

УДК 628.1:658.5

UDC 628.1:658.5

**УЧЕТ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА  
ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ В  
СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВОДОЗАБОРОВ  
ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

**ACCOUNTING OF PROCESSES OF WEIGHT  
CARRYING OF POLLUTING COMPONENTS  
IN SYSTEMS OF AUTOMATION OF  
DESIGNING OF WATER INTAKES OF  
UNDERGROUND WATERS**

Стародубцев Виктор Сергеевич  
д.т.н., к.г.-м.н., профессор  
*Российский государственный социальный  
университет филиал в г.Воронеж, Воронеж,  
Россия*

Starodubtsev Victor Sergeevich  
Dr.Sci.Tech, Cand.Geol-Min.Sci., professor  
*Russian state social university branch in Voronezh,  
Voronezh, Russia*

В статье рассматривается применение методов самоорганизации для идентификации процессов массопереноса загрязняющих компонентов подземных вод с целью оптимизации техногенной нагрузки на природную среду

In the article, application of methods of self-organizing for identification of processes of weight carrying polluting components of underground waters for the purpose of optimization of technogenic loading on environment is considered

Ключевые слова: ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА, ВОДОЗАБОР ПОДЗЕМНЫХ ВОД, МАССОПЕРЕНОС, СТРУКТУРНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ, СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Keywords: NATURAL-TECHNICAL SYSTEM, WATER INTAKE OF UNDERGROUND WATERS, WEIGHTCARRYING, STRUCTURAL IDENTIFICATION, SYSTEMS OF AUTOMATION OF DESIGNING

Развитие территориально-производственных комплексов (ТПК) структурно порождает развитие промышленного, транспортного, пищевого и других производств. В свою очередь, промышленное производство в условиях превалирования экономических законов над экологической безопасностью вызывает расширение и интенсификацию загрязнения геосфер Земли. Источниками загрязнения стали практически все промышленные предприятия, транспорт, зоны отдыха, крупные сельскохозяйственные и животноводческие комплексы. Наиболее подвержена антропогенному воздействию гидросфера Земли, где техногенное воздействие может сказываться как за счет прямого загрязнения промышленными, коммунальными, поверхностными стоками, загрязнения нефтью и нефтепродуктами, которое стало обычным явлением для мест их хранения и продажи (нефтебазы, автозаправочные станции и т.д.), так и за счет вторичного комплекса загрязнений гидросферы, формирующегося на основе загрязняющих веществ, которые содержатся в атмосферных осадках. В связи с этим необходим системный подход к <http://ej.kubagro.ru/2012/03/pdf/30.pdf>

развитию природно-техногенных процессов в природно-технических системах (ПТС) ТПК.

Рассмотри реализацию системного подхода на примере идентификации процессов массопереноса загрязняющих компонентов подземных вод в ПТС инфильтрационного водозабора подземных вод (ВПВ) №11 г.Воронежа.

ВПВ № 11 находится в 16 км севернее промышленного центра на правобережной пойменной террасе. Водозабор состоит из 48 эксплуатационных скважин (ЭС), расположенных вдоль берега водохранилища (рисунок 1). Эксплуатируемый неоген-четвертичный водоносный комплекс представлен мелкозернистыми песками, переходящими в основании в крупнозернистые и гравелистые разности с галькой. По химическому составу воды ВПВ №11 пресные с минерализацией 0,25-0,4 г/л, гидрокарбонатного кальциево-магниевого типа.

Общий дебит ВПВ №11 в настоящее время составляет 201 тыс.м<sup>3</sup>/сут.

Анализ ПТС ВПВ показал, что гидрогеохимическая обстановка осложняется повышенным содержанием железа и марганца в подземных водах эксплуатируемого неоген-четвертичного водоносного комплекса. В связи с дефицитом питьевой воды в г.Воронеже, в размере 150 тыс.м<sup>3</sup>/сут, ЭС стараются располагать ближе к урезу Воронежского водохранилища - контуру обеспеченного питания. Но, с другой стороны, располагая, таким образом, ЭС мы сокращаем путь фильтрации подземного потока, время его контакта с водовмещающими породами, что, в свою очередь, приводит к поступлению в сборные резервуары воды с повышенным содержанием железа и марганца.



Рисунок 1. ПТС ВПВ №11 с участками погребенных пойменных отложений

Такая ситуации вызвала необходимость детального изучения процессов массопереноса железа и марганца в системах водозаборов средствами математического моделирования процессов массопереноса загрязняющих компонентов подземных вод. Для этого были разработаны <http://ej.kubagro.ru/2012/03/pdf/30.pdf>

методика и алгоритм структурной идентификации процесса массопереноса загрязняющих компонентов подземных вод [1], на базе которых было создано программное обеспечение - комплекс программ MASPERENOS [1].

С учетом трудностей решения уравнения геомиграции [3] предлагается использовать методы структурной идентификации и в частности метод группового учета аргументов (МГУА) [2]. Учитывая один из основных принципов теории МГУА - принцип "свободы выбора решений", дифференциальное уравнение конвективно-диффузионного переноса мигранта в двумерном потоке [3], используем полное описание класса структур для идентификации процесса массопереноса загрязняющих компонентов подземных вод вида

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} = & a_1 \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right)^{t-k} + a_2 \left( \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right)^{t-k} + a_3 \left( \frac{\partial c}{\partial x} \right)^{t-k} + a_4 \left( \frac{\partial c}{\partial y} \right)^{t-k} + \\ & + a_5 \Psi_1^{t-k} + a_6 \Psi_2^{t-k} + a_7 \Psi_3^{t-k} + a_8 \Psi_4^{t-k} + a_9 \Psi_5^{t-k} + a_{10} \Psi_6^{t-k} + a_{11}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $c$  – концентрация ионов загрязняющего компонента (например, железа или марганца) в подземных водах (прогнозируемая переменная в мг/л);  $a_1 - a_4$  - соответствующие коэффициенты при производных;  $t$  - время;  $x, y$  - пространственные координаты;  $k$  – запаздывание по времени,  $k = 1, 2, 3$ ;  $\Psi_1$  - водоотбор в тыс.м<sup>3</sup>/сут;  $\Psi_2$  - температура воздуха в С<sup>0</sup>;  $\Psi_3$  – осадки в мм;  $\Psi_4$  - рН поверхностных вод;  $\Psi_5$  - содержание О<sub>2</sub> в поверхностных водах водохранилища мг/л;  $\Psi_6$  - содержание ионов хлора в поверхностных водах водохранилища мг/л;  $a_5 - a_{10}$  - соответствующие коэффициенты при  $\Psi_1 - \Psi_6$ ;  $a_{11}$  - свободный член.

Методику структурной идентификации процессов массопереноса загрязняющих компонентов подземных вод реализует алгоритм идентификации прогностических моделей процесса геомиграции, который можно представить в виде цепочки, состоящей из 7 блоков и 12 этапов [1].

Блок А

1. Ввод данных.
2. Построение сетки на области моделирования.

Блок В

3. Формирование модели, исходя из полного описания (1).
4. Нормирование и центрирование данных.

$$X_{j,i} = \frac{X_{j,i} - X_{c_i}}{D_{c_i}},$$

где  $X_{j,i}$  - текущее значение переменной;

$i = 1, \dots, N$ , где  $N$  - длина выборки;

$j = 1, \dots, K$ , где  $K$  - количество переменных;

$X_c$  - среднее значение исходной переменной;

$D_c$  - дисперсия исходной переменной.

5. Определение зависимых величин с помощью коэффициента парной корреляции ( $R_{i,j}$ ).

$$R_{i,j} = \begin{cases} \frac{\sum_{\gamma=M_1}^{M_2} X_{\gamma,i} X_{\gamma,j}}{M_2 - M_1 + 1}, & j \neq i; \\ 1 & j = i, \end{cases}$$

где  $M_1$  - начало выборки, а  $M_2$  - конец выборки,  $i, j = 1, 2, \dots, n$ , где  $n$  – количество переменных взятых для проведения эксперимента по идентификации целевых функций изучаемых процессов.

Блок С

6. Задание частного описания модели, исходя из полного описания (1).
7. Определение коэффициентов модели по методу наименьших квадратов.

Блок D

8. Определение значения критерия несмещенности ( $n_{cm}$ ) модели.

$$n_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^D (Y_A - Y_B)_i^2}{\sum_{i=1}^n Y_i^2},$$

где  $Y$  – фактическое значения выходной величины (количество школьников различных категорий качества знаний);  $Y_A$  и  $Y_B$  – модельное значение выходной величины. Модели получены  $Y_A$  – по выборке А, а  $Y_B$  – по выборке В. По критерию несмещенности находятся  $N_1$  лучших моделей, которые затем участвуют в сравнении моделей по критерию сходимости. На основе проведения экспериментов по идентификации прогностических моделей массопереноса загрязняющих компонентов подземных вод в системах ВПВ г.Воронежа было установлено, что число  $N_1 \leq 30$ .

#### Блок Е

9. Определение значения критерия сходимости (i) для  $N_1$  лучших по критерию несмещенности моделей.

$$I = \frac{\sum_{i=1}^D (Y_{im} - Y_{it})_i^2}{\sum_{i=1}^n Y_{it}^2},$$

где  $Y_{im}$  - модельное значение выходной величины;  $Y_{it}$  - табличное значение выходной величины (данные режимных наблюдений за значениями концентрации железа в подземных водах). По критерию сходимости отбираются  $N_2$  модели, которые затем участвуют в сравнении моделей по критерию эпигнозного прогноза.

#### Блок F

10. Определение значения критерия эпигнозного прогноза (P) для  $N_2$  лучших по критерию сходимости моделей.

$$P = \frac{\sum_{i=D+1}^C (Y_{im} - Y_{it})_i^2}{\sum_{i=D+1}^C Y_{it}^2}.$$

Критерий эпигнозного прогноза позволяет отбирать лучшие модели прогностической направленности.

#### Блок G

11. Определение комбинированного критерия  $K_s$ .

<http://ej.kubagro.ru/2012/03/pdf/30.pdf>

$$K_s = \left( \frac{n}{n_{max}} \right) + \left( \frac{i}{i_{max}} \right),$$

где  $n_{max}$  и  $i_{max}$  - максимальное значение критериев минимума смещения и сходимости.

12. Выбор оптимальной модели по совокупности критериев.

В связи с большой протяженностью ВПВ №11 (около 4-х км) была проведена квантификация ПТС ВПВ №11 на подсистемы с целью выявления особенностей процесса массопереноса ионов железа и марганца. При квантификации ПТС ВПВ №11 учитывалось то, что в середине 80-х годов производилось расширение ВПВ №11 за счет намыва берега. Всего было выделено 3 подсистемы: 1 подсистема – ЭС № 14, 17 и 18; 2 подсистема – ЭС № 28, 29 и 45; 3 подсистема – ЭС № 9, 10, 11 и 12.

В результате проведения эксперимента по структурной идентификации процесса массопереноса ионов марганца в подземных водах ПТС ВПВ №11 были получены следующие прогностические модели (таблица 1).

Таблица 1 - МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА ИОНОВ МАРГАНЦА В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ ПТС ВПВ №11

Система	Модель
Общая	$c_{i,j}^{t+1} = c_{i,j}^{t-1} + 0,071( c_{i+1,j}^t - c_{i-1,j}^t ) - 0,000049\Psi_1^{t-1} + 0,008\Psi_3^t - 0,129\Psi_4^{t-1} - 0,011\Psi_6^t + 6,857$
Подсистема №1	$c_{i,j}^{t+1} = c_{i,j}^{t-1} + 0,392( c_{i,j-1}^{t-1} - 2c_{i,j}^{t-1} + c_{i,j+1}^{t-1} ) - 1,527( c_{i+1,j}^t - c_{i-1,j}^t ) + 0,000003\Psi_1^{t-1} - 0,242$
Подсистема №2	$c_{i,j}^{t+1} = c_{i,j}^{t-1} + 0,051( c_{i+1,j}^t - 2c_{i,j}^t + c_{i-1,j}^t ) + 0,131( c_{i,j-1}^{t-2} - 2c_{i,j}^{t-2} + c_{i,j+1}^{t-2} ) - 0,291( c_{i,j+1}^{t-2} - c_{i,j-1}^{t-2} ) - 0,000003\Psi_1^{t-1} + 0,002\Psi_3^t - 0,002\Psi_6^t + 0,31$
Подсистема №3	$c_{i,j}^{t+1} = c_{i,j}^{t-1} - 0,8( c_{i+1,j}^t - 2c_{i,j}^t + c_{i-1,j}^t ) + 1,35( c_{i+1,j}^{t-1} - 2c_{i,j}^{t-1} + c_{i-1,j}^{t-1} ) - 1,53( c_{i+1,j}^{t-2} - 2c_{i,j}^{t-2} + c_{i-1,j}^{t-2} ) - 2,18( c_{i+1,j}^{t-2} - c_{i-1,j}^{t-2} ) - 0,87( c_{i,j+1}^t - c_{i,j-1}^t ) + 0,958( c_{i,j+1}^{t-1} - c_{i,j-1}^{t-1} ) - 0,000034\Psi_1^{t-1} - 0,04\Psi_6^t + 5,54$

Анализ выражения модели общей системы показывает, что массоперенос ионов марганца в ПТС ВПВ №11 связан с миграцией

марганца по площади депрессионной воронки, на что указывает первая производная по  $X$ , присутствующая в модели с нулевым запаздыванием, что соответствует предварительным выводам о местном источнике загрязнения. Результаты моделирования показывают, что процесс массопереноса ионов марганца для различных подсистем ВПВ №11 имеет много похожего. Для всех подсистем характерно наличие производных, как по оси  $X$ , так и по оси  $Y$ , что свидетельствует о миграции ионов марганца непосредственно во внутренних областях депрессионной воронки ВПВ и подтверждает версию о наличии источника загрязнения непосредственно в этой области (погребенные пойменные отложения в результате намыва береговой зоны). В то же время возможен и массоперенос ионов марганца из водохранилища (наличие в моделях параметров  $\Psi_4$  и  $\Psi_6$  поверхностных вод водохранилища). Следует отметить у всех моделей незначительное (-1) запаздывание по времени у параметра водоотбора ( $\Psi_1^{t-1}$ ), что может также свидетельствовать, что загрязнение находится непосредственно в районе депрессионной воронки.

Для получения прогностической модели массопереноса ионов железа принятые модели были оценены по критерию эпигнозного прогноза и сценарному критерию. С учетом полного описания (1) модели процесса массопереноса ионов железа в ПТС ВПВ №11 представлены в таблице 2.

Анализ выражения для общей системы показывает, что массоперенос ионов железа в ПТС ВПВ №11 связан с миграцией железа по площади депрессионной воронки, на что указывает вторая производная по  $X$ , присутствующая в модели с запаздыванием (-2), что соответствует значительным размерам ПТС ВПВ №11.

Таблица 2 - МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА ИОНОВ ЖЕЛЕЗА В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ ПТС ВПВ №11

$$c_{i,j}^{t+1} = c_{i,j}^{t-1} + 0,0077 ( c_{i,j+1}^{t-2} - c_{i,j-1}^{t-2} ) + 0,000031 \Psi_1^t + 0,407 \Psi_4^{t-1} - 6,914.$$

Система	Модель
Общая	$c_{i,j}^{t+1} = c_{i,j}^{t-1} + 0,151( c_{i+1,j}^{t-2} - 2c_{i,j}^{t-2} + c_{i-1,j}^{t-2} ) - 0,000021\Psi_1^{t-1} + 0,071\Psi_2^{t-2} + 0,1\Psi_5^t + 1,82$
Подсистема №1	$c_{i,j}^{t+1} = c_{i,j}^{t-1} - 0,834( c_{i+1,j}^t - c_{i-1,j}^t ) + 4,633( c_{i+1,j}^{t-1} - c_{i-1,j}^{t-1} ) + 0,000008\Psi_1^{t-1} + 0,1\Psi_6^t - 12,18$
Подсистема №2	$c_{i,j}^{t+1} = c_{i,j}^{t-1} + 0,0077( c_{i,j+1}^{t-2} - c_{i,j-1}^{t-2} ) + 0,000031\Psi_1^t + 0,407\Psi_4^{t-1} - 6,914$
Подсистема №3	$c_{i,j}^{t+1} = c_{i,j}^{t-1} - 1,06( c_{i+1,j}^t - 2c_{i,j}^t + c_{i-1,j}^t ) + 0,84( c_{i,j-1}^{t-2} - 2c_{i,j}^{t-2} + c_{i,j+1}^{t-2} ) + 0,64( c_{i+1,j}^{t-1} - c_{i-1,j}^{t-1} ) + 0,37( c_{i,j+1}^{t-1} - c_{i,j-1}^{t-1} ) - 0,00057\Psi_1^t - 1,16\Psi_2^{t-1} - 6,41\Psi_4^{t-1} + 126,5$

Наличие в модели температурного параметра  $\Psi_2^{t-2}$  подтверждает сделанные предварительные выводы о влиянии температуры воздуха на содержание ионов железа в подземных водах ВПВ №11. Влияние Воронежского водохранилища отражено в модели параметром содержания  $O_2$  в поверхностных водах водохранилища.

Результаты моделирования подсистем показывают, что процесс массопереноса ионов железа для различных подсистем ВПВ №11 различается. Для первой подсистемы миграция ионов железа происходит непосредственно во внутренних областях депрессионной воронки ВПВ (наличие соответственно первой производной по  $X$ ), что может свидетельствовать о наличии источника загрязнения непосредственно в этой области. В то же время следует отметить, что у модели второй подсистемы присутствует первая производная по оси  $Y$ , что может свидетельствовать о миграции ионов железа из водохранилища, так как подсистема географически располагается ближе других подсистем к урезу водохранилища. Модель третьей подсистемы содержит производные как по оси  $X$ , так и по оси  $Y$ . Эту особенность можно объяснить тем, что третья

подсистема находится как раз как по центру депрессионной воронки ПТС ВПВ №11, так и в центре захороненных болотных отложений, в результате чего загрязнение поступает со всех сторон.

Следует отметить отсутствие у моделей второй и третьей подсистем запаздывания по времени у параметра водоотбора ( $\Psi_1^t$ ), либо его незначительное запаздывание (-1) у модели первой подсистемы, что может также свидетельствовать, что загрязнение находится непосредственно в районе депрессионной воронки.

С учетом выявленных особенностей массопереноса ионов марганца и железа в ПТС ВПВ №11 рекомендуется при расширении системы ВПВ создать открытые инфильтрационные сооружения (два бассейна шириной по дну 20 м, длиной 300 метров и глубиной бассейна 3 м) для пополнения запасов грунтовых вод на расстоянии 150-200 метров от уреза водохранилища с размещением 12 эксплуатационных скважин, что обеспечит как качество питьевой воды (удаленность от водохранилища и погребенных пойменных отложений), так и значительное (до 36 тыс.м<sup>3</sup>/сут) увеличение ее добычи.

#### Литература

1. Жуков С.А. Моделирование процессов массопереноса загрязняющих компонентов подземных вод //Экология и промышленность России. № 7. 2008. № 7. С. 24 – 27.
2. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем.-Киев: Наук. думка, 1982. 296 с.
3. Шестаков В.М. Динамика подземных вод.-М.: Изд-во МГУ, 1979.-368 с.