

С.Б. Сизов, Т.И. Дровосекова, В.И. Казорин, В.В. Цаплева

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДИСКРЕТИЗАЦИИ ДЛЯ МОДЕЛИ ГИДРОЛИТОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ БЛОЧНОЙ СТРУКТУРЫ

В настоящее время в регионе Кавказские Минеральные Воды возникла тенденция к ухудшению качества гидроминерального сырья. Бесконтрольный водоотбор из скважин приводит к проникновению в воды месторождений загрязненных грунтовых вод. Улучшить ситуацию может прогнозирование объема загрязнений и контроль водоотбора. Для этого необходима качественная компьютерная модель гидрогеологических процессов, происходящих в регионе. В данной статье рассматривается возможность создания программы блочного типа, которая позволит реализовать модели гидрогеологических процессов любой сложности и масштабов. Поскольку речь идет о большом регионе, форма геологических пластов и граничные условия между ними и на поверхности земли весьма разнообразны, поэтому модель становится весьма сложной. Решением этой проблемы может стать разработка программного обеспечения, позволяющего сформировать модель всего региона из отдельных блоков, для каждого из которых выбираются граничные условия, после чего эти блоки должны быть состыкованы между собой таким образом, чтобы результирующая модель была достаточно приближена к реальным условиям. Одна из проблем, возникающих при создании такой модели – стыковка границ и задание граничных условий между блоками. Таким образом, цель данной работы – разработка методики стыковки границ между блоками. В статье предложено выполнять двухуровневую дискретизацию модели, которая позволит разбить регион на блоки, и для каждого блока реализовать модель. Для каждого блока также поставлены граничные условия, как на границах пластов, так и на границах блоков. В ходе проектирования была создана универсальная система моделирования процессов, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных, в данном случае – гидродинамических процессов, определяющих величину давления в скважине. Построенная модель имеет блочную структуру, предназначена для исследования области произвольных размеров и формы. Полученные результаты могут быть использованы для оценки влияния промышленных предприятий на качество гидроминеральных ресурсов региона.

Гидролитосферные процессы; добывающие скважины; оптимизация; депрессионная воронка.

S.B. Sizov, T.I. Drovosekova, V.I. Kazorin, V.V. Tsapleva

DEVELOPMENT OF DISCRIMINATION ALGORITHM FOR THE MODEL OF BLOCK STRUCTURED HYDROLYTOSPHERIC PROCESSES

At present, the Caucasian Mineral Waters region has a tendency to deteriorate the quality of hydromineralic raw materials. Uncontrolled water withdrawal from wells leads to penetration of contaminated groundwater into the waters. The prediction of the volume of pollution and control of water collection can improve the situation. For this, a qualitative computer model of the hydrogeological processes occurring in the region is needed. This article considers the possibility of creating a block-type program that will allow the implementation of hydrogeological processes models of any complexity and scale. Since we are talking about a large region, the form of the geological strata and the boundary conditions between them, as well as on the earth surface, are very diverse, so the model becomes very complex. The solution to this problem can be the development of software that allows the model of the whole region to be formed from individual blocks, for each of which boundary conditions are selected, after which these blocks must be interconnected in such a way that the resulting model is sufficiently approximated to real conditions. One of the problems that arise when creating such a model is docking boundaries and setting boundary conditions between blocks. Thus, the goal of this work is the development of a technique for joining boundaries between blocks. The article proposes to perform a two-level discretization of the model, which will allow to break the region into blocks, and for each block to implement the model. For each block, boundary conditions are also

imposed, both at the boundaries of the strata and at the boundaries of the blocks. During the design, a universal system of modeling processes was developed, described by partial differential equations, in this case - hydrodynamic processes that determine the amount of pressure in the well. The constructed model has a block structure, it is intended for investigation of the region of arbitrary sizes and shapes. The obtained results can be used to assess the influence of industrial enterprises on the quality of the region's hydromineral resources.

Hydrolithosphere processes; production wells; optimization; depression funnel.

Введение. В настоящее время в связи с ухудшающейся экологической ситуацией в курортном регионе Кавказские Минеральные Воды особую актуальность приобретает разработка математических и компьютерных моделей процессов водоотбора минеральных вод. Подобные модели позволяют планировать объемы водозабора таким образом, чтобы ущерб экологии не превышал допустимых норм. К настоящему времени исследователями разработан ряд моделей, которые позволяют проанализировать гидролитосферные процессы на отдельных участках региона КМВ [11, 12, 16]. Однако, залежи минеральных вод региона связаны между собой, поэтому водоотбор в одном из них влияет и на соседние месторождения [13, 14]. Таким образом, необходимы средства для комплексного системного анализа гидролитосферных процессов всего региона.

Поскольку речь идёт о большом регионе, форма геологических пластов и граничные условия между ними и на поверхности земли весьма разнообразны, поэтому модель становится весьма сложной.

Решением проблемы сложной формы геологических пластов может стать разработка программного обеспечения, позволяющего сформировать модель всего региона из отдельных блоков, для каждого из которых выбираются граничные условия, после чего эти блоки должны быть состыкованы между собой таким образом, чтобы результирующая модель была достаточно приближена к реальным условиям.

Также использование блочной структуры модели гидролитосферных процессов позволит снизить требования к использованию оперативной памяти, используемой для моделирования, так как в отличие от прежних подходов к моделированию для достижения необходимой точности при использовании блочной структуры моделируется структура каждого блока отдельно и нет необходимости загружать в оперативную память весь объект.

Постановка задачи. В общем случае единичный блок, это однородный трехмерный фрагмент местности, характеризующийся рядом гидродинамических и геофизических характеристик. Из единичных блоков компонуется модель региона в целом.

Процессы фильтрации и массопереноса, происходящие в единичном блоке (с некоторыми допущениями) можно описать с помощью дифференциального уравнения [15]:

$$\eta \cdot \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) - F_x \frac{\partial S}{\partial x}, \quad (1)$$

где η – коэффициент, характеризующий упругость пласта; k_x, k_y, k_z – коэффициенты фильтрации, S – понижение давления; F_x – скорость движения воды в пласте.

Математическая модель единичного блока, включает в себя помимо дифференциального уравнения еще начальные и граничные условия.

Граничные условия на поверхности блока и между пластами задаются на основе гидрогеологических данных.

Граничные условия I рода выражаются в форме сохранения на границе значения понижения уровня, постоянного или переменного во времени:

$$S = \text{const}, S = f(t).$$

Граничные условия II рода представлены функцией удельного расхода потока, нормального к границе:

Начальные условия:

$$t = 0, Q = 0, S = 0.$$

где S – начальное понижение уровня в водоносных горизонтах.

На рис. 1 приведена схема региона Кавказские Минеральные Воды, для которой будет строиться модель блочной структуры

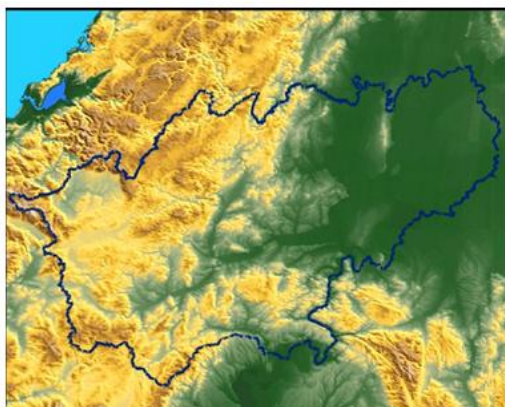


Рис. 1. Границы моделируемого региона

Дискретизация модели. Количество и параметры геологических пластов в исследуемых районах не однородны, так же как не однородны и входные воздействия на них: водоемы, техногенные отходы, количество осадков и др. Поэтому весь регион разбивается на отдельные блоки однородной структуры. Пример дискретизации региона приведен на рис. 2.

В данном проекте целесообразно использовать двухуровневую систему дискретизации, выполненную следующим образом. Внешний уровень дискретизации представляет собой разбиение области на равномерную или неравномерную сетку (рис. 2).

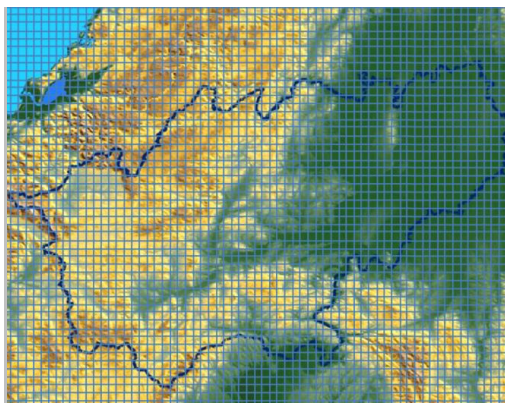


Рис. 2. Дискретизация исследуемой области

Каждая ячейка сетки является отдельным блоком, в котором исследуются гидролитосферные процессы в каждый дискретный момент времени. Второй уровень дискретизации – это разбиение на сетку каждого элементарного блока (рис. 3).

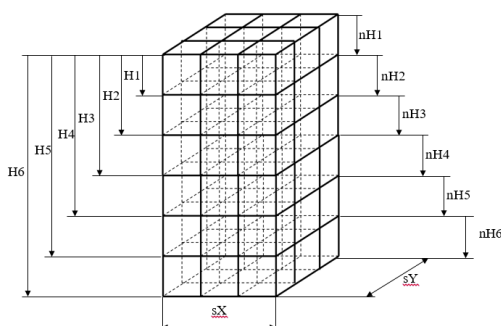


Рис. 3. Внутренний уровень дискретизации

Данный элементарный блок состоит из шести слоев. Каждый слой в свою очередь разбит на сетку по трем осям декартовой системы координат. По оси Z каждому слою соответствует $nH_i = 50$ шагов дискретизации, где i – порядковый номер слоя.

sX – количество шагов дискретизации по X;

sY – количество шагов дискретизации по Y;

$H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6$ – значения глубины залегания соответствующих слоев.

Известно, что дифференциальное уравнение, описывающее гидродинамические процессы, имеет вид (1).

Тогда, учитывая, что каждый слой имеет собственные коэффициенты упругости, фильтрации и скорости движения воды, требуется записать шесть уравнений пространственной фильтрации в дискретном виде:

$$\frac{dS_{i,j,k,t} - dS_{i,j,k,t-1}}{\Delta t} = \frac{1}{\eta_1} \cdot \left(k_{x1} \frac{dS_{i-1,j,k,t-1} - 2 \cdot dS_{i,j,k,t-1} + dS_{i+1,j,k,t-1}}{\Delta x^2} + k_{y1} \frac{dS_{i,j-1,k,t-1} - 2 \cdot dS_{i,j,k,t-1} + dS_{i,j+1,k,t-1}}{\Delta y^2} + k_{z1} \frac{dS_{i,j,k-1,t-1} - 2 \cdot dS_{i,j,k,t-1} + dS_{i,j,k+1,t-1}}{dH1^2} \right) - F_{x1} \cdot \frac{dS_{i,j,k,t-1} - dS_{i-1,j,z,t-1}}{\Delta x},$$

$$0 < i < sX, 0 < j < sY, 0 < z < H1;$$

$$\frac{dS_{i,j,k,t} - dS_{i,j,k,t-1}}{\Delta t} = \frac{1}{\eta_2} \cdot \left(k_{x2} \frac{dS_{i-1,j,k,t-1} - 2 \cdot dS_{i,j,k,t-1} + dS_{i+1,j,k,t-1}}{\Delta x^2} + k_{y2} \frac{dS_{i,j-1,k,t-1} - 2 \cdot dS_{i,j,k,t-1} + dS_{i,j+1,k,t-1}}{\Delta y^2} + k_{z2} \frac{dS_{i,j,k-1,t-1} - 2 \cdot dS_{i,j,k,t-1} + dS_{i,j,k+1,t-1}}{dH2^2} \right) - F_{x2} \cdot \frac{dS_{i,j,k,t-1} - dS_{i-1,j,z,t-1}}{\Delta x},$$

$$0 < i < sX, 0 < j < sY, H1 < z < H2;$$

$$\frac{dS_{i,j,k,t} - dS_{i,j,k,t-1}}{\Delta t} = \frac{1}{\eta_3} \cdot \left(k_{x3} \frac{dS_{i-1,j,k,t-1} - 2 \cdot dS_{i,j,k,t-1} + dS_{i+1,j,k,t-1}}{\Delta x^2} + k_{y3} \frac{dS_{i,j-1,k,t-1} - 2 \cdot dS_{i,j,k,t-1} + dS_{i,j+1,k,t-1}}{\Delta y^2} + k_{z3} \frac{dS_{i,j,k-1,t-1} - 2 \cdot dS_{i,j,k,t-1} + dS_{i,j,k+1,t-1}}{dH3^2} \right) - F_{x3} \cdot \frac{dS_{i,j,k,t-1} - dS_{i-1,j,z,t-1}}{\Delta x},$$

$$0 < i < sX, 0 < j < sY, H2 < z < H3;$$

$$\frac{dS_{i,j,k,t} - dS_{i,j,k,t-1}}{\Delta t} = \frac{1}{\eta_4} \cdot \left(k_{x4} \frac{dS_{i-1,j,k,t-1} - 2 \cdot dS_{i,j,k,t-1} + dS_{i+1,j,k,t-1}}{\Delta x^2} + k_{y4} \frac{dS_{i,j-1,k,t-1} - 2 \cdot dS_{i,j,k,t-1} + dS_{i,j+1,k,t-1}}{\Delta y^2} + k_{z4} \frac{dS_{i,j,k-1,t-1} - 2 \cdot dS_{i,j,k,t-1} + dS_{i,j,k+1,t-1}}{dH4^2} \right) - F_{x4} \cdot \frac{dS_{i,j,k,t-1} - dS_{i-1,j,z,t-1}}{\Delta x},$$

$$0 < i < sX, 0 < j < sY, H3 < z < H4;$$

$$\frac{dS_{i,j,k,t} - dS_{i,j,k,t-1}}{\Delta t} = \frac{1}{\eta_5} \cdot (k_{x5} \frac{dS_{i-1,j,k,t-1} - 2 \cdot dS_{i,j,k,t-1} + dS_{i+1,j,k,t-1}}{\Delta x^2} + k_{y5} \frac{dS_{i,j-1,k,t-1} - 2 \cdot dS_{i,j,k,t-1} + dS_{i,j+1,k,t-1}}{\Delta y^2} + k_{z5} \frac{dS_{i,j,k-1,t-1} - 2 \cdot dS_{i,j,k,t-1} + dS_{i,j,k+1,t-1}}{dH5^2}) - F_{x5} \cdot \frac{dS_{i,j,k,t-1} - dS_{i-1,j,z,t-1}}{\Delta x},$$

$$0 < i < sX, 0 < j < sY, H4 < z < H5;$$

$$\frac{dS_{i,j,k,t} - dS_{i,j,k,t-1}}{\Delta t} = \frac{1}{\eta_6} \cdot (k_{x6} \frac{dS_{i-1,j,k,t-1} - 2 \cdot dS_{i,j,k,t-1} + dS_{i+1,j,k,t-1}}{\Delta x^2} + k_{y6} \frac{dS_{i,j-1,k,t-1} - 2 \cdot dS_{i,j,k,t-1} + dS_{i,j+1,k,t-1}}{\Delta y^2} + k_{z6} \frac{dS_{i,j,k-1,t-1} - 2 \cdot dS_{i,j,k,t-1} + dS_{i,j,k+1,t-1}}{dH6^2}) - F_{x6} \cdot \frac{dS_{i,j,k,t-1} - dS_{i-1,j,z,t-1}}{\Delta x},$$

$$0 < i < sX, 0 < j < sY, H5 < z < H6;$$

Для границ раздела сред справедлива следующая дискретная форма записи уравнений Дарси:

$$k_{z1} \frac{dS_{i,j,nH1,t}}{dz} = k_{z2} \frac{dS_{i,j,nH1+1,t}}{dz},$$

$$0 < i < sX, 0 < j < sY, t > 0;$$

На границах остальных пластов условия аналогичны.

Для реализации модели блочной структуры был разработан следующий алгоритм дискретизации.

В разработанной программе в процессе внешней дискретизации исследуемой области каждому блоку присваивается идентификатор в зависимости от комбинации граничных условий на контуре блока. Нумерация блоков приведена на рис. 4.

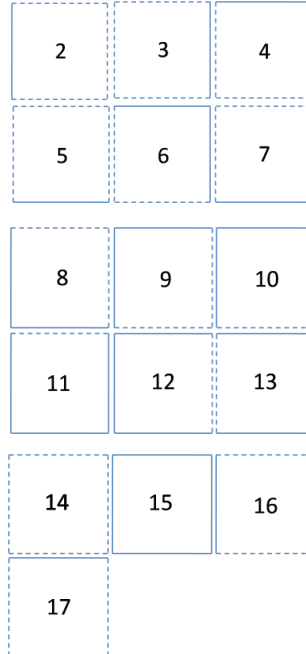


Рис. 4. Нумерация блоков в зависимости от комбинации изолированных и неизолированных сторон

При программировании условий на границах стыковки первым блоком считается текущий, т.е. тот блок, в котором производятся гидродинамические расчеты.

Например, следующим стыковочным комбинациям, исходя из граничных условий, соответствуют уравнения:

Правая сторона первого блока – левая сторона второго блока:

$$k1_x \frac{dS_{sX,j,h,t}}{dx} = k2_x \frac{dS_{1,j,h,t}}{dx},$$

$$0 < j < sY, 0 < h < nH6, t > 0;$$

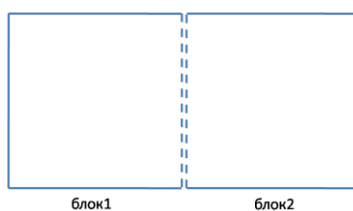


Рис. 5. Пример стыковки 1

Правая сторона второго блока – левая сторона первого блока:

$$k1_x \frac{dS_{1,j,h,t}}{dx} = k2_x \frac{dS_{sX,j,h,t}}{dx},$$

$$0 < j < sY, 0 < h < nH6, t > 0;$$

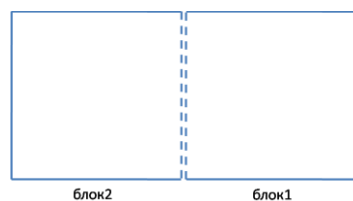


Рис. 6. Пример стыковки 2

Верхняя сторона первого блока – нижняя сторона второго блока:

$$k1_y \frac{dS_{i,sY,h,t}}{dy} = k2_y \frac{dS_{i,1,h,t}}{dy},$$

$$0 < i < sX, 0 < h < nH6, t > 0;$$



Рис. 7. Пример стыковки 3

Нижняя сторона первого блока – нижняя сторона второго блока:

$$k1_y \frac{dS_{i,1,h,t}}{dy} = k2_y \frac{dS_{i,sY,h,t}}{dy},$$

$$0 < i < sX, 0 < h < nH6, t > 0;$$



Рис. 8. Пример стыковки 4

Таким образом, для решения задачи моделирования области произвольных форм и размеров необходима организация блочной структуры, декомпозирующая сложную гидрогеологическую систему на более простые составляющие. С этой целью в проекте использовалась двухуровневая дискретизация. Для реализации алгоритма внешней и внутренней дискретизации в программе использовались функции для работы с файловой системой, так как загрузить сразу все блоки в оперативную память вычислительной машины не представляется возможным в силу повышенной информационной емкости программируемых объектов. Просчет процессов в каждом блоке необходимо производить синхронно, поэтому в разработанном приложении присутствуют довольно частые обращения к файлам.

В результате численного моделирования был получен график переходного процесса, приведенный на рис. 9.

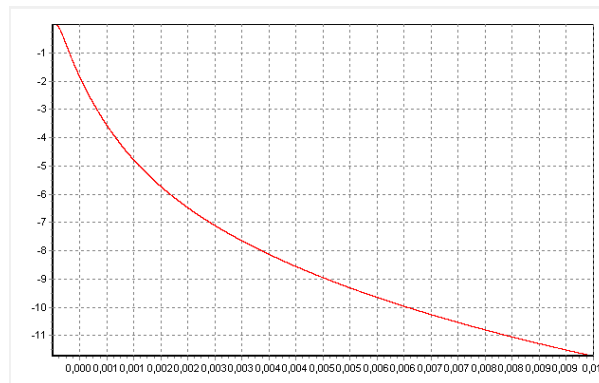


Рис. 9. График переходного процесса

Выводы. В ходе проектирования была создана универсальная система моделирования процессов, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных, в данном случае – гидродинамических процессов, определяющих величину давления в скважине. Построенная модель имеет блочную структуру, предназначена для исследования области произвольных размеров и формы. Важность разработки

проекта очень велика, так как на сегодняшний день очень важной является проблема рационального природопользования, а также совершенствования методов добычи жидких полезных ископаемых. Содержащиеся в недрах земной коры запасы воды играют важную роль в медицине, курортном и сельском хозяйстве, энергетике, поэтому, в конечном итоге, от степени изученности методов управления гидролитосферными процессами зависит уровень развития экономики в целом.

В дальнейшем возможна комплексная доработка программного продукта проекта с целью повышения скорости вычислений, точности и детализированности модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бондарева Г.Л., Дзанаев С.Б.* Гидрогеологический отчет о режиме эксплуатации месторождений минеральных вод Кисловодского курорта за 2006 – 2009 гг. – Ессентуки, 2010.
2. *Веселов Г.Е., Першин М.И.* Проектирование распределенных систем управления гидролитосферными процессами // Известия вузов. Геология и разведка. – 2016. – № 1. – С. 99-105.
3. *Гавич И.К., Семенова С.М., Швец В.М.* Методы обработки гидрогеологической информации с вариантами задач. – М.: Высшая школа, 1981. – 160 с.
4. *Григорьев В.В., Быстров С.В., Першин И.М., Мансурова О.К., Першин М.И.* Качественное распределение мод в системах с распределенными параметрами // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – № 7. – С. 12-18.
5. *Дровосокова Т.И.* Особенности моделирования процессов фильтрации на языке Python // Университетские чтения – 2017 Материалы научно-методических чтений ПГУ. – 2017. – С. 15-21.
6. *Дровосокова Т.И., Сизов С.Б., Русак С.Н.* Моделирование тепловых процессов в резервуаре санитарной обработки гидроминерального сырья // Современная наука и инновации. – 2017. – № 3 (19). – С. 67-73.
7. *Дровосокова Т.И., Першин И.М.* Особенности моделирования гидролитосферных процессов региона Кавказских Минеральных Вод // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2016. – Т. 1. – С. 229-232.
8. *Лукнер Л., Шестаков В.М.* Моделирование геофильтрации. – М.: Недра, 1980. – 357 с.
9. *Малков А.В., Першин И.М., Першин М.И.* Оптимизация количества водозаборных скважин при эксплуатации месторождений минеральных вод // Недропользование XXI век. – Февраль 2015. – № 1 (51). – С. 100-104.
10. *Малков А.В., Першин И.М.* Синтез распределенных регуляторов для систем управления гидролитосферными процессами // Мир лингвистики и коммуникации: электронный научный журнал. – 2007. – № 2. – С. 235.
11. *Малков А.В., Першин И.М., Помеляйко И.С.* Анализ экологического состояния гидроминеральной базы курорта Кисловодск // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2016. – № 1. – С. 12-22.
12. *Малков А.В., Першин И.М., Помеляйко И.С.* Проблемы экологической безопасности гидроминеральной базы курорта Кисловодск // Актуальные проблемы гидролитосферы (диагностика, прогноз, управление, оптимизация и автоматизация): Сб. докладов. – 2015. – С. 92-116.
13. *Малков А.В., Цаплева В.В., Хмель В.В.* Определение радиуса влияния гидрогеологических скважин // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2009. – № 5. – С. 117-120.
14. *Манторова И.В., Цаплева В.В.* Изучение влияния техногенных отходов на гидролитосферу // Университетские чтения - 2015: Материалы научно-методических чтений ПГЛУ. – 2015. – С. 74-81.
15. *Першин И.М., Кухарова Т.В.* Описание многомерных объектов дифференциальным уравнением в частных производных // Системный синтез и прикладная синергетика: Сб. научных трудов VII Всероссийской научной конференции. – 2015. – С. 150-158.
16. *Цаплева В.В., Душин С.Е.* Разработка математической модели влияния г. Бештау на гидролитосферу региона г. Лермонтова // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. – 2011. – № 1. – С. 53-56.

17. Шагояну С.А. Подземные воды Центральной и Восточной частей Северного Кавказа. – М.: Госгеолтехиздат, 1959. – 306 с.
18. Drovosekova T.I., Pershin I.M. Peculiarities of modelling hydro-lithospheric processes in the region of Kavkazskiy Mineralnye Vody (caucasus mineral springs) // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016. 7519732. – P. 215-217.
19. Pershin I.M., Pervukhin D.A., Ilyushin Y.V., Afanaseva O.V. Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. A synthesis of distributed management systems // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87. – 2017. 032029. – P. 1-7.
20. Pershin I.M., Pervukhin D.A., Ilyushin Y.V., Afanaseva O.V. Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. Selection of optimal number of extracting wells // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87. – 2017. 032030. – P. 1-6.

REFERENCES

1. Bondareva G.L., Dzanaev S.B. Hidrogeologicheskiy otchet o rezhime ekspluatatsii mestorozhdeniy mineral'nykh vod Kislovodskogo kurorta za 2006 – 2009 gg. [Hydrogeological report on the mode of exploitation of mineral water deposits of Kislovodsk resort for 2006-2009]. Essentuki, 2010.
2. Veselov G.E., Pershin M.I. Proektirovanie raspredelennykh sistem upravleniya gidrolitosfernymi protsessami [Design of distributed control systems hydrolithosphere processes], *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka* [Proceedings of Higher Schools. Geology and Razvedka], 2016, No. 1, pp. 99-105.
3. Gavich I.K., Semenova S.M., SHvets V.M. Metody obrabotki gidrogeologicheskoy informatsii s variantami zadach [Methods for processing hydrogeological information with task variants]. Moscow: Vysshaya shkola, 1981, 160 p.
4. Grigor'ev V.V., Bystrov S.V., Pershin I.M., Mansurova O.K., Pershin M.I. Kachestvennoe raspredelenie mod v sistemakh s raspredelennymi parametrami [Qualitative distribution of modes in systems with distributed parameters], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2016, No. 7, pp. 12-18.
5. Drovosekova T.I. Osobennosti modelirovaniya protsessov fil'tratsii na yazyke Python [Peculiarities of modeling filtering processes in the Python language], *Universitetskie chteniya – 2017 Materialy nauchno-metodicheskikh chteniy PGU* [University of reading – 2017 Materials of the scientific-methodical readings of the PSU], 2017, pp. 15-21.
6. Drovosekova T.I., Sizov S.B., Rusak S.N. Modelirovanie teplovykh protsessov v rezervuare sanitarnoy obrabotki gidromineral'nogo syr'ya [Modeling of thermal processes in the tank of sanitary processing of hydromineral raw materials], *Sovremennaya nauka i innovatsii* [Modern science and innovation], 2017, No. 3 (19), pp. 67-73.
7. Drovosekova T.I., Pershin I.M. Osobennosti modelirovaniya gidrolitosfernykh protsessov regiona Kavkazskikh Mineral'nykh Vod [Peculiarities of modeling of hydrolithospheric processes in the region of the Caucasus Mineral Water], *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam* [International conference on soft computing and measurements], 2016, Vol. 1, pp. 229-232.
8. Lukner L., SHestakov V.M. Modelirovanie geofil'tratsii [Geofiltration modeling]. Moscow: Nedra, 1980, 357 p.
9. Malkov A.V., Pershin I.M., Pershin M.I. Optimizatsiya kolichestva vodozabornykh skvazhin pri ekspluatatsii mestorozhdeniy mineral'nykh vod [Optimization of the number of water wells during the exploitation of mineral water deposits], *Nedropol'zovanie XXI vek* [Subsoil use XXI century], Fevral' 2015, No. 1 (51), pp. 100-104.
10. Malkov A.V., Pershin I.M. Sintez raspredelennykh regulyatorov dlya sistem upravleniya gidrolitosfernymi protsessami [Synthesis of distributed controllers for hydro-lithospheric process control systems], *Mir lingvistiki i kommunikatsii: elektronnyy nauchnyy zhurnal* [World of linguistics and communication: electronic scientific journal], 2007, No. 2, pp. 235.
11. Malkov A.V., Pershin I.M., Pomelyayko I.S. Analiz ekologicheskogo sostoyaniya gidromineral'noy bazy kurorta Kislovodsk [Analysis of the ecological state of the hydromineral base of the Kislovodsk resort], *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka* [Proceedings of Higher Schools. Geology and Razvedka], 2016, No. 1, pp. 12-22.

12. *Malkov A.V., Pershin I.M., Pomelyayko I.S.* Problemy ekologicheskoy bezopasnosti gidromineral'noy bazy kurorta Kislovodsk [Problems of environmental safety of the Kislovodsk hydro-mineral base], *Aktual'nye problemy gidrolitosfery (diagnostika, prognoz, upravlenie, optimizatsiya i avtomatizatsiya): Sb. dokladov* [Actual problems of the hydrolithosphere (diagnostics, forecast, management, optimization and automation): Collection of reports], 2015, pp. 92-116.
13. *Malkov A.V., Tsapleva V.V., KHmel' V.V.* Opredelenie radiusa vliyaniya gidrogeologicheskikh skvazhin [Determination of the radius of influence of hydrogeological wells], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Estestvennye nauki* [University News North-Caucasian Region. Natural Sciences Series], 2009, No. 5, pp. 117-120.
14. *Mantorova I.V., Tsapleva V.V.* Izuchenie vliyaniya tekhnogennykh otkhodov na gidrolitosferu [Study of the impact of man-made waste on the hydrolithosphere], *Universitetskie chteniya - 2015: Materialy nauchno-metodicheskikh chteniy PGLU* [University of reading - 2015: Materials of the scientific-methodical readings of PSLU], 2015, pp. 74-81.
15. *Pershin I.M., Kukharova T.V.* Opisanie mnogomernykh ob"ektov differentsial'nym uravneniem v chastnykh proizvodnykh [Description of multidimensional objects by a partial differential equation], *Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika: Sb. nauchnykh trudov VII Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [System synthesis and applied synergetics Collection of scientific papers of the VII All-Russian Scientific Conference. 2015], 2015, pp. 150-158.
16. *Tsapleva V.V., Dushin S.E.* Razrabotka matematicheskoy modeli vliyaniya g. Beshtau na gidrolitosferu regiona g. Lermontova [Development of a mathematical model of the influence of Beshtau on the hydrolithosphere of the region of Lermontov], *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo elektrotekhnicheskogo universiteta LETI* [Izvestiya SPbGETU «LETI»], 2011, No. 1, pp. 53-56.
17. *Shagoyants S.A.* Podzemnye vody Tsentral'noy i Vostochnoy chastey Severnogo Kavkaza [Groundwaters of the Central and Eastern parts of the North Caucasus]. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1959, 306 p.
18. *Drovosekova T.I., Pershin I.M.* Peculiarities of modelling hydro-lithospheric processes in the region of Kavkazskiy Mineralnye Vody (caucasus mineral springs), *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016*. 7519732, pp. 215-217.
19. *Pershin I.M., Pervukhin D.A., Ilyushin Y.V., Afanaseva O.V.* Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. A synthesis of distributed management systems, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 87, 2017. 032029, pp. 1-7.
20. *Pershin I.M., Pervukhin D.A., Ilyushin Y.V., Afanaseva O.V.* Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. Selection of optimal number of extracting wells, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 87, 2017. 032030, pp. 1-6.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Б. Чернышев.

Сизов Сергей Борисович – Южный федеральный университет; e-mail: harrior@gmail.com; 357538, Ставропольский край, г. Пятигорск, ул. Украинская, 56, к. 1, кв. 9; тел.: +79187551613; аспирант.

Казорин Виктор Иванович – e-mail: kazorin1@yandex.ru; 357633, Ставропольский край, г. Ессентуки, ул. Цветочная, 12; тел.: +79282666496; аспирант.

Дровоколова Татьяна Ивановна – Северо-Кавказский федеральный университет (филиал в г. Пятигорске); e-mail: tatyana0706@gmail.com; 357431, Ставропольский край, г. Железноводск, пос. Иноземцево, ул. Верхневокзальная, 12; тел.: +79283250605; кафедра управления в технических системах; к.т.н.; доцент.

Цаплева Валентина Викторовна – e-mail: val-gyazanova@yandex.ru; 357324, Ставропольский край, Ст. Зольская, переулок Южный, 9; тел.: +79614888039; кафедра управления в технических системах; к.т.н.; доцент.

Sizov Sergey Borisovich – Southern Federal University; e-mail: harrior@gmail.com; 56-1-9, Ukrainskaya street, Pyatigorsk, Stavropol area, 357538, Russia; phone: +79187551613; graduate student.

Kazorin Viktor Ivanovich – e-mail: kazorin1@yandex.ru; 12, Tsvetochnaya street, Essentuki, Stavropol area, 357633, Russia; phone: +79282666496; graduate student.

Drovesokova Tatiana Ivanovna – North-Caucasus Federal University (Branch in Pyatigorsk); e-mail: tatyana0706@gmail.com; 12, Verhnevorzalnaya street, Zeleznovodsk, Stavropol area, 357431, Russia; phone: +79283250605; the department of control in engineering systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Tsapleva Valentina Viktorovna – e-mail: val-ryazanova@yandex.ru; 9, Uzhiniy allay, Stanitca Zolskaya, Stavropol area, 357324, Russia; phone: +79614888039; the department of control in engineering systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 004.021

DOI 10.23683/2311-3103-2018-5-26-34

В.М. Курейчик, Т.Г. Каплунов**АДАПТИВНЫЙ ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ ПРАВИЛ***

Рассмотрен подход к увеличению поисковых способностей генетического алгоритма. Цель данной работы заключается в нахождении путей ускорения работы генетических алгоритмов используемых для оптимизации и поиска глобальных экстремумов функций. Актуальность работы состоит в том, что на сегодняшний день увеличение поисковых способностей генетических алгоритмов составляет основную проблему при использовании таких алгоритмов. Зачастую при манипуляциях с алгоритмом повышается вероятность попадания в локальный экстремум исследуемой функции. Постановка задачи в данной работе выглядит следующим образом: дан некоторый набор тестовых функций, необходимо найти глобальные экстремумы этих функций, сделав это за полиномиальное время, меньшее чем время, затрачиваемое классическим генетическим алгоритмом. Классический генетический алгоритм реализует действие естественного отбора (ЕО) на уровне индивидов. Однако в микробиологии естественный отбор представляется как отбор генов, эта точка зрения в теории генетических алгоритмов не получила широкого распространения. В данной работе представлен алгоритм реализующий естественный отбор на уровне генов. За меру оценки приспособленности гена в работе принимается его стабильность в процессе смены поколений, которая прослеживается на основе карт Шухарта. В алгоритме используется набор нечетких правил, с помощью которых происходит управление динамически изменяемыми параметрами алгоритма, в частности, вероятность попадания в следующее поколение. На основе заключения о том, что гены являются статистически управляемыми – в алгоритм внедрен блок прогнозирования. Для повышения скорости работы алгоритма можно ввести внутреннее прогнозирование генома. Решение о прогнозировании вносится на основе нечеткого правила: если временной ряд i -го представителя популяции управляем по Шухарту за последние L поколений, то добавить в популяцию особь, геном которой состоит из предсказанных значений генов на K поколений вперед. Таким образом в алгоритме происходит управление динамически изменяемыми параметрами (мутация, размер популяции), а также реализовано прогнозирование наиболее приспособленных генов на основе стороннего ГА. Результаты работы подтверждаются экспериментом, проведенном на тестовых функциях для алгоритмов оптимизации. На основе проведенных экспериментов можно сделать вывод о практической применимости данного алгоритма в поисковых и оптимизационных задачах.

Генетический алгоритм; оптимизация; прогнозирование; контрольные карты Шухарта; нечеткие правила.

* Работа выполнена за счет частичного финансирования по гранту РФФИ № 18-07-00050 и № 18-29-22019/18.