mikroelementlərə görə)" və "Şirvan düzü aqrolandşaftlarının tibbi-ekogeokimyəvi xəritəsi" tərtib edilmişdir.

Kənd təsərrüfatında istifadə olunan kimyalaşdırma torpaqların ağır metallarla çirklənməsində əsas vasitə sayılır. Çünki ağır metalların əksəriyyəti mineral gübrələrin tərkib hissəsinə daxil olan komponentlər sayılır. Buna görə onların mineral gübrələrdəki miqdarı ilk xammaldan və onun emal texnologiyasından çox asılıdır. Özünün komplektinə və ağır metal qatışıqlarının miqdarına görə onların ən əhəmiyyətlisi fosfor gübrələridir. Fosforlu və üzvi gübrələrin, eləcə də əhəngin tərkibində olan ağır metallar zəif həll olunan maddələr formasında mövcud olduğundan, onların yalnız cüzi miqdarı bitkilərlə mənimsənilir. Amma torpağa verilən kalium və azot gübrələrinin tərkibində olan ağır metallar (qurğuşun, mis, sink) bitkilərə daha asan daxil olur. Mikroelementlərin mənimsənilən formaları müəyyən həddi aşanda onların hamısı bitkilərə qarşı mənfi təsir göstərə bilər. Ehtimal ki, bitki və heyvanlara lazım olmayan bəzi ağır metallar, məsələn, civə, qurğuşun və kadmium çox cüzi miqdarda

da insan sağlamlığı üçün təhlükəlidir (Salmanov və b., 2013).

Tədqiqat ərazisi üçün tərtib etdiyimiz "Şirvan düzü aqrolandşaftlarının geokimyəvi xəritəsi"ndən göründüyü kimi, Şirvan düzünün aqrolandşaftlarında mikroelementlərin paylanmasında çox böyük fərqlər müşahidə edilir.

Ekosistemin bütün komponentlərində, o cümlədən torpaq, bitki, heyvan və insanda kimyəvi elementlərin fon miqdarı mühüm geokimyəvi göstəricidir. Torpaqda ağır metalların təbii fon miqdarı mövcud olduqda, onlar torpaq mühiti ilə əlaqədar olaraq bitkilərə çətinliklə daxil ola bilsələr də, torpağa və ümumiyyətlə, ekosistemə zərərli təsir göstərmirlər (Алексеенко, 2001). Əgər torpaq şəraiti toksiki metalların torpaq məhluluna keçməsinə yol verirsə, onda torpağın və ekosistemin başqa komponentlərinin çirklənməsi baş verir. Bunu nəzərə alaraq torpaq – gübrə – bitki sistemində ağır metalların miqdari səviyyəsinin qiymətləndirilməsi həm ekologiya, həm də kənd təsərrüfatı üçün çox vacibdir.

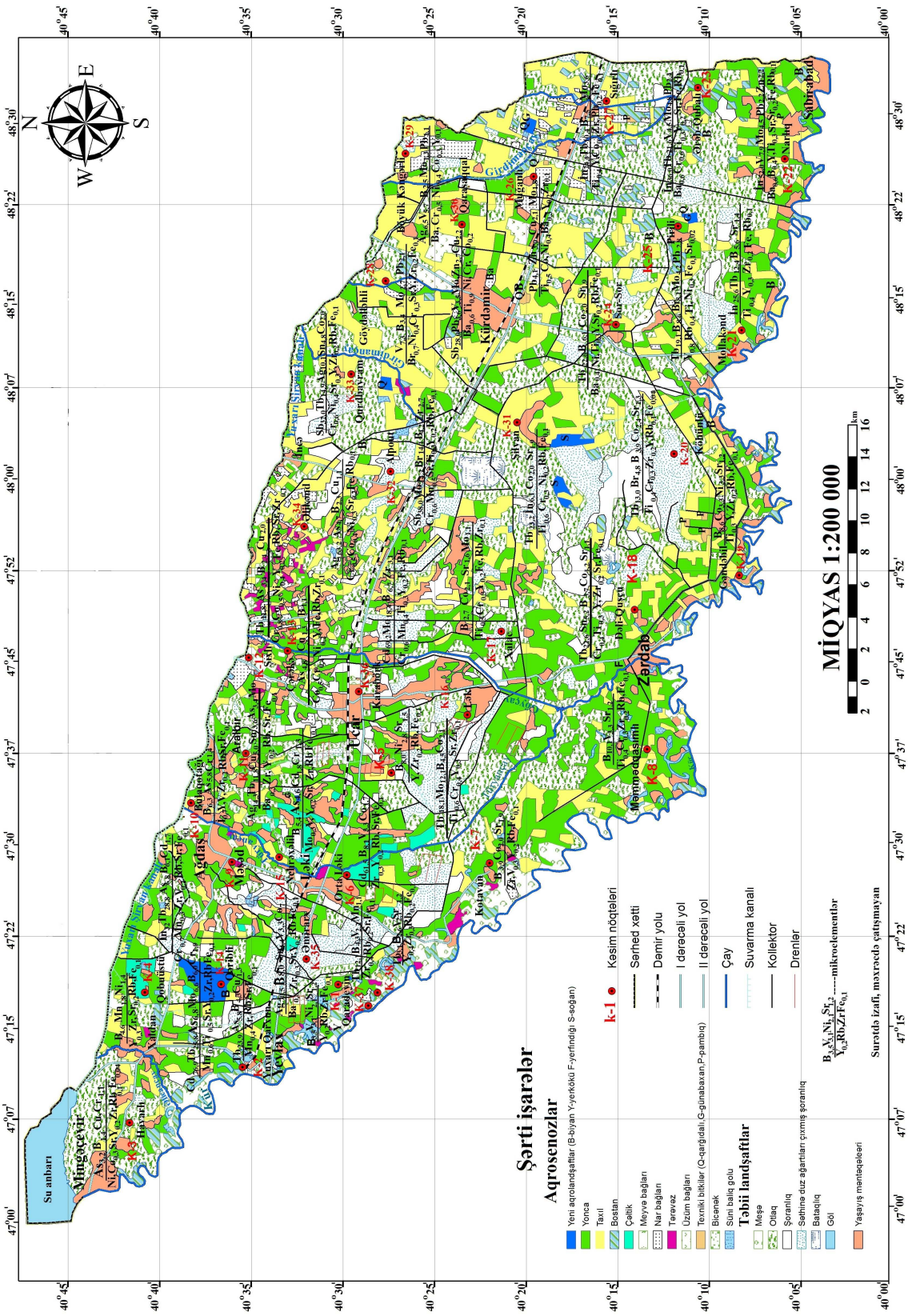
Dəmir, manqan, sink, molibden və ola bilər ki, kobalt da nəticə etibarilə bitkilərin, heyvan və insanların normal fəaliyyəti üçün lazımdır. Spektral analizin nəticələrinə əsasən müəyyən edilmişdir ki, tədqiqat ərazisində aşkar edilən mikroelementlərdən bəziləri toksik xarakterli olub, aqrolandşaftlardakı canlı varlıqların – bitkilərin, heyvanların, xüsusən də insanların həyat fəaliyyətinə, onların bir sıra fizioloji funksiyalarının icra olunmasına müəyyən dərəcədə təsir göstərir. Şirvan düzündə yayılan əsas mikroelementlər B, Zn, Cd, Mo, V, Co, Sr, Ni, Cr, Ba, Y, Zr, Sr, Rb, Fe və s. elementlərdir. Bunlardan tədqiqat ərazisi üzrə izafi mikroelementlər Cd, B, Zn, Tb, As, Mn, Pb, Mo, V və Co, çatışmayan mikroelementlər isə Fe, Ti,Y, Zr, Rb, Ni, Ba, Sr və Cr-dur (1-ci şəkil). Tədqiqat ərazisində yayılan ağır metallardan Cd, As, Zn I dərəcəli; B, Co, Mo, Ni, Cr II dərəcəli; Ba, V, Mn, Sr III dərəcəli toksiki elementlərdir. Bu mikroelementlərin qida zəncirinə daxil olması, eyni zamanda, landşaft komponentlərində, xüsusən də torpaqda çatışmayan mikroelementlərin mövcudluğu insanlarda müxtəlif xəstəliklərin yaranmasına səbəb olur. Şirvan duzu aqrolandşaftlarında mikroelementlərin konsentrasiya klarkları (KK) ərazi üzrə fərqli miqdarda təzahür edir. 1-ci cədvəldən göründüyü kimi, Ağdaş rayonunun Kotavan kəndi yaxınlığındakı yonca aqrolandşaftındakı torpaqda B,V, Fe, Co, Sr, Y, Zr, Rb mikroelementləri müəyyən edilmişdir. Bu mikroelementlərdən B, Co və Sr izafi, Fe, Zr, V, Y və Rb çatışmayan elementlərdir (1-ci cədvəl).

Kadmium elementinin torpaqda, suda və bitkilərin tərkibində çoxluğu bu mikroelementin qida zəncirinə daxil olmasına gətirib çıxarır ki, bu da insanlarda ağciyər və qaraciyərin davamlı funksiyasının pozulmasına, böyrək xəstəliklərinə, prostat vəzinin xərçənginə, sümüklərin ovulmasına, boyun qısalmasına səbəb olur. Bu ərazilərdə Cd-un miqdarını azaltmaq üçün 4-5 ildən bir çəltik sahələrini kartof və yonca aqrolandşaftları ilə əvəz etmək lazımdır. Qeyd edək ki, quş peyini və müxtəlif qatışıqlardan hazırlanmış üzvi gübrə olan kompostun torpağa verilməsi də kadmiumun miqdarını azaldır (Məmmədov və b., 2010).

Əgər ilkin torpaqlar pestisidlərlə və ya ağır metallarla çirkləniblərsə, onda ilk mərhələdə onları təmizləmək üçün intensiv fitomeliorasiya üsullarından istifadə etmək lazımdır. Məsələn, nəqliyyat magistralları zonalarında adətən torpaqlar əsasən sink və qurğuşunla çirklənir. Buna görə də torpaq sahələri ilk növbədə toksikantları tutmağa qadir olan meşə zolaqları vasitəsilə mühafizə olunmalıdır. Bu cür torpaqlarda əsasən qurğuşun və sinki daha az toplayan taxıl və texniki bitkiləri yetişdirmək məsləhətdir. Belə torpaqlarda südverən mal-qaranı otarmaq məsləhət deyil, ona görə ki, qurğuşun otlaqda toplanaraq inəklərin südünə keçir (Şəkuri, 2011).

Bir sıra beynəlxalq əhəmiyyətli və digər magistral yolların Şirvan düzü ərazisindən keçməsini nəzərə alsaq, bu məsələnin tədqiqat ərazisi üçün nə qədər aktual olduğunu göstərməyə ehtiyac qalmır. Aqrolandşaftlar daxilində sink və qurğuşunun yüksək konsentrasiya klarkı tədqiqat ərazisinin şimal-şərqində, Kürdəmirin Muğanlı, Qarasaqqallı, Böyük Kəngərli kəndləri yaxınlığında, Ağsu rayonunun Göydəlləkli kəndi yaxınlığında buğda və yonca sahələrində müşahidə edilmişdir. Qurğuşunun yüksək konsentrasiyası əsəb, ürək-damar, immunitet və endokrin sistemlərinin pisliyə doğru dəyişməsinə, böyrəklərin funksional pozğunluğuna gətirib çıxarır.

Ağır mexaniki tərkibli torpaqlarda toksikantların hərəkətliliyi azalır. Torpağın kipliyinin artması çirkləndirici maddələrin hərəkətliliyini artırır. As-in maksimum miqdarının 2-ci və 9-cu kəsimlərdə (KK_{As}=5,8) olması müşahidə edilmişdir. Bitkilərdə As-in 10-100 mq/m^3 səviyyəsində xroniki təsiri onun qida zəncirinə daxil olmasına gətirir ki, bu da ağciyər və dəri xərçənginə, mədə funksiyalarının pozulmasına səbəb olur. Ərazidə yayılan II dərəcəli toksiki mikroelementlərdən B-un maksimal miqdarı 8-ci kəsimdə – Zərdab rayonunun Məmmədqasımlı kəndi yaxınlığında buğda sahəsində müşahidə olunur. Bor tədqiqat ərazisinin aqrolandşaftları üçün izafi mikroelement olması ilə digərlərindən seçilir.


Şərti işarələr
Aqrosenozlar
Yeni aqrolandşaftlar (B-boyan Y-yerkökü F-yerfındığı S-soğan)
Yonca
Təvil
Bostan
Çəltik
Meyvə bağları
Nar bağları
Tərəvəz
Üzüm bağları
Texniki bitkilər (Q-qarğıdalı,G-günəbaxan,P-pambıq)
Biçənək
Süni balıq gölü
Təbii landşaftlar
Meşə
Otlaq
Şoranlıq
Səthinə duz ağartıları çıxmış şoranlıq
Bataqlıq
Göl
Yaşayış məntəqələri
k-1 Kəsim nöqtələri
Sərhəd xətti
Dəmir yolu
I dərəcəli yol
II dərəcəli yol
Çay
Suvarma kanalı
Kollektor
Drenlər
Suratdə izafi, maxrəcdə çatışmayan
MİQYAS 1:200 000
km
Su anbarı
Mingəçevir
Ağdaş
Yevlax
Tərtər
Zərdab
Kürdəmir
Sabirabad
Sığırlı
Qaraqoyunlu
Qobustan
Hacıqabul
Ağcabədi
Sarıcalı
Ağcakənd
Ağdamır
Qaradolaq
Ağcakənd
Ağcakənd
Ağcakənd

1-ci cədvəl

Şirvan düzü aqrolandşaftlarından götürülmüş torpaq nümunələrinin mikroelement tərkibi
Kəsim-7 – Ağdaş rayonunun Kotavan kəndi (yonca sahəsi)

Sira №si	Element	Orta miqdar, %-lə		Konsentrasiya klarkı
		Torpağın tərkibində	Yer qabığındakı klark	
	0-20 sm			
1	B	0,0020	0,0012	1,667
	V	0,0017	0,009	0,189
	Fe	0,3202	4,65	0,069
	Co	0,0030	0,0018	1,667
	Rb	0,0016	0,015	0,107
	Sr	0,0037	0,034	0,109
	Y	0,0006	0,0029	0,207
	Zr	0,0060	0,017	0,353
20-40 sm				
2	B	0,0047	0,0012	3,917
	V	0,0030	0,009	0,333
	Fe	0,2657	4,65	0,057
	Co	0,0036	0,0018	2,000
	Rb	0,0020	0,015	0,133
	Sr	0,0646	0,034	1,900
	Y	0,0007	0,0029	0,241
	Zr	0,0036	0,017	0,212
40-100sm				
3	B	0,0029	0,0012	2,417
	Fe	0,2585	4,65	0,055
	Co	0,0025	0,0018	1,389
	Rb	0,0018	0,015	0,120
	Sr	0,0037	0,034	0,109
	Y	0,0005	0,0029	0,172
	Zr	0,0046	0,017	0,271
100-150sm				
4	V	0,0035	0,009	0,389
	Fe	0,3711	4,65	0,080
	Co	0,0016	0,0018	0,889
	Rb	0,0020	0,015	0,133
	Sr	0,0029	0,034	0,085
	Y	0,0005	0,0029	0,172
	Zr	0,0026	0,017	0,153

Şirvan düzü aqrolandşaftlarında dəmirin KK-sı 0,04-lə 0,1 arasında dəyişir. Fe-in çatışmazlığı qan azlığına, halsızlığa, əsəbiliyə və bir sıra başqa xəstəliklərə səbəb olur. Ərazidə yodun və bromun çatışmazlığı isə qalxanvarı vəzin xərçənginə və endemik zob xəstəliyinin yayılmasına gətirib çıxarır.

Ağır metalların torpaqdakı canlı orqanizmlərə müştərək baş verən toksiki təsiri daha güclüdür. Məsələn, sinkin və kadmiumun torpaq mikroorqanizmlərinə qarşı birgə mənfi təsiri onlara ayrı-ayrılıqda göstərilən təsirdən dəfələrlə çoxdur. Heyvan və insan orqanizminə daxil olan ağır metallar uzunmüddətli mənfi təsir göstərir və bir sıra xəstəliklərin əmələgəlməsinə səbəb olur. Orqanizmin çirklənmələrə reaksiyası onun yaşından, cinsindən, səhhətindən irəli gələn fərdi xüsusiyyətlərindən asılıdır. Bir qayda olaraq, uşaq, yaşlı və çox qoca olan xəstə insanlar toksinlərə qarşı daha həssas olurlar. Toksik maddələr orqanizmə daimi və ya vaxtaşırı az miqdarda daxil olduqda xroniki zəhərlənmə baş verir. Xroniki zəhərlənmə baş verəndə eyni maddələr fərqli insanlarda böyrək, qaraciyər və sinir sistemində müxtəlif pozulmalara səbəb ola bilər. Ağır metalların təhlükəli olması ondan ibarətdir ki, onlar insan orqanizminin müxtəlif toxu-

malarında (qurğuşun və sink – orqanizmin bərk, nikel, mis və kobalt isə – yumşaq toxumalarda) toplana bilir. Əksər hallarda insan orqanizminə daxil olan ağır metal birləşmələri xərçəng xəstəliklərinə səbəb olur. Bundan əlavə, onlar bir sıra ürək-damar və mərkəzi əsəb sistemində (əsasən uşaqlarda), böyrək, qaraciyər, həzm sistemində funksional və üzvi pozulmalara gətirib çıxarır. Uşaqların qanında qurğuşunun miqdarı çox olduqda onlarda ağlın zəif inkişafı müşahidə olunur. Torpağa fosforu yüksək miqdarda verməklə Pb, Cu, Zn və Cd- un toksiki təsirini azaltmaq mümkündür (Salmanov və b., 2013).

Torpaq hissəcikləri ilə sıx bağlı olan müddətdə ağır metallar çətin mənimsənilir və onların torpağa, ətraf mühitə mənfi təsiri cüzi olur. Lakin əgər torpaq şəraiti ağır metalların torpaq məhluluna keçməsinə imkan yaradırsa, onda torpaqların birbaşa çirklənməsinin təhlükəsi artaraq onların bitkilərə, eləcə də insan və heyvan orqanizmlərinə daxil olmalarının ehtimalı artır.

Torpaqların və bitkilərin çirklənməsinin təhlükəsi bitkinin və torpaqdakı kimyəvi maddələrin növündən, ağır metalların və onlar ilə kompleks madddələr əmələ gətirən birləşmələrə əks-təsir göstərə bilən elementlərin olmasıından, torpaqda bu metalların mənimsənilən formalarının miqdarından və torpaq-iqlim şəraitindən asılıdır. Deməli, ağır metalların mənfi təsiri əsas etibarilə onların mütəhərrikliyindən asılıdır. Mədəni bitkilərin, kənd təsərrüfatı heyvanlarının və insanların orqanizminə ağır metallar yalnız mütəhərrik formada daxil olur. Ağır metalların torpağın üst qatında paylanması bir sıra amillərdən – çirklənmə mənbəyinin xüsusiyyətindən, yerli meteoroloji xüsusiyyətlərdən, geokimyəvi amillərdən və ümumi landşaft mühitindən asılıdır (Salmanov və b., 2013).

Tədqiqat ərazisinin Ağdaş rayonunun Orta Ləki kəndi yaxınlığındakı intensiv suvarılan tarla kompleksində (K-6) Cd, B, V, Co kimi mikroelementlərin izafi, Zr,Y,Rb,Sr və Fe-in catışmazlığı aşkar edilmişdir. 2-ci cədvəldən göründüyü kimi, ayrı-ayrı aqrolandşaft növlərində yayılan mikroelementlərin paylanmasında kəskin fərqlər müşahidə edilir.

Şirvan düzünün müxtəlif növ aqrolandşaftlarından götürülmüş mədəni və təbii bitki nümunələrinin spektral analizlə mikroelement tərkibi müəyyən edilmişdir. Alınan nəticələr əsasında müxtəlif mikroelementlər üçün bioloji udulma əmsalları (BUƏ) hesablanmış və onların azalma sıraları tərtib edilmişdir. Bitkilərin kül tərkibinin spektral analizinin nəticələri və BUƏ-nin azalma sıraları 3-cü cədvəldə verilmişdir.

Şirvan düzü aqrolandşaftlarında istər mədəni, istərsə də yabanı bitkilərin tərkibində mikroelementlərin ümumi miqdarı və BUƏ-nin təhlili burada müəyyən konsentrator (toplayıcı) bitkilərin aşkar edilməsi ilə nəticələnmişdir.

Şirvan düzü aqrolandşaftlarında mikroelementlərin izafiliyindən və çatışmazlığından ərazidə müxtəlif xəstəliklər yaranmışdır. Ərazi üçün tərtib edilən "Şirvan düzü aqrolandşaftlarının tibbi-ekogeokimyəvi xəritəsi"ndən göründüyü kimi, Ağdaş və Göyçay rayonları ərazisində endemik zob, diş kariyesi, onkoloji, əsəb və ürək-damar xəstəlikləri çox geniş yayılmışdır. Ucar, Yevlax və Mingəçevir ərazilərində isə qeyd olunan xəstəliklərlə bərabər, həzm sistemi xəstəlikləri də ərazi üçün səciyyəvidir (2-ci şəkil).

Nəticələr. Şirvan düzündə yayılan əsas mikroelementlər B, Zn, Cd, Mo, V, Co, Sr, Ni, Cr, Ba, Y, Zr, Sr, Rb, Fe və s. elementlərdir. Bunlardan tədqiqat ərazisi üzrə izafi mikroelementlər B, Cd, Sb, Zn, Tb, As, Mn, Pb, Mo, V və Co, çatışmayan mikrelementlər isə Ti,Y, Zr, Rb,Cr, Ba, Ni, Sr və Fe-dir. Buradakı aqrolandşaftların geokimyəvi şəraitinin ekoloji cəhətdən qiymətləndirilməsi məqsədilə ayrı-ayrı ərazilərdə mövcud olan ekogeokimyəvi şəraitin insan sağlamlığına təsiri müxtəlif mənbələrdən alınan məlumatlar əsasında araşdırılmış, aqrolandşaftlar üçün daha səciyyəvi olan xəstəliklər, xüsusilə mikroelementlərin anomal konsentrasiyası və çatışmazlığı təsirindən yaranan xəstəliklər və onların yayılma dərəcəsi müəyyənləşdirilmiş, nəticədə tədqiq etdiyimiz ərazi üçün ilk dəfə "Şirvan düzü aqrolandşaftlarının tibbi-ekogeokimyəvi xəritəsi" tərtib edilmişdir. Ağdaş və Göyçay rayonları ərazisində endemik zob, diş kariyesi, onkoloji, əsəb və ürək-damar xəstəlikləri çox geniş yayılmışdır. Ucar, Yevlax və Mingəçevir ərazilərində isə qeyd olunan xəstəliklərlə bərabər, həzm sistemi xəstəlikləri də ərazi üçün səciyyəvidir. Kürdəmir və Sabirabad rayonları ərazisində endemik zob, diş kariyesi və tənəffüs yolları xəstəlikləri daha çox yayılıb. Əhali arasında az yayılan xəstəliklər isə bruselyoz və tənəffüs yolları xəstəlikləridir.

Apardığımız tədqiqatlar nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, ərazi aqrolandşaftları üçün daha çox səciyyəvi olan yonca, çəltik, buğda, arpa, tərəvəz və bu kimi bitkilər daha geniş sahələrdə yayılmışdır. Yeni yaradılan aqrolandşaftların – biyan, yerkökü, yerfındığı, günəbaxan, soğan və s. Şirvan düzündə genişəndirilməsi üçün geniş perspektivlər var.

2-ci cədvəl

Şirvan düzü aqrolandşaftlarının mikroelement tərkibi

Sıra №-si	Kəsim №-si və məntəqələr	Aqrolandşaftlar	Məntəqənin coğrafi koordinatları	Mikroelementlər
1	K – 1 Ağdaş r-nu Qaradeyin k.	Orta dərəcədə suvarılan tarla kompleksi (yonca sahəsi)	$40^0$31'şm.e. $47^0$18'ş.u.	$\frac{B_{3,5}, V_{3,1}, Ni_{2,1}, Sr_{1,2}}{Y_{0,2}, Rb, Zr, Fe_{0,1}}$
2	K – 3 Yevlax r-nu Havarlı k.	Zəif suvarılan otlaq aqroekosistemi (otlaq sahəsi)	$40^0$44'şm.e. $47^0$05'ş.u.	$\frac{As_{3,2}, B_{1,4}, Cu, Cr_{1,1}}{Ni, Co_{0,3}, Sr, Y_{0,2}, Zr, Rb_{0,1}, Fe_{0,04}}$
3	K – 6 Ağdaş r-nu Orta Ləki k.	İntensiv suvarılan tarla kompleksi (çəltik sahəsi)	$40^0$31'şm.e. $47^0$26'ş.u.	$\frac{Cd_{61,5}, B_{8,1}, V_{3,3}, Co_{1,7}}{Zr_{0,3}, Y_{0,2}, Rb, Sr, Fe_{0,1}}$
4	K – 12 Göyçay r-nu Şıxlı k.	İntensiv suvarılan bağ-plantasiya aqroekosistemləri (nar bağı)	$40^0$36' şm.e. $47^0$45' ş.u.	$\frac{Tb_{11,8}, As_{3,4}, B_{2,4}, Cu_{2,0}}{Cr_{0,8}, Co_{0,5}, Y_{0,2}, Fe, Rb, Sr, Zr_{0,1}}$
5	K – 14 Ağdaş r-nu Qəribli k.	Orta dərəcədə suvarılan tarla kompleksi (biyan sahəsi)	$40^0$38' şm.e. $47^0$18' ş.u.	$\frac{Cd_{76,9}, Tb_{25,8}, Mo_{6,6}, B_{6,0}}{Mn_{0,6}, Y, Sr_{0,2}, Zr, Fe, Rb_{,0,1}}$
6	K – 22 Sabirabad r-nu Narlıq k.	Orta dərəcədə suvarılan tarla kompleksi (arpa sahəsi)	$40^0$06' şm.e. $48^0$28' ş.u.	$\frac{İn_{52,0}, V_{7,9}, Mo_{4,5}, Zn_{2,2}}{Ba_{0,6}, B_{0,4}, Y, Sr, Cr_{0,2}, Rb, Fe_{0,1}}$
7	K – 28 Ağsu r-nu Göydəlləkli k.	Orta dərəcədə suvarılan tarla kompleksi (buğda sahəsi)	$40^0$28' şm.e. $48^0$16' ş.u.	$\frac{V_{7,3}, B_{3,4}, Mo_{2,7}, Pb_{2,1}}{Ba_{0,7}, Cr_{0,3}, Sr, Y, Zr_{0,2}, Fe_{0,1}}$
8	K – 36 Ucar r-nu Karabörk k.	İntensiv suvarılan tarla kompleksi (pambıq sahəsi)	$40^0$29' şm.e. $47^0$41' ş.u.	$\frac{Cd_{69,2}, Mn_{18,4}, B_{6,4}, Zr_{3,1}}{Cr_{0,6}, Mo_{0,4}, Y_{0,2}, Fe, Rb_{0,1}}$
9	K – 38 Ağdaş r-nu Qaradeyin k.	Tuqay meşəsində intensiv suvarılan tarla kompleksi (yonca sahəsi)	$40^0$28' şm.e. $47^0$17' ş.u.	$\frac{Tb_{3,1}, B_{2,6}, V_{2,1}, Sr_{1,2}}{Y_{0,4}, Zr_{0,3}, Rb_{0,2}, Fe_{0,1}}$

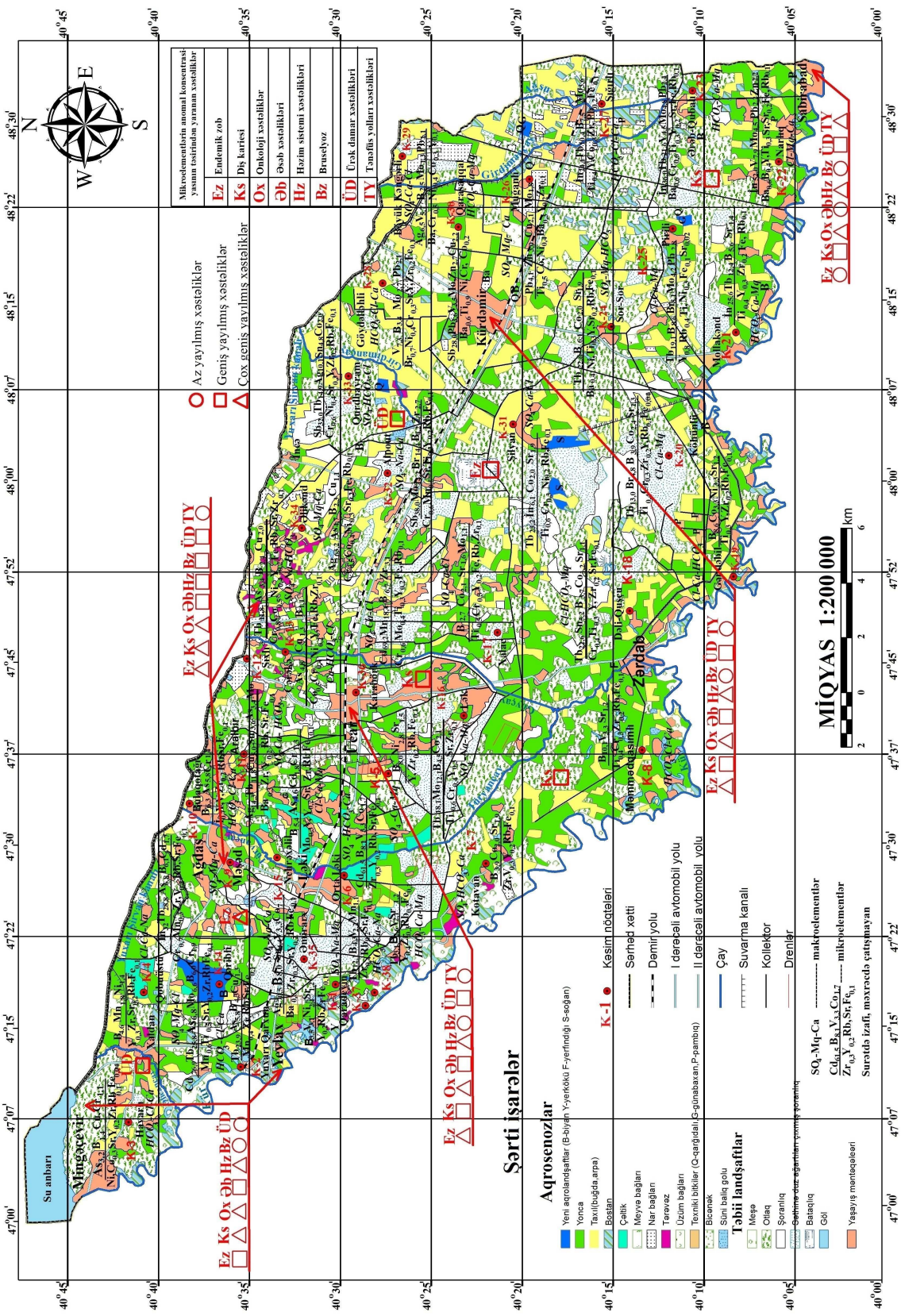
3-cü cədvəl

Şirvan düzü aqrolandşaftlarında bitkilərin tərkibində mikroelmentlərin ümumi miqdarı və bioloji udulma əmsalı K-5, Ucar rayonunun Qaradağlı kəndi

Bitkilər	Mikro-elementlər	Mikroelementlərin %-lə miqdarı		BUƏ
		Külün tərkibində	Torpaqda	
Buğda	B	0,0048	0,0096	0,5
	Fe	0,04928	0,2464	0,2
	Rb	0,00018	0,0018	0,1
	Sr	0,04096	0,0512	0,8
	Y	0,0011	0,0005	2,2
	Zr	0,00145	0,0029	0,5

BUƏ-nin azalma sırası:

$$\frac{Y}{2,2} > \frac{Sr}{0,8} > \frac{B, Sr}{0,5} > \frac{Fe}{0,2} > \frac{Rb}{0,1}$$



2-ci şəkil. Şirvan düzü aqrolandşaftlarının tibbi-ekogeokimyəvi xəritəsi

Tədqiqatlar göstərir ki, aqrolandşaftlar altındakı torpaqların tərkibində izafiliyi ilə seçilən Cd, Pb, B, Tb, İn və s. mikroelementlər KK-nin çox olmasına baxmayaraq, bitkilər tərəfindən zəif mənimsənilir, bu da bitkilərin spesifik xüsusiyyətləri və torpaq mühiti ilə əlaqədardır.

Bitkilərin, heyvanların, xüsusən də insanların sağlam yaşamaları üçün aqrolandşaftların ağır metallar və toksik mikroelementlərlə çirklənmədən qorunması həmişə diqqət mərkəzində olmalıdır. Bu məqsədlə aqrolandşaftların optimallaşdırılması üçün sağlamlaşdırıcı meliorativ tədbirlərin həyata keçirilməsi vacibdir.

ƏDƏBİYYAT

MƏMMƏDOV, Q.Ş., XƏLİLOV, M.Y., MƏMMƏDOVA, S.Z. 2010. Aqroekologiya. Elm. Bakı. 245-248, 356-360.

SALMANOV, M.A, İSMAYILOV, N.M., CƏFƏROV, Ə.M. 2013. Praktiki aqrobioekologiya. Elm. Bakı. 62-64, 65-67.

ŞƏKURİ, B. 2011. Azərbaycan torpaqlarının geokimyəvi xüsusiyyətləri. Elm. Bakı. 18-24, 158-160.

АЛЕКСЕЕНКО, В.А. 2001. Экологическая геохимия. Логос. Москва. 84-86.

ПЕРЕЛЬМАН, А.И. 1989. Геохимия. Недра. Москва. 41 с.

Məqaləyə c.ü.e.d. Y.Ə.Qəribov rəy vermişdir.