

благоприятными условиями. Так как водообеспечение Московского региона может быть подразделено на такие составляющие, как питьевое, коммунально-бытовое, промышленное и обводнительное, можно предположить, что в условиях недостатка воды все эти составляющие будут подвержены сокращению потребляемых водных ресурсов. Сокращение водных ресурсов для каждой составляющей будет иметь, по-видимому, разную степень.

#### Выводы

На всех реках страны должны быть введены строго регламентированные требования к режимам уровней и расходов воды в нижних бьефах водохранилищ. При соблюдении правил и норм очистки сбрасываемых в реку сточных вод такие режимы предотвратят загрязнение водотоков и водоемов, что позволит в дальнейшем использовать их в качестве источников водоснабжения населения и промышленности.

Наиболее отчетливо проблема надежности водообеспечения Московского региона проявляется сейчас в отношении обводнительных попусков. Отсутствие нормативов надежности для этого вида водопользования приводит к тому, что попуски

являются замыкающими элементами водохозяйственного баланса водоема. Авторы статьи рекомендуют ввести двухступенчатый норматив расчетной обеспеченности для разделения чисто водоснабженческой составляющей (питьевое и коммунально-бытовое водоснабжение) и обводнительных попусков в нижние бьефы гидроузлов. Первая ступень норматива расчетной обеспеченности – обязательная и практически бесперебойная при всех условиях водности чисто водоснабженческой составляющей водохозяйственной системы Московского региона. Вторая ступень норматива расчетной обеспеченности может составить около 90 % (по числу бесперебойных лет) и относиться к обводнительному попуску в реку Москву в размере 30 м<sup>3</sup>/с.

Материал поступил в редакцию 22.09.14.

*Исмайлов Габил Худуш оглы, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Гидрология, гидрогеология и регулирование стока»*

*Тел. 8 (495) 976-23-68*

*E-mail: gabil-1937@mail.ru*

*Клепов Владимир Ильич, доктор технических наук, доцент кафедры «Гидрология, гидрогеология и регулирование стока»*

*E-mail: vikleпов@rambler.ru*

УДК 502/504:628.171

## Ю. Г. БУРКОВА, С. Н. КАРАМБИРОВ, П. М. УМАНСКИЙ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»  
Институт природообустройства имени А. Н. Костякова

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ИСТОЧНИКОВ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПОДОЛЬСКОГО РАЙОНА МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

*Приводится характеристика водозаборных скважин, питающих Подольский район Московской области. На основе имеющейся информации проведен кластерный анализ основных признаков, характеризующих работу скважин, который позволил выявить ряд закономерностей.*

*Водозаборные скважины, кластерный анализ, водоносный горизонт, дебит, понижение, удельный дебит.*

*There is given a description of the water intake wells feeding the Podolsk region of the Moscow area. On the basis of the available information there is given a cluster analysis of the basic features characterizing the work of wells which made it possible to reveal a number of regularities.*

*Water intake well, cluster analysis, water-bearing level, output, lowering, specific output.*

Широкое распространение для целей водопонижения и водоснабжения получили подземные водозаборные сооружения. В настоящее время свыше 60 % городов России снабжаются исключительно подземными водами, 20 % городов используют совместно подземные и поверхностные воды. В сельскохозяйственном водоснабжении доля подземных вод в общем объеме водопотребления составляет 90...95 %.

Характерными для природных условий строительства водозаборов являются неоднородные пласты с чередующимися слабо и хорошо проницаемыми слоями. Водопроницаемые части скважин могут находиться в различных слоях неоднородного водоносного пласта. Водозаборные сооружения в зависимости от хозяйственных потребностей и климатических условий эксплуатируются в разных режимах, вследствие чего движение грунтовых вод имеет, как правило, нестационарный характер.

Развитие методов фильтрационных расчетов с максимальным учетом природных факторов, расположения водоприемных частей сооружений и характера их работы имеет большое практическое значение для правильного прогноза уровней грунтовых вод, определения фильтрационных потерь в сложных гидрогеологических условиях, интенсификации действия водозаборных сооружений с учетом экологических и экономических факторов.

Для оценки эффективности работы подземных водозаборов и выявления их состояния и тенденций развития классические методы во многом исчерпали свои возможности и нуждаются в дополнении более поздними разработками, которые позволяют дать дополнительную информацию о предмете исследований.

Для этих целей в данной работе использовались методы кластерного анализа, позволяющие объединять сходные объекты и представлять их одним представителем – центром. Такие объединения характеризуют правильность проектирования и эксплуатации системы, как правило, не имеют признаков функциональных зависимостей и обычно относятся к конкретному объекту. По этой причине основное внимание уделялось задачам кластеризации, которые помещают близкие образы в один кластер.

Исходной информацией для класте-

ризации является матрица наблюдений:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{M1} & x_{M2} & \dots & x_{Mn} \end{bmatrix},$$

каждая строка которой представляет собой значения  $n$  признаков одного из  $M$  объектов кластеризации. Кластеризация состоит в разбиении объектов из  $X$  на несколько подмножеств (кластеров), в которых объекты между собой более схожи, чем с объектами из других кластеров. В метрическом пространстве «схожесть» определяют через расстояние, которое может рассчитываться как между исходными объектами – строчками матрицы  $X$ , так и от этих объектов к прототипам центров кластеров. Зачастую координаты прототипов заранее неизвестны, их находят одновременно с разбиением данных на кластеры.

Для оценки качества разбиения используется критерий разброса, показывающий сумму расстояний от объектов до центра своего кластера. Минимум этого значения дает решение задачи.

Существует множество методов кластеризации, которые можно классифицировать на четкие и нечеткие. Четкие методы разбивают исходное множество объектов  $X$  на несколько непересекающихся подмножеств. При этом любой объект из  $X$  принадлежит только одному кластеру. Нечеткие методы кластеризации позволяют одному и тому же объекту одновременно принадлежать нескольким или даже всем кластерам, но с разными степенями. Методы кластеризации также классифицируются по тому, определено ли количество кластеров заранее или нет. В данной работе использован алгоритм кластеризации методом нечетких  $c$ -средних [1].

Рассмотрим метод кластеризации на примере забора подземных вод Подольского района Московской области [2].

Эксплуатация подземных вод в городе Подольске началась в начале XX века, но водоотбор был незначителен и не превышал 1000 м<sup>3</sup>/сут. Более-менее достоверная информация о водоотборе имеется с 40-х годов XX века. В это время эксплуатировался подольско-мячковский водоносный горизонт (C<sub>2</sub>mc-pd) в Подольске и его окрестностях, водоотбор составлял 5...7 тыс. м<sup>3</sup>/сут. При таком водоотборе режим уровней

подземных вод практически не был нарушен. Абсолютные отметки уровней подземных вод в подольско-мячковском водоносном горизонте составляли в это время в районе Подольска 120...140 м. В окско-протвинском водоносном горизонте ( $C_{1ok-pr}$ ) уровни были близки к уровням подольско-мячковского горизонта и составляли, по имеющимся данным, 117...131 м. При таких отметках напор над кровлей для подольско-мячковского горизонта составлял 40...50 м, для окско-протвинского – около 100 м. Уровни подземных вод подольско-мячковского горизонта, близкие к естественным, сохранились на южной окраине города Подольска у поселка Кутузово, где они и сейчас составляют около 145 м.

Характеристика уровневого режима дана по результатам замеров уровней в эксплуатационных скважинах, которые проводились в разные годы при обследовании и смене насосов. Замеры в эксплуатационных скважинах имеют погрешность, обусловленную различными факторами, однако по причине большого количества этих замеров тенденции изменения уровней вполне можно проследить.

В работе рассмотрены три градопромышленные агломерации: Подольская, Троицкая, Щербинская.

В *Подольской агломерации*, начиная с 50-х годов XX века, водоотбор постоянно повышался, увеличиваясь в среднем на 3...4 тыс. м<sup>3</sup>/сут за год. Эксплуатировался в основном подольско-мячковский водоносный горизонт, водоотбор из этого горизонта составлял и составляет 90...95 % от суммарного. К 1978 году суммарный водоотбор достиг 120 тыс. м<sup>3</sup>/сут, в 1981–1990 годах составлял около 105 тыс. м<sup>3</sup>/сут, затем постепенно уменьшался и в настоящее время находится на уровне 76 тыс. м<sup>3</sup>/сут. При этом водоотбор из подольско-мячковского горизонта составляет 61,08 тыс. м<sup>3</sup>/сут, из каширского ( $C_{2ks}$ ) – 4,13 тыс. м<sup>3</sup>/сут, из окско-протвинского – 1,01 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

За период с конца 40-х годов прошлого века до настоящего времени уровни подземных вод каменноугольных водоносных горизонтов значительно снизились. Существенно понизились уровни *окско-протвинского водоносного горизонта*: снижение составило около 60...70 м, абсолютные отметки уровней на текущий момент равны 40...50 м. Снижение уровня началось в конце 50-х годов и продолжалось до 1985 года

со средней скоростью 2 м за год. С 1985 по 2002 год снижения уровней практически не происходило. На территории агломерации водоотбор из окско-протвинского горизонта не превышает 1...1,2 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Большие понижения уровней в горизонте связаны с формированием региональной воронки депрессии вокруг города Москвы, а также с небольшой величиной коэффициента водопроводимости (100...200 м<sup>2</sup>/сут).

Снижение уровней в *подольско-мячковском водоносном горизонте* незначительное, несмотря на большую величину водоотбора. Так, снижение уровня в одной из скважин, находящейся в городе Подольске, составило всего 6 м за 58 лет, с 1940 по 1998 год. В другой скважине уровень с 1958 по 2002 год повысился от 123,8 до 125,0 м.

Уровни подземных вод *каширского водоносного горизонта*, по имеющимся данным, колебались в пределах 110...90 м, причем современные абсолютные отметки уровней почти совпадают с теми, которые наблюдались в 1950-х годах.

Незначительное снижение уровней в подольско-мячковском и каширском водоносных горизонтах подтверждается и результатами наблюдений в скважинах режимной сети, расположенных в пределах агломерации.

В *Троицкой градопромышленной агломерации* эксплуатация подземных вод подольско-мячковского водоносного горизонта началась в 1948 году, до 1956 года водоотбор не превышал 2...2,2 тыс. м<sup>3</sup>/сут. С 1963 года водоотбор возрастал со скоростью 0,9 тыс. м<sup>3</sup>/сут в год и в 1984 году составил 20,35 тыс. м<sup>3</sup>/сут. После этого водоотбор из подольско-мячковского горизонта существенно не менялся до 2002 года.

В 1969 году началась эксплуатация окско-протвинского горизонта, к 1975–77 годам водоотбор из него составил около 3000 м<sup>3</sup>/сут, после чего существенно не менялся до настоящего времени. В 1973 году заработала скважина на каширский горизонт, дебит которой менялся в пределах 300...850 м<sup>3</sup>/сут и на 2001 год составлял 479 м<sup>3</sup>/сут. Суммарный водоотбор на 2002 год достигал 16 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

Уровни подземных вод подольско-мячковского водоносного горизонта изменялись за весь период эксплуатации на 5...7 м.

В каширском водоносном горизонте уровни понизились более существенно. Так, в одной из скважин уровень с 1972 по 2002 год понизился с 118,5 до 95,5 м (снижение составило 23 м). В последние годы уровни практически не менялись.

В окско-протвинском водоносном горизонте с 1967 по 2002 год уровни снизились на 25...30 м. С 1982 года снижения уровней практически уже не происходило.

В Щербинской градопромышленной агломерации эксплуатация подземных вод подольско-мячковского водоносного горизонта началась в 1930 году, до 1955 года водоотбор не превышал 3 тыс. м<sup>3</sup>/сут. В 1960–1980 годах водоотбор составлял около 9 тыс. м<sup>3</sup>/сут, к 1989 году вырос до 19 тыс. м<sup>3</sup>/сут, в 2001–2002 годах составил 14,3 тыс. м<sup>3</sup>/сут, при этом 13,06 тыс. м<sup>3</sup>/сут из подольско-мячковского, 1,05 тыс. м<sup>3</sup>/сут из окско-протвинского и 0,32 тыс. м<sup>3</sup>/сут из каширского водоносных горизонтов.

Снижение уровней подземных вод подольско-мячковского водоносного горизонта происходило до 1980-х годов и составило около 30 м. Позднее уровни существенно не менялись.

Таким образом, уровни подземных вод основного эксплуатируемого на рассматриваемой территории водоносного горизонта – подольско-мячковского – меняются только при изменении дебита водозаборов. При постоянном водоотборе изменений уровня не происходит. Такая ситуация объясняется следующими обстоятельствами. Водозаборные узлы расположены в основном недалеко от речных долин рек Пахры, Десны и Мочи. Реки прорезают в среднем и нижнем своем течении юрские глины и имеют прямую связь с подольско-мячковским горизонтом. Подольско-мячковский водоносный горизонт, в свою очередь, на этих участках характеризуется повышенной проводимостью и хорошей взаимосвязью с нижележащими горизонтами. Все это создает чрезвычайно благоприятные условия для эксплуатации подземных вод без существенного понижения их бытовых отметок [2].

По данным отчета были построены графики результатов кластерного анализа, которые характеризуют состояние водозаборов [3]. Кластеризация дебита скважин при обследовании от года бурения приведена на рис. 1.

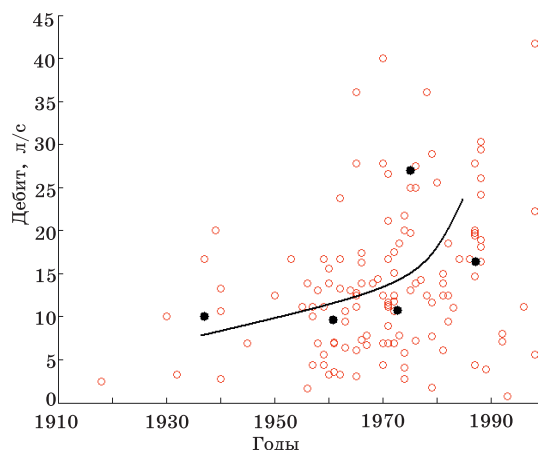


Рис. 1. Кластерный анализ: год бурения – дебит при обследовании (кружками обозначены скважины, центры кластеров – точками)

Линия на графике проведена таким образом, чтобы отразить тенденцию изменения центров кластеров, которые являются «представителями» экспериментальных данных. Ее нельзя считать регрессионной кривой, однако в условиях большого разброса данных некоторые выводы по ее поведению сделать можно.

Из графика видно, что дебит слабо зависит от года бурения. Исключение составляет центр кластера с координатами (1974; 27), где дебит увеличился более чем в 2 раза. Возможно, это связано с увеличением численности населения и строительством промышленных предприятий. В начале 90-х годов происходит спад водопотребления, что объясняется стагнацией производства. В целом наблюдается тенденция увеличения дебита со временем.

Следующей парой признаков для кластерного анализа скважин является дебит и понижение (рис. 2).

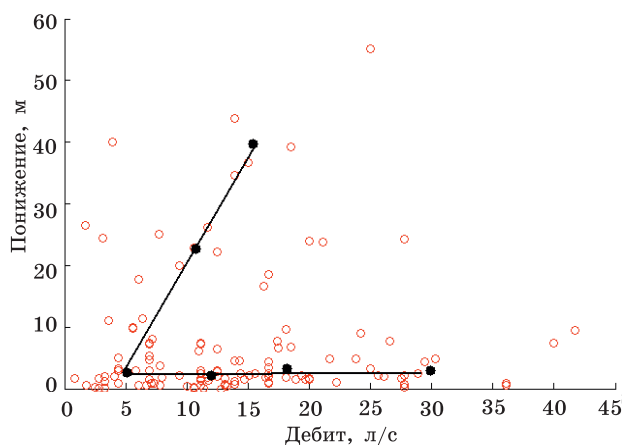


Рис. 2. Кластерный анализ: дебит – понижение при обследовании

В данном случае центры кластеров группируются на двух прямых, что говорит о различных режимах работы скважин. Первая, параллельная оси дебитов, при относительно малых понижениях (около 2,5 м) охватывает основную долю скважин. Вторая, с меньшим числом скважин, наклонена к оси абсцисс примерно на 45°, достигает понижений 40 м и более.

В большинстве случаев дебит существенно меняется в широком диапазоне при относительно небольших понижениях, что можно объяснить высоким коэффициентом водопроницаемости. По всей видимости, его было достаточно для покрытия потребностей в воде. Исключения составляют два кластера, где понижение существенно увеличено, что, по всей видимости, связано с целью увеличения дебита в сложных гидрогеологических условиях или с безнапорным режимом работы.

Кластерный анализ признаков «удельный дебит при строительных откачках – удельный дебит при обследовании» приведен на рисунке 3.

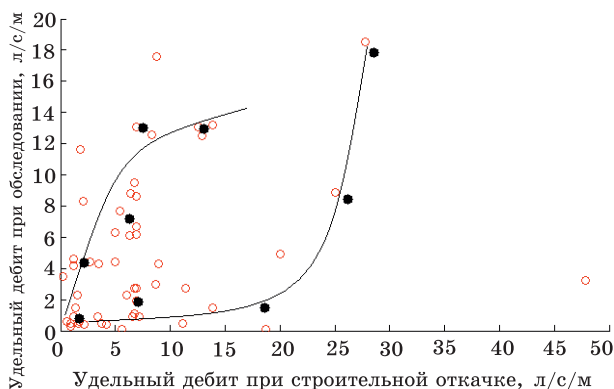


Рис. 3. Кластерный анализ: удельный дебит при строительной откачке – удельный дебит при обследовании

Центры кластеров разделены на две группы (см. рис. 3). В первой группе удельный дебит возрастает, или, по крайней мере, не убывает со временем, что может быть связано с подпиткой от поверхностных источников и изменением гидрогеологических условий. Во второй группе наблюдается тенденция снижения удельного дебита при обследовании по сравнению со строительными откачками, что можно объяснить понижением уровней в водоносном горизонте и кольматацией.

### Выводы

Большой разброс экспериментальных точек для водозаборных скважин не позволяет непосредственно применить к ним методы регрессионного анализа.

Для получения возможной в этих условиях информации целесообразно применение кластерного анализа и выявление закономерностей для центров кластеров как представителей большого числа данных.

Встречаются ситуации, когда зависимости для центров кластеров распадаются на несколько кривых с различными свойствами, что говорит о неоднородности данных.

Результаты кластерного анализа скважин позволили выявить ряд тенденций, характерных для их параметров.

1. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 288 с.

2. Переоценка эксплуатационных запасов пресных подземных вод для водоснабжения населения и предприятий Подольского района Московской области по состоянию на 01.01.2005: Отчет по теме. – Гос. рег. номер 34-03-93/1. – УДК 556.382:628.1 (470.311). – 277 с.

3. Карамбиров С. Н. Новые подходы в моделировании и оптимизации трубопроводных систем. Основы, концепции, методы. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 355 с.

Материал поступил в редакцию 11.04.14.

**Буркова Юлия Геннадьевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные технологии в строительстве»

Тел. 8 (499) 153-97-66

E-mail: burkova.msuee@mail.ru

**Карамбиров Сергей Николаевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные технологии в строительстве»

Тел. 8 (499) 153-97-66

E-mail: karamba.msuee@mail.ru

**Уманский Петр Михайлович**, старший преподаватель кафедры «Эксплуатация, электрификация и АТС и СП и ЗЧС»

Тел. 8 (499) 976-18-69

E-mail: UmPM@rambler.ru