



UDK 550.83: 556.3

STUDY OF AQUIFER LAYERS: AN EXAMPLE OF EL-OWEINAT REGION, EGYPT

A. El-Meselhy^{1,2}, G. M. Mitrofanov^{1,3,4}

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia; ²Department of Geophysical Sciences, National Research Centre, Cairo, Egypt; ³A.A.Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia; ⁴Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The analysis of the geological structure of aquifer layers made it possible to solve two important tasks: (1) determination of the aquifer system and groundwater flow, (2) assessment of the well efficiency of existing productive wells. The resulting solution was based on three-dimensional modeling using borehole geophysical data and the involvement of comprehensive information on the development of water resources. The result was new knowledge about the studied aquifer system in its geophysical, geological and field context. It consists in determining: the static water depth and the direction of the main flow, the structure of the aquifer with the distribution of aquifer layers and aquitard layers, basement rocks, as well as the well efficiency and the aquifer loss coefficients. These measures make it possible to increase the well efficiency and managing the process of pumping water from existing wells, as well as to optimize the drilling of new wells in the area under consideration.

Keywords: 3D modeling, structure of groundwater aquifer layers, well logging data, efficiency of wells and development of water resources.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ НА ПРИМЕРЕ ОБЛАСТИ ЭЛЬ-ОВЕЙНАТ ЕГИПЕТ

А. Эль-Меселхи^{1,2}, Г. М. Митрофанов^{3,4}

¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия; ²Национальный исследовательский центр, Департамент геофизики, Каир, Египет; ³Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия; ⁴Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Выполненный анализ геологической структуры водоносных горизонтов позволил обеспечить решение двух важных задач: 1) детализация системы водоносных горизонтов и потока подземных вод, 2) оценка эффективности существующих добывающих скважин. Полученное решение основывалось на трехмерном моделировании, использующем скважинные геофизические данные, и привлечении комплексной информации о разработке водных ресурсов. Результатом стали новые знания об изучаемой системе подземных водоносных горизонтов в ее геофизическом, геологическом и промышленном контексте. Оно состоит в определении статической глубины воды и направлении основного потока, структуры водного горизонта с выделением водных слоев и водоупоров, выходов фундамента, а также эффективности работы скважин и коэффициентов потерь водоносного горизонта. Знания позволяют повысить эффективность управления процессом откачки воды из существующих скважин, а также оптимизировать бурение новых скважин в рассматриваемом районе.

Ключевые слова: 3D моделирование, структура подземных водоносных горизонтов, данные геофизических исследований скважин, эффективность заложения скважин и разработки водных ресурсов.

DOI 10.20403/2078-0575-2022-4-70-84

The problem of the development of groundwater resources is one of the most urgent tasks for mankind. It is of particular importance for countries with arid climates and a significant distribution of deserts. These countries include Egypt. Geological modelling programs are a useful tool in the development of such resources. They allow visualization of aquifer systems and reconstruction of ongoing hydrodynamic processes, which are important for assessment of underground resources and management of groundwater [2, 5, 15, 17, 20].

It should be noted that previous studies have provided significant information about the geological and hydrogeological setting in El-Oweinat area [1, 10, 12]. According to these studies, the main aquifer system in the study area is called the Nubian Sandstone Aquifer System (NSAS), which is described as a “transboundary aquifer” crossing the borders between four countries; Egypt, Libya, Sudan and Chad. A wide range of classi-

cal methods of hydrogeology were used in textbooks and monographs [3, 16, 18]. The main hydrogeological survey methods used in El-Oweinat area are geoelectric survey, magnetic survey and remote sensing.

Therefore, most previous studies have focused on geoelectric and magnetic exploration techniques to delineate subsurface stratigraphic layers of groundwater resources. However, little attention has been paid to the construction of detailed 3D models based on borehole data. With the necessary information, we were able to perform such constructions based on 79 groundwater wells located at a distance of about 1 km from each other. The constructed model provides new information about the deep change of lithostratigraphic layers in the study area. When building the 3D model, we used the Petrel package (Schlumberger Limited) [13].

At this time, there are a significant number of geological and hydrogeological modeling packages. In



addition to the above, these include: Petrosys (Petrosys Pty Ltd), EarthVision (Dynamic Graphics, Inc., USA), GOCAD (Paradigm Geophysical Ltd), Modflow (USGS). The development of software and hardware over the past decade has made it possible to create effective tools for 3D modeling with the possibility of integrating various digital data sets, such as scanned or digitized maps, satellite images, well studies (geophysical, petrophysical) and hydrogeological settings [7–9]. As a result, three-dimensional geophysical/hydrogeological models have become the most effective way to understand and visualize aquifer systems.

Our choice of Petrel package was determined by several reasons. Let us point out three of them, which were decisive for us. The first is related to the possibility of creating a 3D model from multiple sources. For example, when oil companies drill deep wells in the study area, it will be easy to integrate the data obtained into the constructed model. The second is the possibility of 4D modeling implemented in the package. Therefore, the collection of temporal information about the static water depth is very important to determine the fluctuations in water depth over time. The same applies to water pollution processes. Third, the package's ability to work with massive 3D data storage, which allows the model to be significantly extended to the entire El-Oweinat region, which has more than 1600 wells drilled into the aquifer system [16].

In the article, the three-dimensional geophysical/hydrogeological model will be used as a tool to study the target object, which is the aquifer system, and determine the optimal site for drilling new wells. When construction this model, well logging geophysical data, as well as hydrogeological data, were used.

About the objectives of the study

In the study area, a significant problem arises when drilling production wells of groundwater. They breakdown shortly after construction, so decision-makers have no choice but to drill new wells. There are a number of reasons that can cause early failure of water wells. These may include: improper design and construction of the well, the placement and quality of the building material, incomplete development of the well, incrustation formation, corrosion, aquifer problems, over-pumping. The first three of these reasons relate to the expertise of the groundwater well contractor. The next three are related to the characteristics of the aquifer. The last reason is caused by users of groundwater wells.

The cost of building new wells is high, so the question of choosing the best location to drill new wells should be taken seriously. In doing so, the most reliable information about the structure and properties of aquifer system should be available to ensure that the impact on well stability of three of these reasons, incrustation, corrosion and aquifer problems, is reduced.

The main objective of this study is to demonstrate the possibility of choosing the optimal locations for

drilling new wells of groundwater by building a three-dimensional model and visualizing the aquifer system based on the integrated use of the data sets. The constructed model can then be used as a tool for making various decisions, in particular, water pollution, the efficiency of individual wells, etc. We will indicate the following steps as the stages of building the model.

Step 1 – collection and preparation of source well data for its insertion into petrel software.

Step 2 – analysis of the results obtained from the 3D model in order to correlate and analyze the structure of geological horizons.

Step 3 – solving applied problems, which include: analysis of the efficiency of existing production wells and the amount of dissolved substances in the water.

The creation of a three-dimensional geophysical and hydrogeological model can also be used to clarify the geological distribution of lithofacies and the hydrogeological properties of the aquifer system. Such clarification is carried out for existing wells drilled for the purpose of technical extraction of groundwater in the study area. The information obtained is necessary for the optimal selection of the best location for drilling new wells in the future and can be used as a basis for sustainable management and development of water resources production.

Source data and model building

These included well logging data (gamma, SP and resistivity logs), core descriptions and hydrogeological data, which included: pumping tests, especially step drawdown tests, as well as various remote sensing data, such as satellite imagery and digital elevation model (DEM). In order to enter all the used data into the Petrel software, it was necessary to create a geodatabase in the Geographic Information System (GIS). This database allows you to store, process and analyze information about the general geology of the study area, well drilling data, lithological description of rocks and static water depth in various formats and at different scales. In addition to the available parameters, hydrogeological data and aquifer properties were determined by the analysis of pumping tests for all available wells, which were placed in GIS.

Omitting numerous technical details, we will indicate the main stages of building a three-dimensional hydrogeological model.

1. Preparation of GIS database with scanning and importing a geological map into a specialized ArcGIS 10.8 system with its reference to the UTM / WGS84 projection system (zone 35 north latitude); integration of the Landsat image and a digital elevation model (ALOS PALSAR – Radiometric Terrain Correction RTC) with 12.5 m spatial resolution; QC digitization of logging data from 79 groundwater wells and analysis of pump tests.

2. Importation of GIS and hydrogeological data into Petrel software with quality control of the obtained logs.

3. Interpretation of logs and determination of the thickness of sandstone, shale and basement layers based on reliable logging data and description of lithology from core samples for the determination of lithofacies in the study area.

4. Correlation between the well logging data and creation of 2D sections in different directions (for example, east-west and north-south).

5. Creation of spatial maps for various parameters to display the properties and characteristics of an aquifer system in 2D and 3D.

6. Construction of a 3D hydrogeological model for the area under investigation using Petrel software.

The 3D model created in this way can be useful for understanding the groundwater flow direction, groundwater management, and for making decisions on site selection when drilling new wells. To demonstrate these capabilities, here are some simple examples.

One of the first results obtained after the creation of the geodatabase was a digital elevation model (ALOS PALSAR) with a spatial resolution of 12.5 m, shown in Figure 1. This indicates that the study area is an almost flat area, which is a good area for agricultural activities and drilling groundwater wells.

As a result of the interpretation, the dominant stratigraphic unit in the study area is an aquifer of sand-

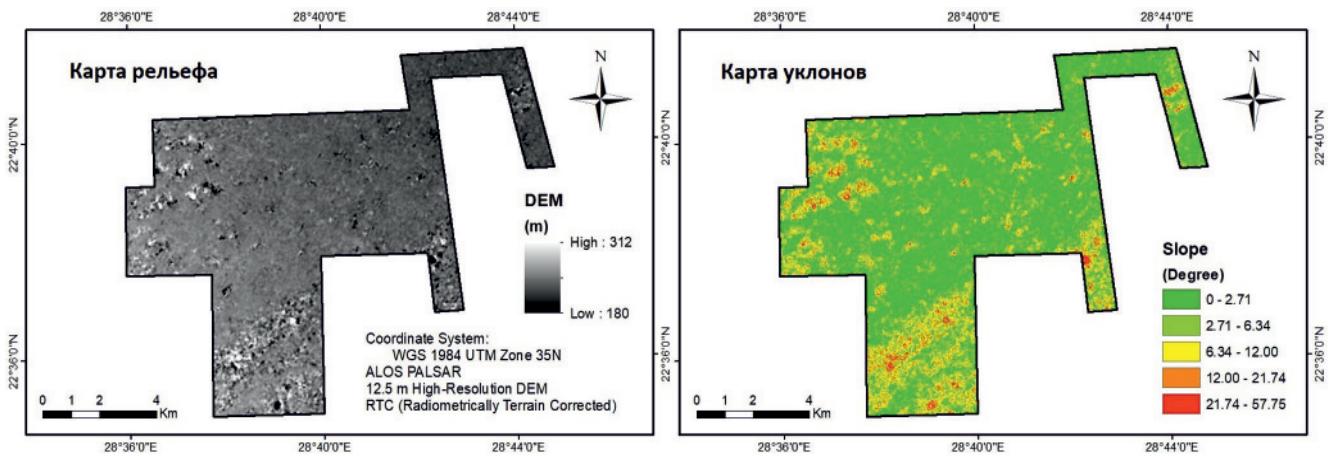


Fig. 1. Constructed digital elevation model and slope = Цифровые модели рельефа и уклона

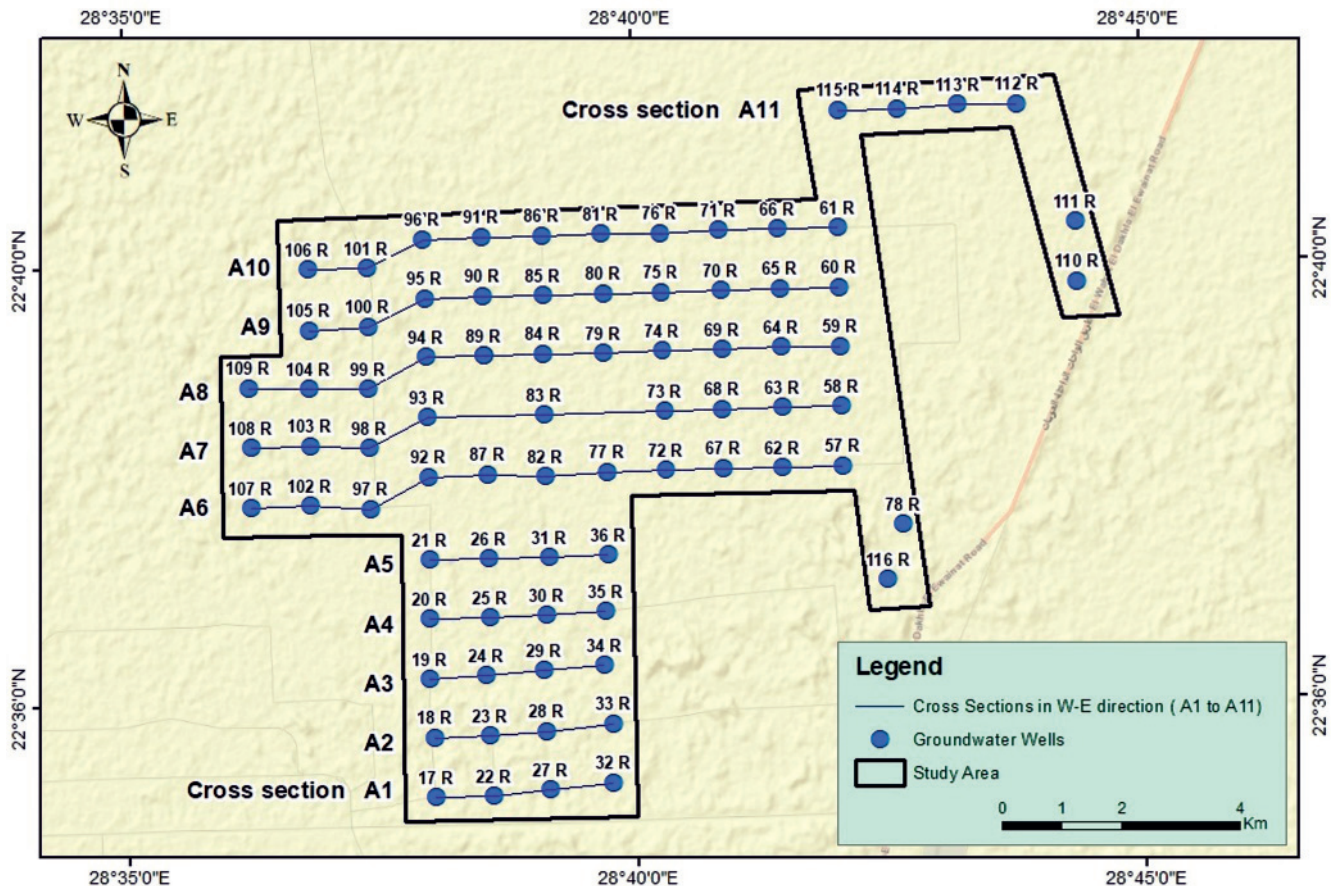


Fig. 2. Locations of 11 cross-sections (from A1 to A11) in a west-east direction within the study area = Расположение 11 поперечных сечений (от A1 до A11) в направлении запад – восток в пределах изучаемой территории

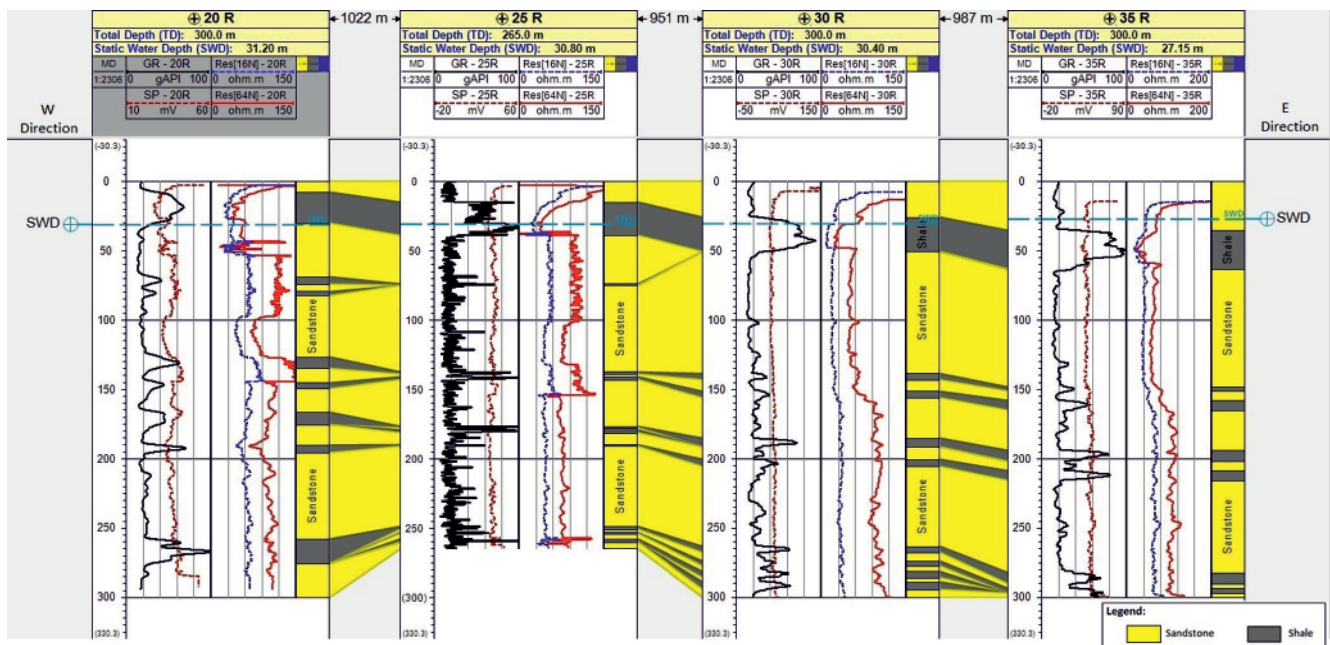


Fig. 3. Correlation of borehole geophysical data for section A4 = Корреляция скважинных геофизических данных для сечения A4

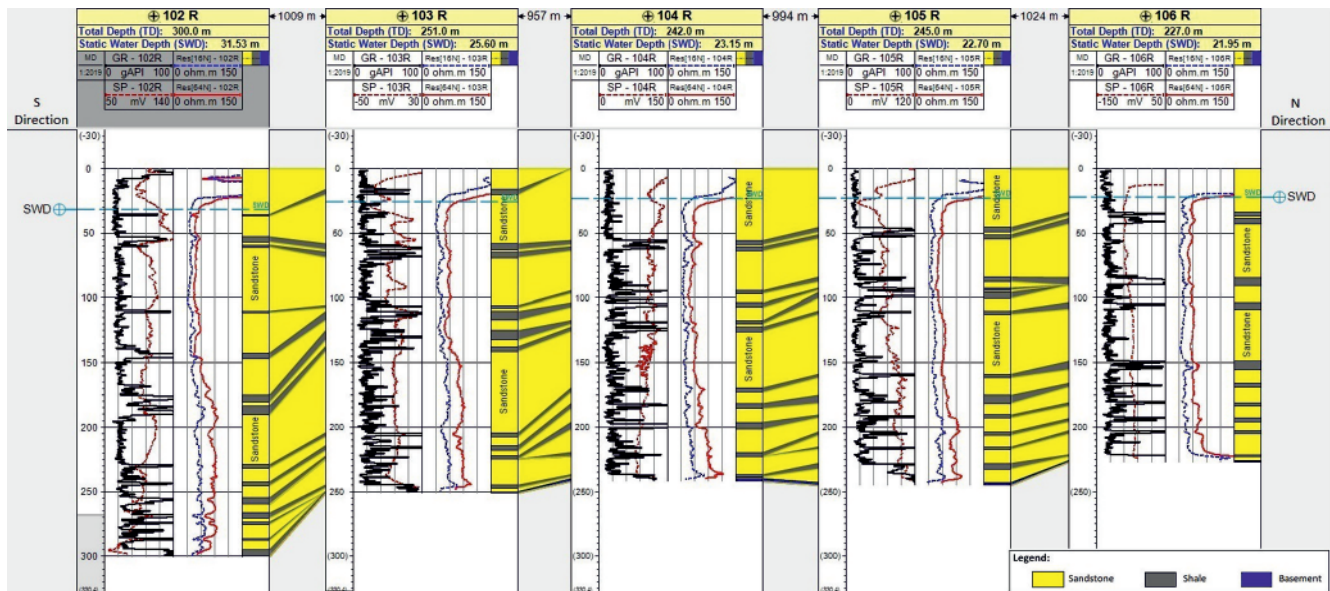


Fig. 4. Correlation of borehole geophysical data for cross-section B2 = Корреляция скважинных геофизических данных для сечения B2

stone with thin shale layers. According to the results of geophysical observations, it has high values of gamma ray, which is explained by the presence of radioactive materials in shale layers.

To visualize the distribution of lithostratigraphic layers within the study area, 23 sections or cross-sections were constructed, which show the correlation of geological layers determined from borehole geophysical data. The first 11 sections are built in a west-east direction, labeled from A1 to A11 (Figure 2). At the same time, the distance between the wells was about 1 km. The second 12 cross-sections were created in the north-south direction. They are labeled from B1 to B12. Below, as examples of the correlation performed, two cross-sections are presented: A4 (Figure 3) and B2 (Figure 4).

The cross section A4, shown in Figure 3, extends for about 3 km and encounters four groundwater wells, which are labeled: 20R, 25R, 30R and 35R, respectively, and with a distance of about 1 km between the wells.

During the interpretation of well log data in the third stage of model building, the thicknesses of aquifer (e.g., sandstone) and aquitard layers (e.g., shale) were determined. Therefore, another important practical result was obtained, related to the total thickness of the two types of layers along the section. In particular, the total thickness of the aquifers for wells: 20R, 25R, 30R, 35R is 224.2 m, 225.9 m, 236.2 m, 235. m, respectively; the thickness of the aquitards is 75.7 m, 39.0 m, 63.8 m, 64.75 m, respectively. The static water depth (SWD) for each of these wells was 31.2 m, 30.8 m, 30.4 m, 27.15 m, respectively, which indicates



Table 1

The top of the basement and the thickness of the layers along the cross-section B2

Well Name	Top of Basement (m)	Total Depth (m)	Aquifer thickness (m)	Aquitard thickness (m)	Static Water Depth (m)
102R	–	300.00	251.06	48.94	31.53
103R	250.00	251.00	205.93	44.07	25.60
104R	240.00	242.00	203.66	36.34	23.15
105R	243.00	245.00	203.42	39.58	22.70
106R	226.00	227.00	188.44	37.56	21.95

the predominant groundwater flow in west direction from high to lower level of SWD with a depth difference of 4 m between wells 35R and 20R.

To solve the main problem, it is important to increase the total thickness of the aquifers and reduce the thickness of the aquitards not only at the points of already drilled wells, but also in the areas of the proposed drilling of new wells. This makes it possible to install a large length of screen pipes in front of the sandstone layers to obtain the required amount of groundwater used in agricultural activities.

The geological cross-section B2 (Figure 4) is one of 12 north-south cross-sections. This cross-section extends for 4 km and passes through five groundwater wells, which are located from south to north; 102R, 103R, 104R, 105R and 106R, respectively, with a well distance of about 1 km.

This cross section contains groundwater wells 103R–106R (Table 1, Figure 4). These wells penetrate the Upper Cretaceous Nubian sandstones aquifer system and penetrate into the Precambrian basement rocks. The presence of basement rocks is confirmed by the description of core samples taken during the drilling process.

The results presented in Figure 4 show the horizontal and vertical distribution of the lithostratigraphic layers of the aquifer in the north-south direction of the study area. The total depth of the 102R well reaches 300 m, while other wells could not reach this depth as planned due to the presence of basement rocks, which is considered a bad location to drill groundwater wells, as shown below.

Spatial Analysis of Modeling Results

The Petrel package was used to construct 2D and 3D visualizations of the properties and characteristics of the aquifer in the study area. In particular, it made it possible to study the static depth of water (SWD) within the study area, which is one of the most important factors that can be used in choosing the best site to drill new wells.

According to Figure 5, the static water depth (SWD) has quite significant variations and a complex structure in the study area. The SWD changes from a maximum value of 38.6 m in well 17R in the southwest and a minimum value of 13.8 m in well 114R in the northeastern part of the region with an average value of 24.5 m. The presented three-dimensional and two-

dimensional visualization views of SWD show that the direction of groundwater flow has a fairly prominent direction from the northeast to the deepest points of the SWD in the southwest.

The direction of groundwater flow is a very important environmental factor in choosing the best location for drilling wells. The well should be located at minimum values of static water depth so that contamination from any source moves away from the well and not towards the well. Also, to decide where to drill a well, it will be better to locate the well uphill in shallow static water depth for economic reasons. Usually, a deeper water level inside a well requires more pipes and a powerful submersible pump with high mechanical power to lift water from the well to the surface, which can lead to an increase in the cost of water production.

The combination of three-dimensional visualization modeling of lithostratigraphic layers and static water depth (Figure 6) can be used to understand the direction of groundwater flow controlled by the subsurface structure and stratigraphic sequence of aquifer layers. In the study area, the groundwater flow direction and the static water depth depend on the structure of the basement more than on the change in the lithostratigraphic layers.

For example, in cross-section B2 (Figure 4), especially at the bottom of well 102R, it can be assumed that there is a fault in the bottom between wells 102R and 103R. The assumption is justified by the fact that basement rocks appear in wells 103R, 104R, 105R, 106R. This indicates that in the area of these wells there was a sharp rise in the basement. The depth to the basement in these wells was 250 m, 240 m, 243 m and 226 m, respectively (Table 1). In well 102R, drilling continued without penetrating the basement rocks to a total depth of 300 m. Consequently, this uplift and the inferred fault, surrounding it, affected the direction of groundwater flow and the SWD. The static water depth was 21.95 m in well 106R in the north direction, and in the south in well 102R, the static water depth reached 31.53 m. Thus, in this cross-section, the flow direction is considered to be in south direction from the high level of SWD to the lowest depth in the well 102R, which is affected by the structure. Unfortunately, we do not have enough regional geological data to delineate in detail all the structures in the study area.

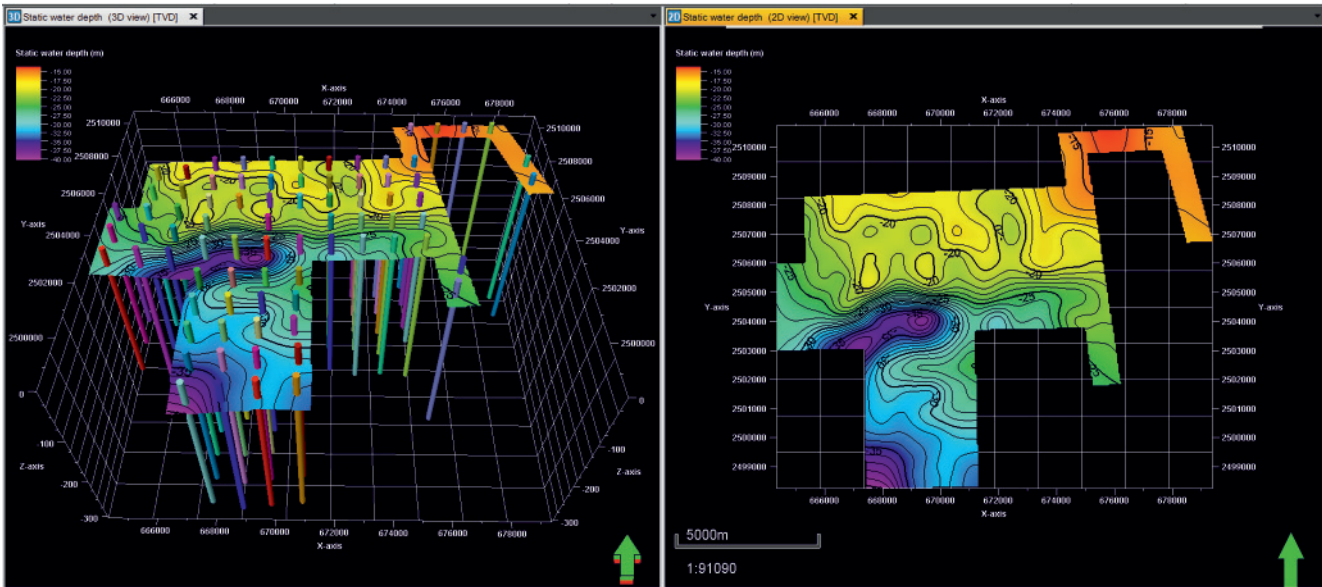


Fig. 5. 3D and 2D visualization of the static water depth in the study area = 3D и 2D визуализация статической глубины воды в изучаемой области

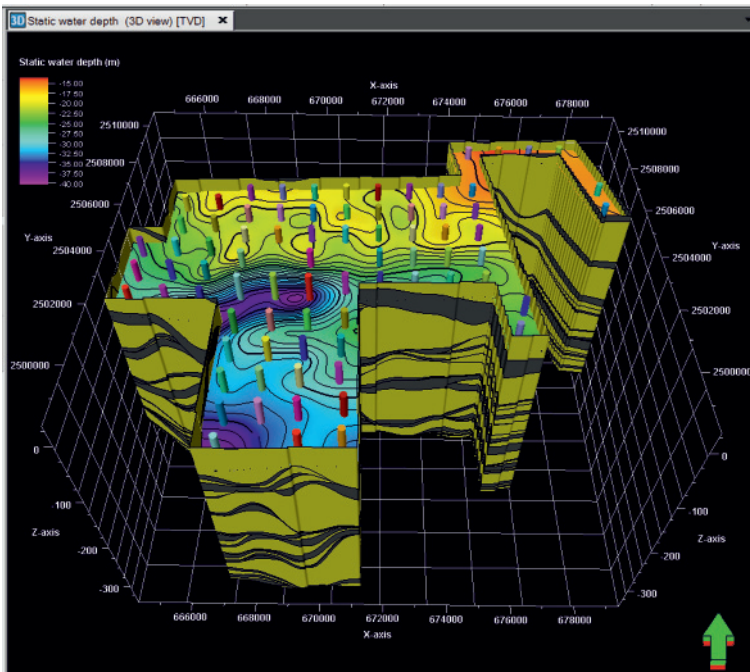


Fig. 6. 3D visualization of lithostratigraphic layers and static water depth in the study area = 3D визуализация литостратиграфических слоев и статической глубины воды в изучаемой области

Another important result obtained from the modeling is the total thickness of the aquifer and its structure in the entire area of study. Characteristics such as the SWD value have a significant impact on the selection of the best site or location for drilling new wells. As the total thickness of an aquifer increases, the feasibility of selecting the site increases because sandstone layers can serve as an aquifer layer of groundwater and it supply sufficient water. This is important for achieving a specific goal and obtaining an economically significant amount of water from a groundwater well.

Increasing the thickness of the aquifer makes it possible to install more screen pipes (e.g., PVC screens) inside the well in front of the sandstone layers, which result in groundwater being drawn from the adjacent layers after filtering the water by the gravel packing.

In the present study, the total thickness of the aquifer of discontinuous sandstone layers in each well of 79 groundwater wells was calculated based on all constructed sections (see Sec. 2) and integrated into the geodatabase.

According to the obtained results, the total thickness of aquifers in the study area (Figure 7a) ranges from 269.48 m in well 74R to 184.00 m in well 101R in the northwest direction with an average thickness of 232.26 m. A significant fluctuation in the thickness of the aquifers is affected by the change in the total depth of the wells, which is strongly influenced by the appearance of the basement rocks in the bottom of some wells. For example, a sharp decrease in the thickness of the entire aquifer occurs in the northwest direction in wells 101R and 106R, which is associated with a decrease in the total depth of the wells and the appear-

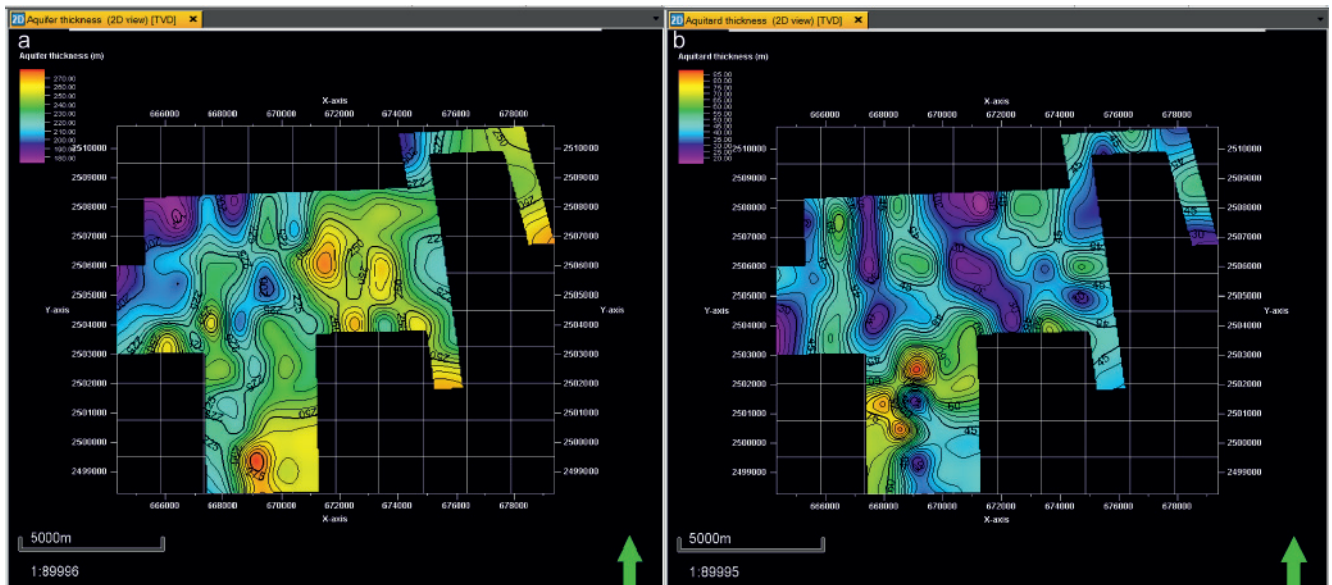


Fig. 7. Thickness maps for: (a) aquifers and (b) aquitards in the study area = Карты мощности водоносных слоев (а) и водоупоров в изучаемой области (б)

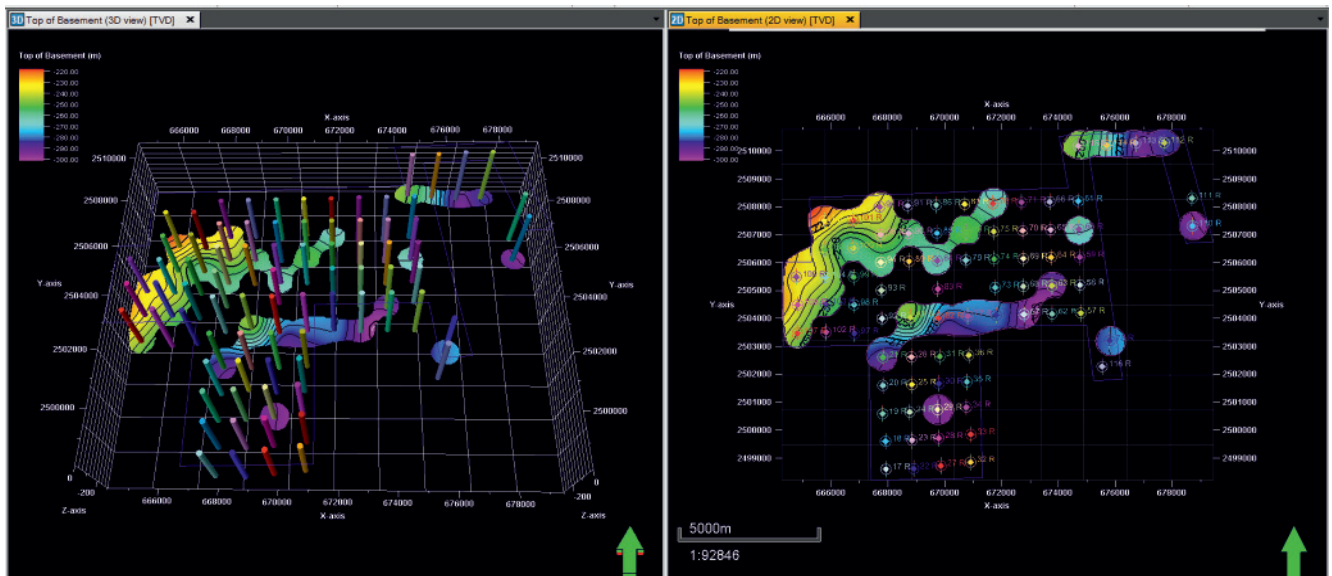


Fig. 8. 3D and 2D visualization for the top of basement rocks in the study area = 3D и 2D визуализация выходов пород фундамента в изучаемой области

ance of basement rocks at the bottom of these wells at depths of 238 m and 226 m, respectively.

When changing the ratio of the total thickness of the aquifers and aquitards (Figure 7), one should carefully choose the location for drilling. The disadvantages of aquitard layers in the design of wells are the shale layers, which supply the well with fine sediments and over time can block slots in the screen pipes, which will lead to their destruction under pressure.

According to the obtained results, the total aquitard thickness in the study area (Figure 7b) ranges from 78.52 m in well 26R to 22.59 m in well 8 R with an average aquitard thickness of about 43.90 m throughout the study area. The increase in the aquitard thickness is partially due to the decrease in the total thickness and the decrease in the aquifer thickness.

When determining areas where there is a high probability of successful drilling of groundwater wells,

it is necessary to take into account the relief of the basement rocks (Figure 8). Favorable areas for drilling wells are those where there is a high probability of successfully penetrating aquifer layers or aquifer systems. It is a waste of time and money to drill a well in the basement rocks, as mentioned above.

The present study showed that the basement rocks (Figure 8) were found at the bottom of 32 groundwater wells. This was confirmed by analyzing core samples obtained during the drilling process. Thus, according to the results of this study, it is strongly recommended not to drill any wells near these areas if the existing wells fail. Re-drilling in such areas would not be economically profitable.

The analysis shows that the drilling total depth in the study area varies from 306 m in well 23R to 227 m in well 106R with an average total depth of about 277 m. Increasing the total depth is very important for

two reasons. First, it is necessary to install upper galvanized steel casing, which is used to place a submersible pump to uplift the groundwater to the surface. The second reason is to install PVC screen pipes and blank pipes of sufficient length to withdraw a high quantity of groundwater that can be used in agricultural activities and domestic purposes.

Analysis of well efficiency results

Determining the efficiency of a groundwater well is important because it indicates how freely the well allows groundwater to pass through the well screen

29.91%, 38.27% in wells. 63R, 96R, 65R, 104R, 101R, 77R, 33R, and 21R, respectively. These very low well efficiency values are attributed to the consequences of insufficient well development or inadequate well design and construction. Thus, this can lead to failure or breakdown of these wells shortly after construction, as described in the first section of the article.

The second important point about well performance is the water salinity or the total dissolved solids, which can seriously affect agricultural projects and domestic purposes, that will be established depending on groundwater resources.

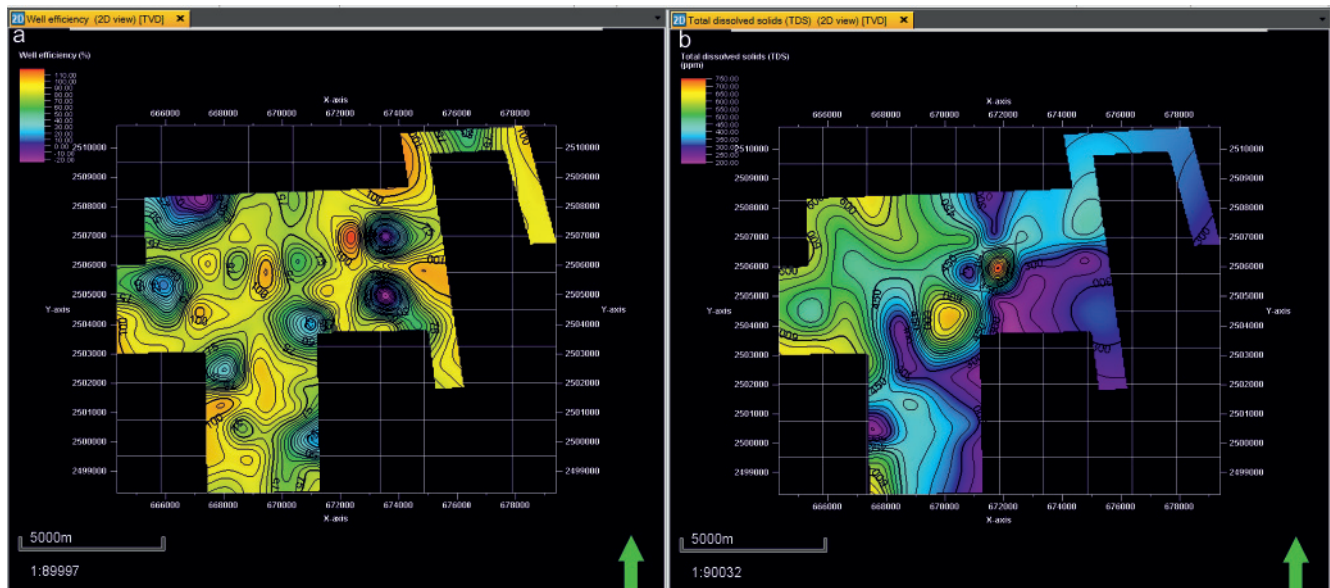


Fig. 9. Maps: (a) well efficiency (b) total dissolved solids in the study area = Карты эффективности скважин (a) и общего количества растворенных твердых веществ в изучаемой области(б)

pipes (e.g., PVC screen) or perforations. The efficiency of a pumped well is calculated as the ratio of laminar head loss (aquifer loss) to total head loss [11, 18]. The efficiency of a pump well expresses the relationship between the theoretical drawdown outside the well and the actual/measured drawdown inside the well [6]. Consequently, the efficiency of a well can be determined by analyzing the step drawdown tests that are performed inside the borehole at the last stage of drilling the well without using observation wells. The efficiency of a well can be calculated from the following equation:

$$\text{Well efficiency (\%)} = \frac{BQ}{(BQ + CQ^2)} \cdot 100, (1)$$

where (BQ) is the aquifer loss or laminar head loss (m), (CQ²) is the well loss or turbulent head loss (m), (BQ + CQ²) is the total head loss (m), and (Q) is the discharge rate (m³/hr).

In this study, the well efficiency (Figure 9a) was determined for all analyzed groundwater wells in the study area using the above equation (1). The safe yield for most groundwater wells in the study area is achieved at a discharge rate of Q 250 m³/h (RIGW, 2008). The well efficiency reached a maximum value of 95.91% at well 66 R, while the minimum well efficiency was 3.85%, 8.76%, 9.91%, 16.67%, 20.56%, 25.74%,

Table 2

Classification of water based on TDS [14]

Classification	TDS (mg/l)
Fresh water	0 to 1000
Brackish water	1000 to 10,000
Saline water	10,000 to 100,000
Brine	Greater than 100,000

The total dissolved solids (TDS) is the total amount of organic and inorganic materials in the solution contained in a sample of water. The general groundwater classification system based on total dissolved solids can be described in four classes as shown in Table 2.

In this study area, the total dissolved solids (Figure 9b) ranges from 690 mg/l in well 74R to 230 mg/l in well 67R. Consequently, based on the previous classification (Table 2) and according to Chebotarev’s classification for salinity [3], the groundwater in the study area is classified as fresh water, which ranges from 0 to 1000 mg/l.

Conclusion

The study showed that the combination of a 3D model and the identification of lithostratigraphic layers with aquifer properties provided a better under-

standing of the aquifer system in the study area and can help in making various decisions regarding the development of water resources. The aquifer properties and characteristics that had been determined include: static water depth, the total thickness of the aquifer and aquitard, the depth of basement, aquifer and well loss coefficients, well efficiency and total dissolved solids (TDS). For example, increasing the total thickness of the aquifer (e.g., sandstone layers) and shallow static water depths are considered to be the best locations for drilling new wells. Moreover, the horizontal and vertical distribution of lithofacies can help to estimate the well design and how to place the screen pipes and the blank pipes into the borehole.

Based on the results of this study, it is highly recommended not to drill any groundwater wells near the 32 wells shown in Figure 8, even if these wells break down or fail. Because the basement rocks are found at the bottom of these wells, as demonstrated by mapping the top of basement rocks in the study area.

As a result of this study, due to the decrease of the well efficiency values at wells: 21R, 33R, 63R, 65R, 77R, 96R, 101R, 104R. It is highly recommended to perform air development stage and pump development stage in order to increase the well efficiency of these wells and avoid their destruction or failure over time [14]. Because these stages of well development are considered to be a procedure used to maximize the well yield. They are also effective for repairing formation damage caused by drilling and altering the physical characteristics of the aquifer near the borehole to improve the flow of groundwater to the well and increase the volume of water pumped out of the existing wells.

Acknowledgment

The researcher Ahmed El-Meselhy is funded by scholarship No. EGY 6827/19 under the joint executive program between the Ministry of Higher Education of the Arab Republic of Egypt and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. The authors are grateful to the Department of Geophysics of Novosibirsk State University for the opportunity to conduct research on the basis of a laboratory equipped with the latest version of Petrel software. They are also grateful to Schlumberger for giving the opportunity for the researcher El-Meselhy to take several online courses to learn and practice on Petrel software.

REFERENCES

1. Al Temamy A., Barseem M. Structural impact on the groundwater occurrence in Nubia sandstone aquifer using geomagnetic and geoelectrical techniques, Northwest Bir Tarfawi, East El Oweinat area, Western Desert. *Egyptian Geophysical Society EGS Journal*, 2010, vol. 8, no. 1, pp. 47–63.
2. Apel M. From 3D geomodelling systems towards 3D geosciences information systems: data mod-

el, query functionality and data management. *Comput. Geosci.*, 2006, vol. 32, pp. 222–229.

3. Chebotarev I.I. Metamorphism of natural waters in the crust of weathering. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1955, vol. 8, pp. 22–212.

4. Fetter C.W. Applied hydrogeology, 4th ed. Upper Saddle River, Printice Hall, 2001. 598 p.

5. Kazakis N., Chalikakis K., Mazzilli N., et al. Management and research strategies of karst aquifers in Greece: literature overview and exemplification based on hydrodynamic modelling and vulnerability assessment of a strategic karst aquifer. *Sci. Total Environ*, 2018, iss. 643, pp. 592–609. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.184>.

6. Kruseman G.P., de Ridder N.A. Analysis and evaluation of pumping test data. Wageningen, The Netherlands, International Institute for Land Reclamation and Improvement, 2nd ed. (completely revised), 1990. 377 p.

7. Mallet J.-L. GOCAD: A computer aided design program for geological applications. K. A. Turner, (Ed.), *Proc. NATO Conference on Three-dimensional modeling with geoscientific information systems*, 1992, pp. 123–142.

8. Mallet J.-L. Geomodelling. Applied Geostatistics. *Oxford University Press*, 2002.

9. Mallet J.-L. Geomodelling: Shared-Earth-Model and SGrids. *2003 gOcad Consortium Report*, Nancy School of Geology, Nancy, France, 2003.

10. Masoud M., Schneider M., Osta M.M. Recharge flux to the Nubian Sandstone aquifer and its impact on the present development in southwest Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 2013, vol. 85, pp. 115–124.

11. Mogg J.L. Step-drawdown test needs critical review. *Ground Water*, 1969, vol. 7, iss. 1, pp. 28–34.

12. Nour S. Groundwater potential for irrigation in the East Oweinat area. *Western Desert Egypt. Geo*, 1996, vol. 27, pp. 143–154.

13. Petrel Software Manual. *Schlumberger Information Solutions*, 2017.

14. Poehls D.J., Gregory J.S. Encyclopedic Dictionary of Hydrogeology. *Academic Press, an imprint of Elsevier*, USA, 2009. 517 p.

15. Price S.J., Terrington R.L., Busby J., et al. 3D ground-use optimization for sustainable urban development planning: a case-study from Earls Court. London. UK. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, 2018, vol. 81, pp. 144–164. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.06.025>.

16. Sawsan I. Effects of groundwater over-pumping on the sustainability of the Nubian Sandstone Aquifer in East-Oweinat Area, Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 2019, vol. 8, pp. 117–130.

17. Song L.X., Xiao K., Li S., et al. Part II: A demonstration of integrating multiple-scale 3D modelling into GIS-based prospectivity analysis: a case study of the Huayuan-Malichang district, China. *Ore Geol. Rev.*, 2018, vol. 95, pp. 292–305. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.02.034>.



18. Todd D.K. Groundwater Hydrology. John Wiley, New York. 2nd ed., 1980. 535 p.

19. Vsevolozhsky V. Fundamentals of Hydrogeology: Textbook. 2nd ed. Moscow, State University Publ., 2007. 448 p. (In Russ.).

20. Zhu L., Zhang C., Li M., et al. Building 3D solid models of sedimentary stratigraphic systems from bore-hole data: an automatic method and case studies. *Eng. Geol.*, 2012, vol. 127, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.12.001>.

© A. El-Meselhy, G. Mitrofanov, 2022

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ НА ПРИМЕРЕ ОБЛАСТИ ЭЛЬ-ОВЕЙНАТ, ЕГИПЕТ

Проблема разработки подземных водных ресурсов является одной из актуальных для человечества. Особое значение она приобретает для стран с засушливым климатом и значительным распространением пустынь. К таким странам относится Египет. При разработке этих ресурсов полезный инструмент – программы геологического моделирования. Они позволяют визуализировать системы водоносных горизонтов и проводить реконструкцию протекающих гидродинамических процессов, что важно для оценки ресурсной базы и управления подземными водами [2, 5, 15, 17, 20].

Отметим, что в результате предыдущих исследований была получена значительная информация о геологической и гидрогеологической обстановке в районе Эль-Овейнат [1, 10, 12]). Основная система водоносных горизонтов в изучаемой области называется системой водоносных горизонтов нубийских песчаников (NSAS) и описывается как «трансграничный водоносный горизонт», пересекающий границы между четырьмя странами: Египтом, Ливией, Суданом и Чадом. При изучении использовался широкий спектр классических методов гидрогеологии, изложенных в учебниках и монографиях [3, 16, 18]. Основными методами гидрогеологической разведки в районе Эль-Овейнат являются геоэлектрическая съемка, магнитная съемка и дистанционное зондирование.

Таким образом, большинство предыдущих исследований было сосредоточено на применении геоэлектрических и магниторазведочных методов для оконтуривания подповерхностных стратиграфических единиц, имеющих отношение к подземным водным ресурсам. При этом мало внимания уделялось построению детальных 3D-моделей на основе скважинных данных. Обладая необходимой информацией, мы смогли выполнить такие построения по 79 скважинам, расположенным на расстоянии около 1 км друг от друга. Построенная модель дает новую информацию о глубинном изменении литостратиграфических слоев в районе исследования. При построении 3D-модели нами использовался пакет Petrel (Schlumberger Limited) [13].

К настоящему времени существует значительное число пакетов геологического и гидрогеологического моделирования. Кроме указанного, к ним относятся Petrosys (Petrosys Pty Ltd), EarthVision (Dynamic

Graphics, Inc., США), GOCAD (Paradigm Geophysical Ltd), Modflow (USGS). Развитие программного и аппаратного обеспечения за последнее десятилетие позволило создать эффективные средства для 3D-моделирования с возможностями интеграции различных цифровых наборов данных, таких как сканированные или оцифрованные карты, спутниковые изображения, исследования скважин (геофизических, петрофизических) и гидрогеологических обстановок [7, 8, 15]. В результате трехмерные геофизические/гидрогеологические модели стали наиболее эффективным способом понимания и визуализации системы подземных водоносных горизонтов.

Выбор нами пакета Petrel определялся несколькими причинами. Укажем на три из них, которые стали для нас определяющими. Первая связана с возможностью создания 3D-модели из нескольких источников. Например, при бурении нефтяными компаниями глубоких скважин в исследуемом районе будет несложно интегрировать полученные данные в построенную модель. Вторая – реализованная в пакете возможность 4D-моделирования. Поэтому сбор временной информации о статической глубине воды очень важен для определения колебаний глубины воды во времени. Это же относится и к процессам загрязнения воды. Третья – имеющаяся в пакете возможность работы с массивными хранилищами 3D-данных, которая позволяет существенно расширять модель на весь регион Эль-Овейнат, где имеется более 1600 скважин, пробуренных на водоносные горизонты [16].

В статье трехмерная геофизическая/гидрогеологическая модель используется в качестве инструмента для изучения целевого объекта, которым являлась система водоносных горизонтов, и определения оптимального участка для бурения новых скважин. При ее построении использовались материалы геофизических исследований скважин, а также гидрогеологические данные.

О задачах исследования

В изучаемом районе при бурении добывающих скважин с грунтовыми водами возникает существенная проблема. Воды прорываются вскоре после строительства, поэтому лицам, принимающим решения, ничего не остается, кроме как бурить новые



скважины. Существует ряд причин, которые могут вызвать преждевременный отказ водяных скважин: неправильное проектирование и строительство скважины, положение и качество строительного материала, неполное освоение скважины, образование корки, коррозия, проблемы водоносного горизонта, перекачка. Первые три причины связаны с производственным опытом подрядчика, выполняющего разработку подземных вод, следующие три определяются характеристиками водоносного горизонта, а последняя вызвана пользователями скважин с грунтовыми водами.

Учитывая высокую стоимость строительства новых скважин, к вопросу выбора наилучшего места для бурения новых скважин следует относиться серьезно. При этом следует иметь наиболее достоверную информацию о структуре и свойствах водоносных горизонтов, чтобы гарантировать уменьшение влияния на срок службы и эффективность скважин трех из указанных причин – наращивание корки, коррозия и проблемы водоносного горизонта, связанные с его характеристиками.

Основная задача настоящего исследования – продемонстрировать возможность выбора оптимальных мест для бурения новых скважин с грунтовыми водами путем построения трехмерной модели и визуализации системы водоносного горизонта на основе комплексного использования набора данных. Построенная модель в дальнейшем может быть использована в качестве инструмента для принятия различных решений, в частности относительно загрязнения воды, эффективности работы отдельных скважин и пр. В качестве этапов построения модели укажем следующие шаги.

Шаг 1 – сбор и подготовка исходной скважинной информации для ее введения в программное обеспечение (ПО) Petrel.

Шаг 2 – анализ результатов, полученных по 3D-модели с целью корреляции и анализа структуры геологических горизонтов.

Шаг 3 – решение прикладных задач (анализ эффективности существующих добывающих скважин и количество растворенных веществ в воде).

Создание трехмерной геофизической и гидрогеологической модели может быть также использовано для уточнения геологического распределения литофаций и гидрогеологических свойств системы водоносных горизонтов. Такое уточнение выполняется по существующим скважинам, пробуренным с целью промышленной добычи подземных вод в изучаемом районе. Полученная информация необходима для оптимального выбора наилучшего места бурения новых скважин в будущем и может быть использована в качестве основы для устойчивого управления и развития добычи водных ресурсов.

Исходные данные и построение модели

Исходными данными были данные каротажа скважин (гамма-каротаж, SP и каротаж сопротив-

ления), описания керна и гидрогеологические материалы (испытания откачки, особенно испытания ступенчатой депрессии), а также различные данные дистанционного зондирования, например, спутниковые снимки и цифровая модель рельефа (ЦМР). Для введения всех используемых данных в ПО Petrel потребовалось создание базы геоданных в географической информационной системе (ГеоИС). Эта база позволяет хранить, обрабатывать и анализировать информацию об общей геологии изучаемой области, данных бурения скважин, литологическом описании пород и статической глубине воды в различных форматах и в разных масштабах. Кроме имеющихся параметров, путем анализа испытаний откачки для всех скважин были определены гидрогеологические данные и свойства водоносного горизонта, которые помещались в ГеоИС.

Опуская многочисленные технические детали, укажем основные этапы построения трехмерной гидрогеологической модели.

1. Подготовка базы данных ГеоИС со сканированием и импортированием геологической карты в специализированную систему ArcGIS 10.8 с ее привязкой к проекционной системе UTM/WGS84 (зона 35 северной широты), интегрирование изображения Landsat и цифровой модель рельефа (ALOS PALSAR – Radiometric Terrain Correction RTC) с пространственным разрешением 12,5 м, оцифровка с помощью QC данных каротажа по 79 скважинам с подземными водами и анализом насосных испытаний.

2. Импорт данных ГеоИС и гидрогеологических данных в ПО Petrel с контролем качества полученных каротажных диаграмм.

3. Интерпретация каротажных диаграмм и определение толщины песчаника, глинистого сланца и слоев фундамента на основе надежных каротажных диаграмм и описания литологии по образцам керна для определения литофаций в исследуемой области.

4. Корреляция между данными ГеоИС и создание разрезов 2D в разных направлениях (например, восток – запад и север – юг).

5. Создание пространственных карт для различных параметров для отображения свойств и характеристик системы водоносного горизонта в 2D и 3D.

6. Построение 3D гидрогеологической модели для области изучаемого участка с использованием ПО Petrel.

Созданная таким образом 3D-модель может быть полезна для понимания направления потока грунтовых вод, управления грунтовыми водами и для принятия решений по выбору мест при бурении новых скважин. Для демонстрации этих возможностей приведем несколько простых примеров.

Одним из первых результатов, полученных после создания базы геоданных, была цифровая мо-



Таблица 1

Верхняя часть фундамента и толщины слоев по поперечному сечению В2

Скважина	Кровля фундамента, м	Общая глубина, м	Мощность водоносного слоя, м	Толщина водоупоров, м	Статическая глубина воды, м
102R	–	300,00	251,06	48,94	31,53
103R	250,00	251,00	205,93	44,07	25,60
104R	240,00	242,00	203,66	36,34	23,15
105R	243,00	245,00	203,42	39,58	22,70
106R	226,00	227,00	188,44	37,56	21,95

дель рельефа (ALOS PALSAR) с пространственным разрешением 12,5 м, представленная на рис. 1. Она свидетельствует, что изучаемый район представляет собой почти ровную территорию, являющуюся хорошей областью для сельскохозяйственных работ и бурения скважин с грунтовыми водами.

В результате интерпретации преобладающая стратиграфическая единица в исследуемой области – водоносный горизонт песчаника с прослоями тонких сланцев. По результатам геофизических наблюдений он имеет высокие значения гамма-каротажа, что объясняется присутствием радиоактивных материалов в слоях сланца.

Для визуализации прослеживаемости литостратиграфических слоев в пределах исследуемой области были построены 23 разреза или поперечных сечения, которые показывают корреляцию геологических горизонтов, определяемых по скважинным геофизическим данным. Первые 11 разрезов построены в направлении с запада на восток и обозначены как А1–А11 (рис. 2). При этом расстояние между скважинами составляло около 1 км. Вторые 12 поперечных сечений были созданы в направлении с севера на юг (В1–В12). Как примеры выполненной корреляции представлены два поперечных сечения: А4 (рис. 3) и В2 (рис. 4).

Поперечное сечение А4 (см. рис. 3) простирается примерно на 3 км и пересекает четыре скважины с грунтовыми водами (20R, 25R, 30R и 35R); расстояние между скважинами около 1 км.

В процессе интерпретации данных каротажа скважин на третьем этапе построения модели были определены толщины водоносных слоев (например, песчаника) и водоупорных слоев (например, сланца). Таким образом, был получен еще один важный практический результат, относящийся к общей мощности двух типов слоев по разрезу. В частности, общая мощность водоносных слоев для скважин 20R, 25R, 30R, 35R составляет 224,2 м, 225,9 м, 236,2 м, 235,2 м соответственно; толщина водоупоров – 75,7 м, 39,0 м, 63,8 м, 64,75 м соответственно; статическая глубина воды (SWD) – 31,2 м, 30,8 м, 30,4 м, 27,15 м соответственно, что указывает на преимущественное западное направление потока грунтовых вод от высокого уровня до низшего с перепадом глубин SWD в 4 м между скважинами 35R и 20R.

Для решения основной задачи важно увеличение общей толщины водоносных слоев и уменьше-

ние толщины водоупоров не только в точках уже пробуренных скважин, но и в областях предполагаемого бурения новых скважин. Это дает возможность установить большую длину экранных труб перед слоями песчаника для получения необходимого количества подземных вод, используемых в сельскохозяйственной деятельности.

Геологическое поперечное сечение В2 (см. рис. 4) – одно из 12 поперечных сечений в направлении север–юг, простирается на 4 км и проходит через пять скважин с грунтовыми водами: 102R, 103R, 104R, 105R и 106R с расстоянием между ними около 1 км.

Этот поперечный разрез содержит скважины с грунтовыми водами 103R–106R (табл. 1, см. рис. 4). Они вскрывают водоносные горизонты нубийских песчаников верхнего мела и проникают в выступающие докембрийские породы. Наличие пород фундамента подтверждено описанием образцов керна, отобранных в процессе бурения.

Результаты, представленные на рис. 4, показывают горизонтальное и вертикальное распределение литостратиграфических слоев водоносного горизонта в направлении север–юг исследуемой области. Общая глубина скв. 102R достигает 300 м, но другие скважины не смогли достичь этой запланированной глубины из-за наличия пород фундамента: это считается плохим местом для бурения скважин с грунтовыми водами, что будет показано далее.

Пространственный анализ результатов моделирования

Пакет Petrel использовался для построения 2D- и 3D-визуализаций свойств и характеристик водоносного горизонта в районе исследования. В частности, он позволил исследовать в пределах изучаемой области статическую глубину воды – один из наиболее важных факторов, который может быть использован при выборе наилучшего места для бурения новых скважин.

Согласно рис. 5 статическая глубина воды в исследуемой области имеет значительные вариации и сложную конфигурацию. Наблюдаемые изменения имеют максимальные значения 38,6 м в скв. 17R в юго-западной части области, минимальные 13,8 м в скв. 114R в северо-восточной, в среднем 24,5 м. Представленные трехмерная визуализация SWD

и наборы двумерных показывают, что поток подземных вод обладает достаточно выраженным направлением с северо-востока к наиболее глубоким точкам SWD на юго-западе.

Направление потока грунтовых вод – очень важный экологический фактор, определяющий выбор наилучшего места для бурения скважин. Скважину следует размещать на минимальных значениях статической глубины воды, чтобы загрязнение от любого источника перемещалось от скважины, а не в ее сторону. Поэтому лучше расположить скважину вверх по склону на небольшой статической глубине воды по экономическим причинам: обычно для более глубокого уровня воды внутри скважины требуется больше труб и более мощный погружной насос для подъема воды на поверхность, что может привести к удорожанию добычи.

Комбинация трехмерного визуального моделирования литостратиграфических слоев и статической глубины воды (рис. 6) может быть использована, чтобы определить направление потока подземных вод, контролируемого подземной структурой и стратиграфической последовательностью слоев водоносного горизонта. В районе исследования направление потока подземных вод и статическая глубина воды зависят от структуры фундамента больше, чем от изменения литостратиграфических слоев.

Например, в поперечном сечении В2 (см. рис. 4), особенно на забое скв. 102R, можно предполагать наличие разлома в фундаменте между скважинами 102R и 103R, поскольку породы фундамента появляются в скважинах 103R, 104R, 105R, 106R. Это указывает, что в области данных скважин произошел резкий подъем фундамента. Глубина до фундамента в скважинах составляла 250, 240, 243 и 226 м соответственно (см. табл. 1). В скв. 102R бурение продолжалось без вскрытия пород фундамента до общей глубины 300 м. Следовательно, это поднятие и ограничивающий его предполагаемый разлом повлияли на направление потока грунтовых вод и SWD: 21,95 м в скв. 106R в северном направлении, 31,53 м в скв. 102R в южном. Таким образом, в данном поперечном сечении направление потока считается направленным к югу от высокого уровня до самой низкой глубины SWD в скв. 102R, на которую влияет установка конструкции. К сожалению, у нас недостаточно региональных геологических данных, чтобы детально очертить все структуры в исследуемой области.

Еще одним важным результатом, полученным посредством выполненного моделирования, является общая мощность водоносного горизонта и его строение во всей области исследования. Эти характеристики, как и значение SWD, существенно влияют на выбор наилучшего участка или места для бурения новых скважин. Целесообразность выбора участка возрастает с увеличением общей мощности водоносного горизонта, поскольку слои песчаника

могут служить резервуаром грунтовых вод и снабжать его достаточным количеством воды. Это важно для достижения конкретной цели и получения экономически значимого количества воды из скважины с грунтовыми водами.

Увеличение толщины водоносного горизонта дает возможность установить больше экранных труб (например, экрана из ПВХ) внутри скважины перед слоями песчаника, которые приводят к получению грунтовых вод из соседних слоев после фильтрации воды гравийной набивкой. В процессе проведения исследования совокупная толщина водоносного горизонта прерывистых слоев песчаника в каждой из 79 скважин с грунтовыми водами была рассчитана на основе всех построенных разрезов и интегрирована в базу геоданных.

Согласно полученным результатам общая мощность водоносных слоев в изучаемом районе (рис. 7, а) колеблется в северо-западном направлении от 269,48 м в скв. 74R до 184,00 м в скв. 101R, в среднем составляя 232,26 м. Значительное колебание мощности водоносных слоев объясняется изменением общей длины скважин, на которую заметно влияет появление пород фундамента в нижней части некоторых скважин. Например, резкое уменьшение толщины всего водоносного горизонта происходит в северо-западном направлении в скважинах 101R и 106R, что связано с уменьшением общей их глубины и появлением пород фундамента на забое на глубинах 238 и 226 м соответственно.

При изменении соотношения общей мощности водоносных слоев и водоупоров (см. рис. 7) следует особенно тщательно выбирать площадку для бурения. Недостатками водоупорных пластов при проектировании скважин являются кварцевые пласты, снабжающие скважину, из которых в нее попадают мелкодисперсные отложения. Они со временем могут блокировать щели в обсадных трубах экрана, что приведет к их разрушению под давлением.

Судя по результатам исследований, общая мощность водоупора в изучаемом районе (см. рис. 7, б) колеблется от 78,52 м в скв. 26R до 22,59 м в скв. 8R (в среднем около 43,90 м на всей изучаемой территории). Увеличение толщины водоупора частично объясняется уменьшением мощности водоносного горизонта и понижением толщин водоносных слоев.

При определении участков, где высока вероятность успешного бурения скважин с грунтовыми водами, необходимо учитывать рельеф фундамента (рис. 8). Благоприятными областями для бурения являются те, где велика возможность успешного попадания в водоносные пласты или систему водоносного горизонта. При этом пустой тратой времени и денег, как уже отмечалось, считается бурение скважины в породах фундамента.

Выполненное исследование показало, что породы фундамента (см. рис. 8) обнаружены на забое



32 скважин с грунтовыми водами. Это подтверждено путем анализа образцов керна, полученных в процессе бурения. Таким образом, если существующие скважины выйдут из строя, настоятельно не рекомендуется бурить какие-либо скважины вблизи этих участков, так как повторное бурение будет экономически невыгодно.

Проведенный анализ показывает, что глубина бурения в изучаемой области варьируется от 306 м в скв. 23R до 227 м в скв. 106R (в среднем около 277 м). При этом часто невозможность достижения максимальной глубины ограничивалась именно появлением пород фундамента. Увеличение же наибольшей глубины очень важно по двум причинам: 1) необходимо установить верхний кожух из оцинкованной стали, который используется для размещения погружного насоса для подъема грунтовых вод на поверхность; 2) следует установить экранящие трубы из ПВХ и глухие трубы достаточной длины для забора большого количества грунтовых вод, которые можно использовать в сельскохозяйственной деятельности и в бытовых целях.

Анализ результатов эффективности скважин

Определение эффективности скважины с грунтовыми водами важно, так как оно показывает, насколько свободно скважина позволяет грунтовыми водам проходить через экран скважины (например, из ПВХ) или перфорационные отверстия. Эффективность откачиваемой скважины рассчитывается как отношение ламинарной потери напора (потери водоносного горизонта) к общей потере напора [11, 18]. Эффективность насосной скважины выражает взаимосвязь между теоретической депрессией за пределами скважины и фактической/измеренной депрессией внутри скважины [6]. Следовательно, эффективность скважины может быть определена путем анализа испытаний ступенчатой депрессии, которые выполняются внутри ствола скважины на последнем этапе бурения без использования контрольных скважин. Эффективность можно рассчитать по следующему уравнению:

$$\text{КПД скважины (\%)} = \frac{BQ}{(BQ + CQ^2)} \cdot 100,$$

где (BQ) – потеря водоносного горизонта или ламинарная потеря напора, м; CQ^2 – потеря давления в скважине или турбулентная потеря напора, м; $BQ + CQ^2$ – общая потеря напора, м; Q – расход воды, $\text{м}^3/\text{ч}$.

В настоящем исследовании эффективность (рис. 9, а) была определена для всех анализируемых скважин с грунтовыми водами в изучаемом районе с применением указанного уравнения. Безопасный дебит для большинства скважин с подземными водами в районе исследования достигается при $Q = 250 \text{ м}^3/\text{ч}$ (RIGW, 2008). КПД скважины достиг максимального значения 95,91 % в скв. 66R; минимальны значения КПД 3,85, 8,76, 9,91, 16,67, 20,56, 25,74, 29,91, 38,27 % в скважинах 63R, 96R, 65R,

104R, 101R, 77R, 33R и 21R соответственно. Столь низкие значения эффективности объясняются последствиями недостаточного освоения скважины или несоответствующего ее проектирования и строительства. Таким образом, это может привести к отказу или поломке скважин вскоре после строительства, как описано в первом разделе статьи.

Вторым важным моментом, характеризующим эффективность скважин, является соленость воды или общее количество растворенных твердых веществ. Они могут серьезно повлиять на сельскохозяйственные проекты и бытовые цели, которые будут определены в зависимости от ресурсов грунтовых вод.

Общее количество растворенных твердых веществ (TDS) – это общее количество органических и неорганических материалов в растворе, содержащемся в пробе воды. Общую систему классификации подземных вод, основанную на общем количестве растворенных твердых веществ, можно описать по четырем классам, приведенным в табл. 2.

Таблица 2

Классификация воды на основе TDS [10]

Классификация	TDS, мг/л
Пресная вода	0–1000
Солоноватая вода	1000–10000
Соленая вода	10000–100000
Рассол	>100000

В районе исследования общее количество растворенных твердых веществ (см. рис. 9, б) колеблется от 690 мг/л в скв. 74R до 230 мг/л в скв. 67R. Следовательно, на основании приведенной в табл. 2 классификации и классификации Чеботарева по солёности [3], подземные воды в районе исследования относятся к пресным, так как содержание солей колеблется от 0 до 1000 мг/л.

Выводы

В рамках выполненного исследования показано, что комбинация 3D модели и определение литостратиграфических слоев со свойствами водоносного горизонта дает лучшее понимание системы водоносного горизонта в изучаемом районе и может помочь при принятии различных решений, касающихся разработки водных ресурсов. Определяемые свойства и характеристики водоносного горизонта включают статическую глубину воды, общую мощность водоносного горизонта и водоупоров, глубину до фундамента, коэффициенты потерь водоносного горизонта и скважин, КПД скважины и общую величину TDS. Например, увеличение общей мощности водоносного горизонта (например, слоев песчаника) и неглубокие статические глубины воды считаются лучшим местом для бурения новых скважин. Более того, горизонтальное и вертикальное распределение литофаций может помочь оценить не только конструкцию скважины, но и пра-



вильность размещения экранирующих и глухих труб в ее стволе.

Основываясь на результатах настоящего исследования настоятельно не рекомендуется бурение скважин с грунтовыми водами рядом с 32 скважинами, показанными на рис. 8, даже если они выйдут из строя, поскольку здесь породы фундамента встречаются в нижней части скважин, что подтверждается картированием выходов пород фундамента в изучаемом районе.

Обнаруженное в результате проведенного исследования снижение значений КПД скважин 21R, 33R, 63R, 65R, 77R, 96R, 101R, 104R свидетельствует о крайней необходимости выполнить этап разработки с использованием воздуха и этап разработки насоса, чтобы повысить эффективность скважин и со временем избежать их разрушения или выхода из строя [14], потому что указанные этапы разработки скважины считаются процедурой, используемой для максимального увеличения ее дебита. Они также

эффективны для исправления повреждений, нанесенных пласту в результате бурения, и изменения физических характеристик водоносного горизонта вблизи ствола скважины для улучшения притока грунтовых вод к скважине и повышения объема откачиваемой воды из существующих скважин.

Исследователь Ахмед Эль-Меселхи финансируется за счет стипендии № EGY 6827/19 в рамках совместной исполнительской программы Министерства высшего образования Арабской Республики Египет и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Авторы благодарны кафедре геофизики Новосибирского государственного университета за возможность проводить исследования на базе лаборатории, оснащенной последней версией программного обеспечения Petrel. Также они благодарны компании Schlumberger за предоставленную А. Эль-Меселхи возможность пройти несколько онлайн-курсов по изучению и практике работы с программным обеспечением Petrel.

© А. Эль-Меселхи, Г. М. Митрофанов, 2022