

ОЦЕНКА ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАРЬЕРОВ НА АЛМАЛЫКСКОМ РУДНОМ ПОЛЕ

Н. Б. АГАРКОВ, аспирант, nikolayagarkov@yandex.ru

В. В. ХАУСТОВ, проф., д-р геол.-минерал. наук

Н. А. ЛУКЬЯНЕНКО, аспирант

И. М. ИГНАТЕНКО, доцент, канд. техн. наук

Институт наук о Земле НИУ «БелГУ», Белгород, Россия

Введение

Представленные исследования посвящены проблеме обеспечения безопасности ведения открытых горных работ в горных массивах районов разработки рудных месторождений [1–3]. Одним из таких районов является Алмалыкское рудное поле, расположенное на северо-западном склоне Кураминского хребта Тянь-Шаня к юго-востоку от г. Ташкента (Узбекистан). Месторождение сложено преимущественно интрузивными породами: сиенитодиоритами; диоритами и прорывающими их гранодиорит-порфирами среднекарбонного возраста. Вмещающие их песчано-карбонатные отложения, эффузивные кварцевые порфиры и андезитоацитовые порфиры имеют меньшее распространение.

Отработку месторождения осуществляют в сложных геолого-гидрогеологических условиях (многослойное строение водовмещающей толщи пород, литолого-фациальная изменчивость водоносных и слабопроницаемых отложений в плане и разрезе, между которыми в той или иной степени существует гидравлическая взаимосвязь, их локальное распространение). Гидрогеологические расчеты в подобных сложных условиях могут быть достоверно осуществлены, очевидно, только с применением методов численного моделирования [4, 5].

Методика исследования

Создание численной геофильтрационной модели участка открытых горных работ выполнено на базе программного комплекса Groundwater Modeling System (GMS), наиболее распространенного при решении широкого спектра фильтрационных задач в практической гидрогеологии.

Разработку численной геофильтрационной модели осуществляли в два этапа:

- обработка первичной геологической, гидрогеологической, геолого-структурной информации, а также новых горных и геолого-гидрогеологических данных, полученных при дальнейшей обработке месторождения;
- создание геофильтрационной модели района участка расположения отвалов вскрышных пород.

Гидрогеологическая модель построена с учетом результатов полевых гидрогеологических работ, инженерно-геологических и инженерно-гидрогеологических изысканий, а также общих представлений о гидрогеологических параметрах территории.

Площадь модели, построенной в модуле 2D Grid, была разбита на равномерную двумерную сетку. При помощи модуля

Выполнена оценка прогнозных водопритоков в карьер месторождения на период его строительства. Разработана геофильтрационная модель для всего Алмалыкского рудного поля, которая отражает все основные механизмы формирования подземных вод района и прилегающей территории и может быть использована для прогнозных расчетов. Последние позволят оперативно реагировать на изменение состояния подземных вод и не допустить нарушения режима эксплуатации горнорудных объектов.

Ключевые слова: водоносный горизонт, коэффициент фильтрации, уровень подземных вод, карьер, отвал, коэффициент проницаемости, геофильтрационная модель, GMS

DOI: 10.17580/gzh.2021.09.13

«Мар» непосредственно в модель введена исходная топооснова района, карты фактического материала, гидрогеологическая и другая информация, что исключило возможные искажения при задании техногенных и природных объектов-поверхностей.

Геофильтрационная модель района работ разработана на основе программы GMS, которая позволяет реализовать стационарную и нестационарную трехмерную фильтрацию подземных вод в неоднородных водоносных горизонтах. Баланс расходов модели рассчитывают как в целом для всей моделируемой площади фильтрации, так и для отдельной ее зоны, что позволяет оценить общий баланс подземных вод по моделируемой области и в пределах необходимых участков [6–17].

Результаты исследования

Основой для разработки модели послужили массивы фактических данных по мощностям, коэффициентам фильтрации и водопроницаемости, отметкам кровли и подошвы выделенных водоносных слоев, инфильтрации атмосферных осадков.

Расчетная вертикальная схематизация выполнена путем оценки режима фильтрации, мерности потока, а также неоднородности массивов вмещающих пород.

Исходя из условий распространения, характера залегания, фильтрационных свойств горных пород и общей закономерности уменьшения их фильтрационных свойств с глубиной, расчетная схема представлена семью слоями (сверху вниз): 1-й слой схематизирован по площади распространения отвальных массивов; 2-й слой выполнен в площади водоносных четвертичных отложений; 3-й слой отмечен по средней мощности выветрелых кристаллических пород (мощность 70 м); 4–7-й слои кристаллических пород схематизированы, исходя из закономерности уменьшения фильтрационных свойств горных пород с глубиной (мощностью от 150 до 250 м).

Суммарная мощность моделируемого разреза составляет порядка 920 м.

В **табл. 1** приведены коэффициенты фильтрации моделируемых слоев по результатам калибровки модели.

Таблица 1. Коэффициент фильтрации моделируемых слоев

Слой	Название	Мощность, м	Коэффициент фильтрации $K_f = K_v$, м/сут
1	Техногенный водоносный горизонт	—	0,5
2	Аллювиальный водоносный горизонт долин рек и ручьев	5–25	40–70
2	Делювиально-пролювиальные отложения склонов	5–50	0,5
3	Зона выветривания кристаллических пород	70	0,02–0,1
4	Трещиноватые кристаллические породы	150	0,001
5	Верхняя часть слаботрещинуватых кристаллических пород	200	0,0001
6	Средняя часть слаботрещинуватых кристаллических пород	250	0,00001
7	Нижняя часть слаботрещинуватых кристаллических пород	250	0,000005

На фоне невысоких коэффициентов фильтрации водоносного комплекса трещиноватых изверженных пород палеозоя коэффициенты фильтрации в зонах тектонических нарушений увеличены в 5–10 раз от фоновых значений и остаются достаточно низкими.

Вся естественная гидрогеологическая среда на участке месторождения и прилегающей территории схематизирована в виде гидравлически взаимосвязанной системы, состоящей из водоносных слоев безнапорного и слабонапорного характера.

Исследуемая область фильтрации (14,2×12 км) разбита прямоугольной сеткой. В разрезе, как отмечено выше, выделено семь расчетных слоев. Размеры призм по осям x и y равны 25 м, по оси z соответствуют мощности рассматриваемого слоя. Схема гидродинамической модели приведена на рис. 1.

Верхней внешней границей области моделирования в плане является поверхность водоносного горизонта, на которую в области формирования потока подземных вод задают инфильтрационное питание с постоянным расходом ($Q = \text{const}$).

Внутренние граничные условия по водотокам задавали с помощью пакета Drain, который соответствует граничным условиям II рода ($Q = f(H, A)$).

Поверхностные водоемы задавали с помощью пакета General Head граничными условиями III рода ($Q = f(H, A)$), где H – уровень воды в поверхностном водоеме; A – характеристика интегральной проницаемости подрусловых отложений, м²/сут.

Нижняя граница модели задана непроницаемой и реализована граничными условиями II рода ($Q = 0$). За нижнюю границу модели принята переменная отметка практически водоупорных пород, которая соответствует глубине порядка 920 м от земной поверхности.

Для соблюдения условия неразрывности потока на участках выклинивания расчетных слоев использовали адаптивные приемы. На рис. 2 приведена схема граничных условий [10–13].

Калибровка численной модели (решение «обратной» задачи) площади Алмалыкского рудного поля и прилегающей территории выполнена в стационарной постановке. Калибровку модели проводят

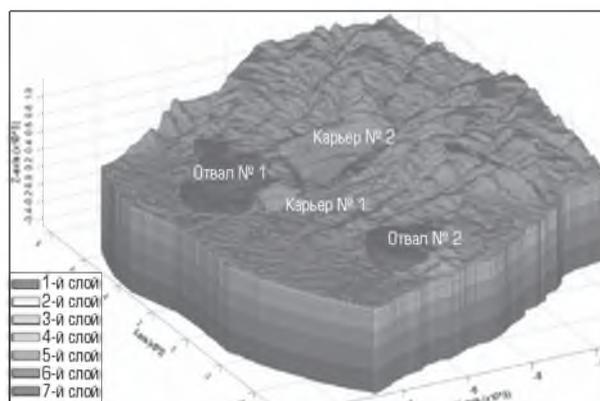


Рис. 1. Гидродинамическая модель

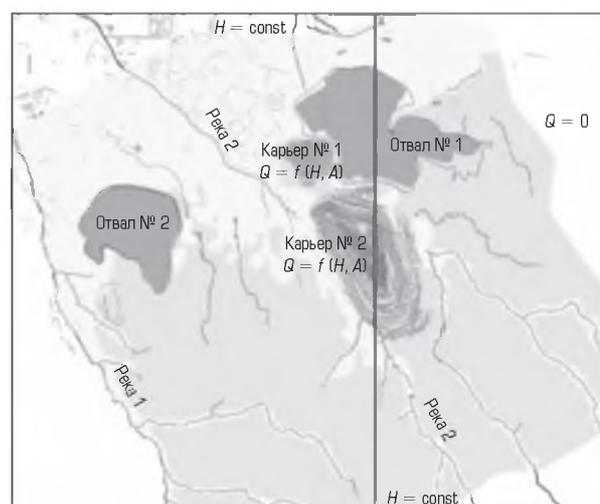


Рис. 2. Схема граничных условий

с целью уточнения параметров проницаемости (коэффициентов фильтрации) водоносных пород, их анизотропии, параметров взаимосвязи подземных и поверхностных вод и инфильтрационного питания. В процессе решения «обратной» задачи параметры модели корректируют непротиворечивым образом, чтобы притоки подземных вод в карьер и уровни подземных вод максимально соответствовали природным. Для этого проводят численные эксперименты при различных краевых условиях и параметрах моделируемых слоев.

Калибровка модели выполнена по нескольким критериям соответствия: модельных и натурных уровней подземных вод в контрольных точках (скважинах); среднего фактического и модельного притоков подземных вод в карьеры; расходно-приходного баланса в площади модели.

Согласно результатам модельных расчетов, на участке перемычки между затопленным карьером № 1 и действующим карьером № 2 уровень подземных вод находится на абс. отм. от 620 до 640 м, и разгрузка с этого участка направлена в оба карьера (рис. 3).

Низкие фильтрационные свойства водовмещающих пород по вертикали разреза способствуют формированию водораздельного



Рис. 3. Схематический разрез

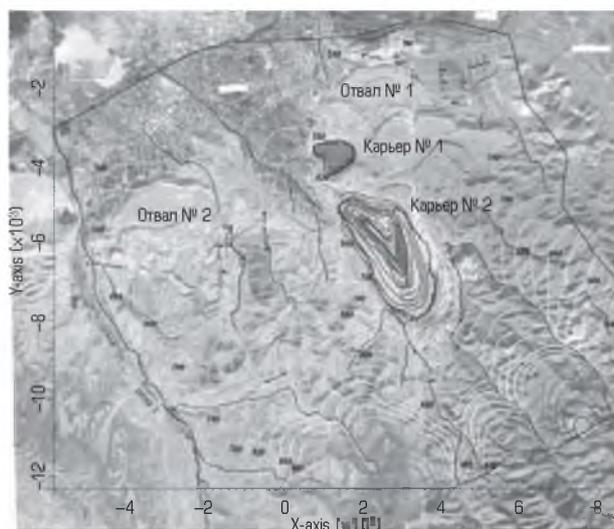


Рис. 4. Распределение уровней подземных вод водоносного комплекса изверженных пород по результатам решения «обратной» задачи

участка между карьерами и крутой депрессионной поверхности в площади действующего карьера № 2. Модельные и фактические уровни подземных вод приведены в табл. 2.

По результатам решения «обратной» задачи приток подземных вод в карьер № 2 составляет порядка 356 м³/ч. Основной приток подземных вод (около 80 %) приходится на верхнюю трещиноватую зону выветривания кристаллических пород.

Согласно модельным расчетам, основной приток подземных вод (порядка 215 м³/ч) поступает на южный борт карьера № 2.

Информация по уровням подземных вод свидетельствует об удовлетворительной сходимости принятых для моделирования параметров водоносных слоев с природными и отсутствии системной ошибки в сторону общего уменьшения (или увеличения) их значений (см. табл. 2).

Имеющаяся одновременная гидродинамическая информация на ограниченной площади дает недостаточный объем фактических данных об уровненом режиме моделируемой области, однако входит в диапазон значений уровня подземных вод в наблюдаемых точках.

Уровни подземных вод водоносного комплекса трещиноватых изверженных пород палеозоя по результатам решения «обратной» задачи отображены на рис. 4.

Таблица 2. Фактические и модельные уровни подземных вод

Номер скважины	Уровень подземных вод (абс. отм), м	
	фактический	модельный
<i>Четвертичный водоносный горизонт</i>		
101	557,0	557,6
5	577,4	579,1
209	576,8	575,4
7	587,5	584,9
18	288,8	585,3
11	577,0	577,1
12	576,0	577,0
13	576,3	578,7
<i>Водоносный комплекс трещиноватых изверженных пород палеозоя</i>		
2г	674,5	672,9
5г	717,12	713,2
1гн	659,26	661,0
2гн	679,92	678,7
3гн	691,06	690,3
4гн	<667,5	669,0
5гн	<733,5	692,5
6гн	<842,5	762,2
7гн	<774,5	739,1

Согласно модельным расчетам, абсолютные отметки уровней подземных вод в площади моделирования изменяются от 1020–1080 м на водораздельных участках южной границы до 505–550 м на северном контуре.

Уровни подземных вод на водораздельных площадях и прилегающих к ним склонах в области моделирования находятся на глубине от 40 до 70–85 м. В долинах водотоков уровни подземных вод формируются ближе к поверхности на глубине от 0 до 8–10 м.

Выводы

В площади карьеров на Алмалыкском рудном поле уровненый режим подземных вод соответствует общим закономерностям формирования фильтрационного потока с минимальными значениями уровней в контуре долин и максимальными – на водораздельных и склоновых участках.

Исследования, выполненные с помощью компьютерного моделирования геофильтрации, обеспечивают возможность более глубокого расчета в дополнение к аналитическим методам, что позволяет познать сущность объекта, выявить его новые особенности и связанные с ним закономерности, нередко не осязаемые до осуществления численного моделирования. По результатам проведенных исследований можно уверенно констатировать, что созданная таким образом гидрогеологическая модель отражает все основные механизмы формирования подземных вод Алмалыкского рудного поля и прилегающей территории и может быть использована для прогнозных гидрогеологических расчетов. Последние позволяют оперативно реагировать на изменение состояния подземных вод и не допустить нарушения режима эксплуатации горнорудных объектов на исследуемой территории.

Библиографический список

- Dushin A. V., Ignatyeva M. N., Yurak V. V., Ivanov A. N. Economic evaluation of environmental impact of mining: ecosystem approach // *Eurasian Mining*. 2020. No. 1. P. 30–36. DOI: 10.17580/em.2020.01.06
- Galiev S. Zh., Uteshov E. T., Galiev D. A., Farakhov K. A. Methods and techniques for energy efficiency assessment of geotechnological facilities at opencast mines based on the in-depth analysis // *Eurasian Mining*. 2021. No. 1. P. 65–69. DOI: 10.17580/em.2021.01.13
- Shamganova L. S., Syedina S. A., Berdinova N. O. Geomechanical substantiation of the northeastern pit wall stability in Kurzhunkul mine // *Eurasian Mining*. 2021. No. 1. P. 30–33. DOI: 10.17580/em.2021.01.06
- Azarikov H. B., Khaustov V. V., Malikov A. M., Karpenko N. G. Оптимизация сети мониторинга на основе моделирования массопереноса // *Горный журнал*. 2020. № 12. С. 91–94. DOI: 10.17580/gzh.2020.12.21
- Sattar A., Haritashya U. K., Kargel J. S., Leonard G. J., Shugar D. H. et al. Modeling lake outburst and downstream hazard assessment of the Lower Barun Glacial Lake, Nepal Himalaya // *Journal of Hydrology*. 2021. Vol. 598. 126208. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126208
- Hamdan A. N. A., Almuktar S., Scholz M. Rainfall-Runoff Modeling Using the HEC-HMS Model for the Al-Adhaim River Catchment, Northern Iraq // *Hydrology*. 2021. Vol. 8. Iss. 2. 58. DOI: 10.3390/hydrology8020058
- Jay Krishna Takur. Hydrogeological modeling for improving groundwater monitoring network and strategies // *Applied Water Science*. 2017. Vol. 7. Iss. 6. P. 3223–3240.
- Khaustov V. V., Ustiugov D. L. Formation of drainage waters of Tyryauz deposit in ecological aspect // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 87. No. 4. 042006. DOI: 10.1088/1755-1315/87/4/042006
- Voronin A. A., Volkov Yu. I., Zhdanova T. V., Verzhinina O. O. Обоснование и разработка современных способов защиты горных выработок от подземных вод // *Горный журнал*. 2019. № 10. С. 18–21.
- Wen-Hsing Chiang, Kinzelbach W. Processing Modflow A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution. – Hamburg, 1998. – 342 p.
- Ломакин Е. А., Мироненко В. А., Шестаков В. М. Численное моделирование геофильтрации. – М.: Недра, 1988. – 228 с.
- Luckner L., Schestakow W. Simulation der Geofiltration. – Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1975. – 358 s.
- Surinaidu L., Gurunadha Rao V. V. S., Srinivasa Rao N., Srinu S. Hydrogeological and groundwater modeling studies to estimate the groundwater inflows into the coal Mines at different mine development stages using MODFLOW, Andhra Pradesh, India // *Water Resources and Industry*. 2014. Vol. 7–8. P. 49–65.
- Khaustov V. V., Bredikhin V. V., Khaustova T. V. Treatment technology of liquid phase at industrial waste landfill // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 687. Iss. 6. 066063. DOI: 10.1088/1757-899X/687/6/066063
- Кравченко М. Н., Кадет В. В., Ярыш В. В., Диева Н. Н., Лещук А. Н. Перколяционный подход к гидродинамическому моделированию заводнения с использованием активных агентов // *Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР*. 2020. № 1. С. 29–35.
- Ракишев Б. М., Билялов Б. Д., Абсалымов Х. К., Алагузова А., Билялов А. С. О проблемах техногенного ландшафта // *Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук*. 2017. Т. 1. № 421. С. 120–123.
- Румынин В. Г. Геомиграционные модели в гидрогеологии. – СПб.: Наука, 2011. – 1157 с. **ПЖ**

«GORNYI ZHURNAL», 2021, № 9, pp. 80–83
DOI: 10.17580/gzh.2021.09.13

Estimate of geohydrodynamic mode in operation of open pit mines in Almalyk ore field

Information about authors

N. B. Agarkov¹, Post-Graduate Student, nikolayagarkov@yandex.ru

V. V. Khaustov¹, Professor, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences

N. A. Lukyanenko¹, Post-Graduate Student

I. M. Ignatenko¹, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences

¹Institute of Earth Sciences, Belgorod State University, Belgorod, Russia

Abstract

With a view to safe open pit mining, the anticipated water inflows in a pit during construction are estimated. A geopermeation model is built for the whole Almalyk ore field. The numerical geopermeation modeling of open pit mining used Groundwater Modeling System (GMS) as the most widely applied software system in wide-range problem solution in practical hydrogeology.

The test ore field features difficult geological and hydrological conditions (multilayered structure of water-containing stratum, horizontal and vertical lithological and facial variability of aquifers and impermeable beds which are hydraulically interconnected in a varying degree, local extension of this variability).

The modeling determines that groundwater level within the limits of local open pit mines conforms with the general laws of fluid flow with minimum levels in the valleys and maximum values at the watersheds and on the hillslopes.

The computer-aided geopermeation modeling enables more careful calculation to add the analytical research, which makes it possible to gain insight into essence of an object, its peculiarities and regular patterns which are often indistinguishable without numerical modeling. The studies allow confident affirmation that the hydrogeological model images all major mechanisms of ground water in Almalyk ore field and in adjacent areas, and is applicable for hydrogeological predictions. The latter can help immediately respond changes in the behavior of ground water and eliminate failure in service of mining facilities in the test territories.

Keywords: aquifer, permeation factor, ground water level, open pit mine, dump, permeability, geopermeation model, GMS.

References

- Dushin A. V., Ignatyeva M. N., Yurak V. V., Ivanov A. N. Economic evaluation of environmental impact of mining: ecosystem approach. *Eurasian Mining*. 2020. No. 1. pp. 30–36. DOI: 10.17580/em.2020.01.06
- Galiev S. Zh., Uteshov E. T., Galiev D. A., Farakhov K. A. Methods and techniques for energy efficiency assessment of geotechnological facilities at opencast mines based on the in-depth analysis. *Eurasian Mining*. 2021. No. 1. pp. 65–69. DOI: 10.17580/em.2021.01.13

- Shamganova L. S., Syedina S. A., Berdinova N. O. Geomechanical substantiation of the northeastern pit wall stability in Kurzhunkul mine. *Eurasian Mining*. 2021. No. 1. pp. 30–33. DOI: 10.17580/em.2021.01.06
- Agarkov N. B., Khaustov V. V., Malikov A. M., Karpenko N. G. Optimization of groundwater monitoring network in terms of mass transfer modeling. *Gornyi Zhurnal*. 2020. No. 12. pp. 91–94. DOI: 10.17580/gzh.2020.12.21
- Sattar A., Haritashya U. K., Kargel J. S., Leonard G. J., Shugar D. H. et al. Modeling lake outburst and downstream hazard assessment of the Lower Barun Glacial Lake, Nepal Himalaya. *Journal of Hydrology*. 2021. Vol. 598. 126208. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126208
- Hamdan A. N. A., Almuktar S., Scholz M. Rainfall-Runoff Modeling Using the HEC-HMS Model for the Al-Adhaim River Catchment, Northern Iraq. *Hydrology*. 2021. Vol. 8, Iss. 2. 58. DOI: 10.3390/hydrology8020058
- Jay Krishna Takur. Hydrogeological modeling for improving groundwater monitoring network and strategies. *Applied Water Science*. 2017. Vol. 7, Iss. 6. pp. 3223–3240.
- Khaustov V. V., Ustiugov D. L. Formation of drainage waters of Tyryauz deposit in ecological aspect. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 87, No. 4. 042006. DOI: 10.1088/1755-1315/87/4/042006
- Voronin A. A., Volkov Yu. I., Zhdanova T. V., Verzhinina O. O. Development and validation of modern techniques to protect mines from ground water. *Gornyi Zhurnal*. 2019. No. 10. pp. 18–21.
- Wen-Hsing Chiang, Kinzelbach W. Processing Modflow A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution. Hamburg, 1998. 342 p.
- Lomakin E. A., Mironenko V. A., Shestakov V. M. Numerical modeling of geopermeation. Moscow: Nedra, 1988. 228 p.
- Luckner L., Schestakow W. Simulation der Geofiltration. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1975. 358 s.
- Surinaidu L., Gurunadha Rao V. V. S., Srinivasa Rao N., Srinu S. Hydrogeological and groundwater modeling studies to estimate the groundwater inflows into the coal Mines at different mine development stages using MODFLOW, Andhra Pradesh, India. *Water Resources and Industry*. 2014. Vol. 7–8. pp. 49–65.
- Khaustov V. V., Bredikhin V. V., Khaustova T. V. Treatment technology of liquid phase at industrial waste landfill. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 687, Iss. 6. 066063. DOI: 10.1088/1757-899X/687/6/066063
- Kravchenko M. N., Kadet V. V., Yarysh V. V., Dieva N. N., Lishchuk A. N. Percolation approach to hydrodynamic modeling of flooding through active agents. *SOCAR Proceedings*. 2020. No. 1. pp. 29–35.
- Rakishov B. M., Bilyalov B. D., Absalyamov H. K., Alaguzova A., Bilyalov A. S. The problems of technogenic landscape. *Izvestiya Natsionalnoy akademii nauk Respubliki Kazakhstan. Seriya geologii i tekhnicheskikh nauk*. 2017. Vol. 1, No. 421. pp. 120–123.
- Rumynin V. G. Geomigration models in hydrogeology. Saint-Petersburg: Nauka, 2011. 1157 p.