



КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 004.048 556

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

GROUNDWATERS GRAPHIC-ANALYTICAL MODEL OF DYNAMICS OF DISTRIBUTION

А.А. Черноморец, М.А. Петина, А.Н. Коваленко, Н.О. Зайцева
A.A. Chernomorets, M.A. Petina, A.N. Kovalenko, N.O. Zaitseva

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
 Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, 85*

Belgorod State National Research University, 85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia

e-mail: chernomorets@bsu.edu.ru, petina_m@mail.ru, kovalenko_a@bsu.edu.ru, zaitseva_n_o@bsu.edu.ru

Аннотация. В работе разработана математическая модель динамики распространения подземных вод с учетом все возрастающего различия гидродинамических свойств отдельных участков породы, а также динамики воздействия естественных факторов и техногенной нагрузки на гидрогеологическую среду на основе графоаналитического представления гидрогеологических процессов на исследуемых территориях и модель распространения ареалов загрязнения подземных вод, обусловленных антропогенной деятельностью в горно-промышленном районе на основе обработки знаний о фильтрационной неоднородности водовмещающих отложений, и, которая будет способна к адаптации в условиях изменяющегося техногенного воздействия.

Resume. In this paper we developed a mathematical model of the dynamics of the distribution of groundwater, taking into account the increasing differences in the hydrodynamic properties of the individual sections of the breed, as well as the dynamics of the impact of natural factors and anthropogenic load on the hydrogeological environment on the basis of graphic-analytical representation of hydrogeological processes in the study area and the distribution model of groundwater contamination areas due human activities in the mining and industrial area on the basis of processing knowledge about filtration heterogeneity of water-bearing sediments, and to be able to adapt to the changing conditions of anthropogenic impact.

Ключевые слова: подземные воды, графоаналитическое представление, гидрогеологическая среда, водоносный горизонт, геофильтрация.

Keywords: groundwater, graphic-analytical representation, hydrogeological environment, aquifer, geofiltration.

Введение

В последнее время в результате интенсивного освоения региона происходит усиление антропогенной нагрузки на окружающую природную среду, что приводит к значительному ухудшению качественного состояния подземных вод. Следует отметить, что подземные воды являются единственным источником питьевого, бытового и большей частью промышленного водоснабжения области.

Наибольшее влияние на качественные и количественные изменения водных ресурсов оказывают следующие виды хозяйственной деятельности: водопотребление для промышленных и хозяйственно-бытовых целей, сброс отработанных вод (без очистки или с недостаточной степенью очистки), зарегулирование стока рек и создание водохранилищ, сельскохозяйственная мелиорация и т.д. Также стоит отметить, что регион характеризуется высоким уровнем промышленного развития, но распределение техногенной нагрузки на территории области очень неравномерное.

Наиболее сильное воздействие окружающая среда испытывает в северо-восточной части области (Губкин-Старооскольский промышленный район), где на относительно небольшой площади расположены два достаточно крупных индустриально развитых города (Губкин и Старый

Оскол), а также два железорудных карьера, шахта, два горно-обогатительных предприятия, два хвостохранилища, металлургический комбинат, крупный цементный завод и ряд менее крупных предприятий других отраслей промышленности [Петина, 2016, Черноморец, 2016].

Результаты и их обсуждение

Подземные стоки образуются при просачивании атмосферной воды в более или менее глубокие слои почвы, где вода собирается над водонепроницаемыми пластами, стекает по ним и выходит вновь на поверхность земли в местах выхода этих пластов, сливаясь с поверхностными стоками.

Для описания предлагаемой модели динамики подземных вод рассмотрим пример участка недр в виде схемы залегания подземных вод, представленной на рисунке 1.

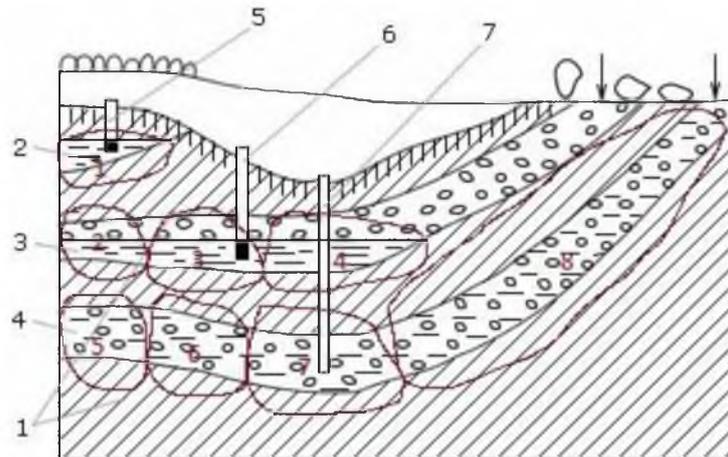


Рис. 1. Схема залегания подземных вод:

1 – водонепроницаемые пласты; 2 – водоносный горизонт грунтовых вод; 3 – водоносный горизонт межпластовых безнапорных вод; 4 – водоносный горизонт межпластовых напорных (артезианских) вод; 5 – колодец, питающийся грунтовой водой; 6 – колодец, питающийся межпластовой безнапорной водой; 7 – артезианская скважина

Fig. 1. Scheme of a bedding of underground waters:

1 – waterproof layers; 2 – aquifer groundwater; 3 – aquifer unconfined mizhplastovi water; 4 – aquifer interstratal pressure (artesian) water; 5 – the well that feed on ground water; 6 – the well-fed gravity water cross; 7 – artesian well

На участке недр, представленном на рисунке 1, были выделены восемь областей с однородными гидродинамическими свойствами.

Для изучения динамики распространения подземных вод с учетом различия гидродинамических свойств отдельных участков породы, а также динамики воздействия факторов естественных и техногенной нагрузки на гидрогеологическую среду, разработано графоаналитическое представление гидродинамических процессов в районе горнодобывающего узла при неравномерном разбиении участка гидрогеологической среды, которое состоит в следующем:

В качестве элементов $\{a_j\}$ графа $A=\{a_j\}$, $j=1,2,\dots,K$, рассматриваются отдельные K участков территорий, взаимосвязи между которыми определяются гидродинамическими характеристиками распространения подземных вод между ними, среди которых можно выделить следующие:

- $C = \{c_j\}$ – скорость прохождения подземных вод в выделенной области a_j ;
- $D = \{d_j\}$ – размер области распространения a_j ;
- $M = \{m_j\}$ – накопление подземных вод в выделенной области a_j (в %-ном соотношении);
- $V = \{v_{ij}\}$ – переходные области b_{ij} между относительно постоянными участками a_i , $j=1,2,\dots,K$, и a_j ;
- $W = \{w_{ij}\}$ – весовой коэффициент связи, характеризующий ширину переходной области b_{ij} между относительно постоянными участками a_i и a_j ;
- $V = \{v_{ij}\}$ – скорость распространения в переходной области b_{ij} .

Так на рисунке 2 представлен пример графоаналитического представления динамики распространения подземных вод, в соответствии со схемой на рисунке 1.

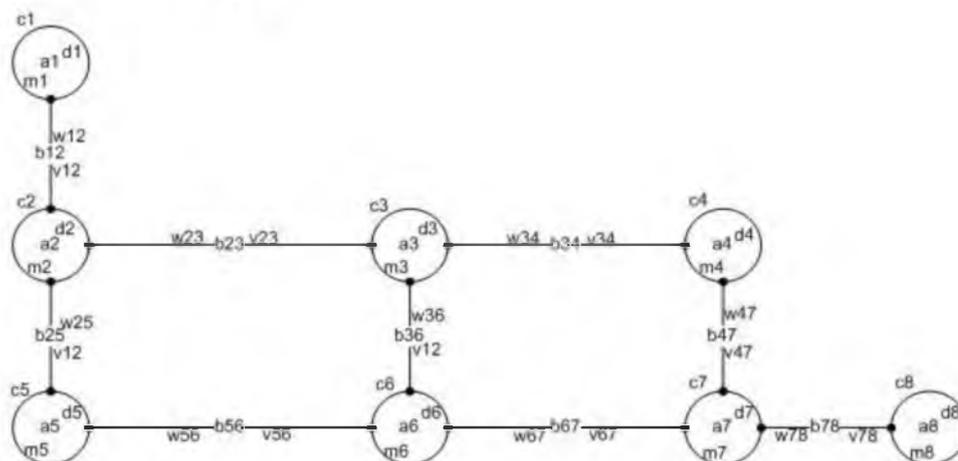


Рис. 2. Пример графоаналитического представления динамики распространения подземных вод
 Fig. 2. Example of graphic-analytical presentation of the dynamics of the distribution of groundwater

В узлах графа, приведенного на рисунке 2, указаны описанные выше характеристики, которые используются при решении уравнений геофильтрации в узлах и переходных областях.

Использование предложенного графоаналитического представления динамики распространения подземных вод более предпочтительно по сравнению со структурированной (регулярной) сеткой. Использование структурированных сеток требует больших затрат труда и ресурсов ЭВМ, по сравнению с процедурой построения графового представления динамики распространения подземных вод.

При построении математической модели динамики подземных вод на основе предложенного графоаналитического представления использовано применяемое в большинстве задач геофильтрации параболическое уравнение геофильтрации подземных вод в частных производных:

$$K_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} - W = S_s \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (1)$$

где K_x, K_y, K_z , м/сут – коэффициенты фильтрации вдоль координатных осей x, y, z ; $H(x, y, z)$ – потенциометрический уровень (напор); $W(x, y, z)$, сут⁻¹ – функция источников (инфильтрация и т.п.); S_s , м⁻¹ – удельная водоотдача пористой среды пород; t , сут – время [Шварц, 1996; Шестопалов, 1988].

Характеристики естественных и техногенных факторов учитываются при задании граничных условий для (1).

Данное уравнение применено для описания процессов в узлах $A=\{a_j\}$ и в переходных областях $B=\{b_{ij}\}$.

Модель распространения подземных вод также можно представить в виде диаграммы кооперации (рисунок 3).

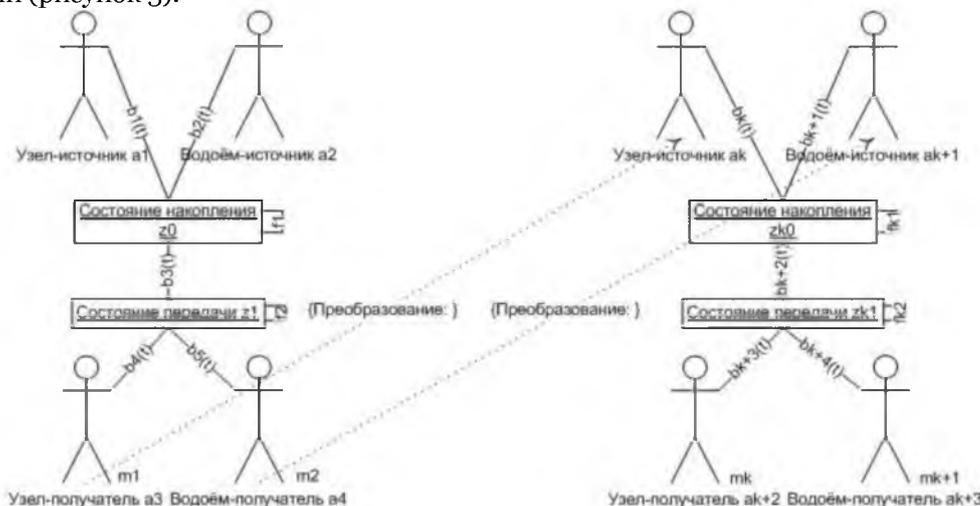


Рис. 3. Диаграмма кооперации динамики распространения подземных вод
 Fig. 3. Diagram of cooperation the dynamics of the distribution of groundwater



В качестве актеров диаграммы кооперации были выделены узлы-источники, водоёмы-источники, узлы-получатели и водоёмы-получатели. [Арлоу, 2007]

Естественные и техногенные факторы, а также их динамика, учитываются при задании характеристик узлов-источников, водоемов-источников (например, исходные фрагменты водоносных слоев, естественные водоемы) и исследовании вычисляемых характеристик узлов-получателей, водоемов-получателей (исследуемые в дальнейшем фрагменты водоносных слоев, водозаборные скважины и др.) [Корнилов, 2015, Корнилов, 2012, Петин, 2016].

Изменения рельефа, вызванные деятельностью в районе горнодобывающего узла, учитывается в модели добавлением и/или удалением узлов.

Связи между узлами обеспечиваются законами распространения подземных вод в переходных средах ($F_1 = \{f_i, i(t)\}$) и законами распространения подземных вод в узлах ($F_2 = \{f_i, i(t)\}$) (в основе которых использовано соотношение (1)). При этом состояние накопления описывается параметром Z_0 , а состояние передачи – Z_1 . Далее узлы-получатели переходят в состояние узла-источника, а водоёмы-получатели – в состояние водоёма-источника и процесс повторяется.

Важное значение для изучения загрязнения подземных вод имеют физико-химические процессы, происходящие при взаимодействии подземных вод с вмещающими их горными породами.

Вода, просачиваясь через грунт, контактирует с различными минеральными солями (NaCl , Na_2SO_4 , MgSO_4 , CaCO_3 , силикатами) и органическими веществами, растворяет или механически захватывает их [Петин, 2013].

Фильтрация воды через почву частично сопровождается и ионообменной адсорбцией ионогенных примесей; например, почвенные комплексы хорошо задерживают фосфаты, происходит обмен адсорбированного почвой Na^+ на K^+ и т.п.

При разработке математической модели распространения ареалов загрязнения подземных вод использованы оценки наличия загрязняющих веществ, образующихся при формировании хвостохранилищ, также учтена фильтрационная неоднородность водовмещающих отложений. За основу была взята математическая модель динамики распространения подземных вод, описанная выше.

Графоаналитическое представление фильтрационных процессов в различных породах, представленное на рисунке 4, заключается в описании в узлах графа параметров математической модели, описывающей фильтрацию и распространение химических веществ, а также в установлении параметров обмена химическими веществами между смежными выделенными К участками.

На рисунке 4 добавлен узел h_9 , характеризующий взаимосвязи хвостохранилища, которое может быть образовано в процессе работы горнодобывающего узла, с другими выделенными однородными областями (узлами графа).

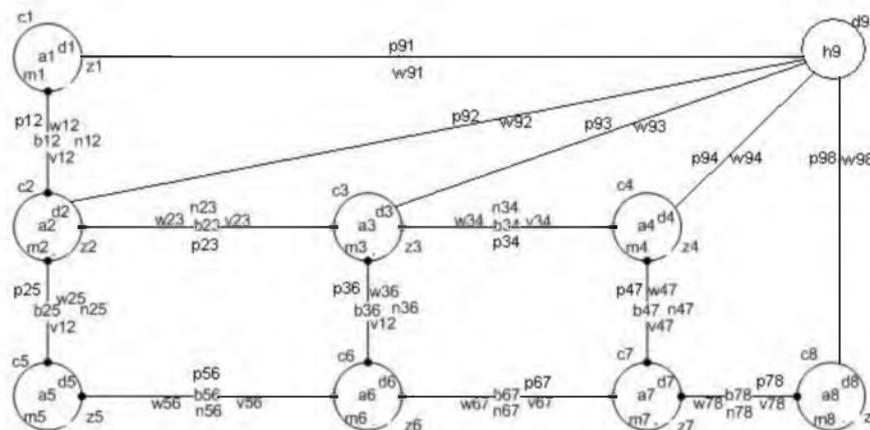


Рис. 4. Графоаналитическое представление фильтрационных процессов в различных выделенных однородных областях

Fig. 4. Graphic-analytical representation of filtrational processes in various allocated homogeneous areas

Значения параметров $\{c_j\}$, $\{d_j\}$, $\{m_j\}$, $\{b_{ij}\}$, $\{w_{ij}\}$, $\{v_{ij}\}$ в узлах $\{a_j\}$, $i, j=1, 2, \dots, K$, описаны для рисунка 2. В модели также использованы следующие параметры, соответствующие выделенным участкам (областям):

$P = \{p_j\}$ – коэффициент гидродисперсии, м²/сут; $V = \{v_j\}$ – скорость фильтрации, м/сут; $E = \{e_j\}$ – активная пористость, доли единицы; $N = \{n_j\}$ – параметр обмена химическими веществами между относительно постоянными участками (кг).



Для описания процессов переноса растворенных загрязняющих веществ подземными водами в узлах и переходных областях использовано следующее уравнение в частных производных (применяется во многих задачах геомиграции):

$$p_j \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + v_j \frac{\partial F}{\partial x} = e_j \frac{\partial F}{\partial t}, \quad j=1,2,\dots,K, \quad (2)$$

где p_j – коэффициент гидродисперсии, м²/сут; F – минерализация подземных вод, г/дм³; v_j – скорость фильтрации, м/сут; e_j – активная пористость, доли единицы; x – пространственная координата, м; t – временная координата, сут [Шварц А.А. 1996, Шестопалов В.М. 1988].

Таким образом, математическая модель распространения ареалов загрязнения подземных вод, обусловленных антропогенной деятельностью в горнопромышленном районе, основанная на графоаналитическом представлении фильтрационных процессов в различных выделенных однородных участках (пример которого приведен на рисунке 4), описывает процесс минерализации подземных вод в однородных областях (узлы графа) и в переходных областях (ребра графа) на основании соотношений вида (2).

Выводы

Разработанные графоаналитическое представление гидрогеологических процессов и математическая модель динамики распространения подземных вод позволяют анализировать воздействие факторов естественной и техногенной нагрузки на гидрогеологическую среду.

Разработанная математическая модель на основании предложенного графоаналитического представления позволяет с меньшими затратами ресурсов вычислительной техники анализировать динамику распространения загрязнения подземных вод и способна к адаптации в условиях изменяющегося техногенного воздействия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-07-00451.

Список литературы

References

- Арлоу Д., Нейштатт А., 2007. UML 2 и Унифицированный процесс. Практический объектно-ориентированный анализ и проектирование. М.: Символ-Плюс, 624.
- Arlou D., Nejshtadt A. 2007. UML2 and the Unified Process. Prakticheskiy ob'ektno-orientirovannyj analiz i proektirovanie [Practical: Object-Oriented Analysis and Design] Moscow, Symbol-Plus, 624. (in Russian)
- Корнилов А.Г., Кичигин Е.В., Колмыков С.Н., Новых Л.Л., Дроздова Е.А., Петин А.Н., Присный А.В., Лазарев А.В., Колчанов А.Ф., 2015. Экологическая ситуация в районах размещения горнодобывающих предприятий региона курской магнитной аномалии. Белгород, ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 157.
- Kornilov A.G., Kichigin E.V., Kolmyikov S.N., Novyih L.L., Drozdova E.A., Petin A.N., Priskyiy A.V., Lazarev A.V., Kolchanov A.F., 2015. The ecological situation in the areas where mining companies in the region of the Kursk magnetic anomaly. Belgorod ID "Belgorod" NRU "BSU", 157. (in Russian)
- Корнилов И.А., Колмыков С.Н., Петин А.Н., 2012. Оценка степени воздействия горнодобывающих предприятий КМА на гидроэкологическую ситуацию Белгородской области. Горный журнал. 9: 29-31.
- Kornilov I.A., Kolmyikov S.N., Petin A.N., 2012. Assessment of the impact of mining enterprises of Kursk Magnetic Anomaly on the hydroecological situation of Belgorod. Gornyy zhurnal [Mining Journal] 9: 29-31. (in Russian)
- Петин А.Н., Киреева-Гененко И.А., Лопина Е.М., Симонова М.А., 2016. Техногенная трансформация геологической среды и экологическая ситуация в Старооскольско-Губкинском горнопромышленном районе КМА. Современные тенденции развития науки и технологий. 7-1: 69-72.
- Petin A.N., Kireeva-Genenko I.A., Lopina E.M., Simonova M.A., 2016. Technogenic transformation of the geological environment and the environmental situation in Stary Oskol, Gubkin KMA mining area. Sovremennyye tendentsii razvitiya nauki i tehnologii [Modern trends in the development of science and technology] 7-1: 69-72. (in Russian)
- Петин А.Н., Крамчанинов Н.Н., Погорельцев И.А., Уколов И.М., 2013. Оценка техногенного воздействия на подземные воды в зоне влияния Старооскольско-Губкинского промышленного комплекса. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 15 (3-3): 949-953.
- Petin A.N., Kramchaninov N.N., Pogoreltsev I.A., Ukolov I.M., 2013. Assessment of anthropogenic impact on groundwater in the area of influence of Stary Oskol Gubkin-industrial complex. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences] 15 (3-3): 949-953. (in Russian)
- Петина М.А., Черноморец А.А., Коваленко А.Н., 2016. Разработка методов приобретения и обработки знаний о формировании новой гидрогеологической среды. Научные ведомости БелГУ. Сер. Экономика. Информатика. 23(244): 140-146.
- Petina M.A., Chernomorets A.A., Kovalenko A.N., 2016. Development of methods for acquisition and processing of knowledge about the formation of a new hydrogeological environment. Nauchnye vedomosti BelGU.



Jekonomika. Informatika [Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics Information technologies] 23(244): 140-146. (in Russian)

Рассел С., Норвиг П., 2015. Искусственный интеллект. Современный подход. Пер. с англ. М., Вильямс, 1408.

Rassel S., Norvig P., 2015. Artificial Intelligence. The modern approach. Trans. from English. Moscow, Williams, 1408. (in Russian)

Черноморец А.А., Болгова Е.В., Петина М.А., 2016. О математических моделях анализа состояния подземных вод горнодобывающего узла. Современные тенденции развития науки и производства. Сборник материалов III Международной научно-практической конференции. Западно-Сибирский научный центр; Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 275-278.

Chernomorets A.A., Bolgova E.V., Petina M.A., 2016. About the mathematical models analysis of groundwater mining site. Modern trends in the development of science and industry. Sovremennyye tendentsii razvitiya nauki i proizvodstva. Sbornik materialov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Zapadno-Sibirskiy nauchnyy tsentr; Kuzbasskiy gosudarstvenniy tehnicheskiy universitet imeni T.F. Gorbacheva [The collection of materials of the III International Scientific and Practical Conference. West-Siberian Research Center; Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev] 275-278. (in Russian)

Шварц А.А., 1996. Экологическая гидрогеология: Учебное пособие. СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 60.

Shvarc A.A., 1996. Environmental Hydrogeology: Textbook. SPb.: Publishing house of the University of St. Petersburg, 60. (in Russian)

Шестопалов В.М., 1988. Методы изучения естественных ресурсов подземных вод. М.: Недра, 168.

Shestopalov V.M., 1988. Methods of study of natural groundwater resources. Moscow, Nedra, 168. (in Russian)