

является достаточно характерным, а часто неизбежным следствием сброса и накопления карьерных вод. Это представляет серьезную проблему и является реальной угрозой экологическому равновесию рассматриваемого региона.

**Анализ исследований и постановка задачи.** Учитывая важность оперативного анализа и прогнозирования экологической ситуации на территории с повышенной техногенной нагрузкой, разрабатываются геоинформационные системы (ГИС). В Днепропетровском национальном университете разработаны локальные ГИС гидрохимического мониторинга «Ландшафт» и картографического мониторинга подземных вод «ThreeD» [1]. Практическая реализация данных систем проводилась на данных мониторинга подземных вод в районе хвостохранилищ вблизи г. Днепродзержинска, г. Кривого Рога, г.Орджоникидзе. Не менее сложная экологическая ситуация наблюдается и на территории Северного горно-обогатительного комбината, что и обусловило постановку задачи.

На территории Северного горно-обогатительного комбината проводится гидрогеохимический мониторинг, в ходе которого были собраны результаты анализов проб воды водоносного горизонта четвертичных отложений участка комбината. Мониторинг проводился с 1978 года по 2006 год. Наблюдения проводились по шестидесяти двум скважинам. Однако, для обработки информации необходимы полные ряды данных, поэтому для обработки были выбраны 36 dbf-файлов.

Каждый файл соответствует номеру определенной скважины и содержит:

- 1) номер пробы;
- 2) дата отбора пробы;
- 3) значения концентраций химических элементов:
  - хлор-ион ( $\text{Cl}^-$ ),
  - сульфат-ион ( $\text{SO}_4^{2-}$ ),
  - гидрокарбонат-ион ( $\text{HCO}_3^-$ ),
  - натрий-ион ( $\text{Na}^+$ ),
  - кальций-ион ( $\text{Ca}^{2+}$ ),
  - магний-ион ( $\text{Mg}^{2+}$ ).

Данные о концентрации химических элементов представим в виде массива

$$\{x_{ij}^{(k)}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}\}$$

где  $n$  - количество химических элементов;  $m$  - количество скважин;  $x_{ij}^{(k)}$ , - концентрация  $i$ -го элемента в  $j$ -й момент времени для  $k$ -й скважины.

Гидрохимический процесс, который подлежит исследованию, является нестационарным, т.е. изменяется во времени. Необходимо предложить вычислительную технологию и программное обеспечение оценки техногенной нагрузки в системе гидрохимического мониторинга.

**Изложение основного материала.** Следуя работе Ф.А. Приставки [2] рассматриваются фрагменты вычислительной процедуры:

Данные наблюдений для обработки, представлены в виде массивов: замеры, проведенные на регулярной сетке и нерегулярные данные наблюдений.

Регулярные данные представлены в виде:  $\{(t_j, q_j), p_{ij} : i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}\}$ , где  $t$  - относительная координата в направлении север-юг;  $q$  - относительная координата в направлении восток-запад;  $p$  - высота над

уровнем моря;  $n, m$  - количество данных в соответствующих направлениях. Нерегулярными данными являются данные концентраций химических элементов. Для того, чтобы построить поверхность, необходимо привести нерегулярные данные к регулярным [2].

Пусть существует некоторая функция  $z = f(x, y)$ ,  $f(x, y) \in C^{2,2}$  и задан массив  $P = \{p_t : t = \overline{1, N}\}$ ,

где  $p_t$  - точка трехмерного евклидова пространства с координатами  $p_t : \{\chi_t; \nu_t; \zeta_t\}$ . Считаем, что для любых

координат  $\chi_t, \nu_t, t = \overline{1, N}$  выполняется  $\chi_t \in [x_{\min}; x_{\max}]$ ,  $\nu_t \in [y_{\min}; y_{\max}]$ , где точки  $\{x_{\min}; y_{\min}\}$  и  $\{x_{\max}; y_{\max}\}$  определяют некоторую прямоугольную область  $\Delta$ .

По массиву  $P = \{p_t : t = \overline{1, N}\}$  осуществляется равномерное разбиение области  $\Delta$  на прямоугольные области  $\Delta_{ij}$ ,  $ij = \overline{0, M}$ ,  $M \in N$ , в каждом  $(i, j)$  - ом элементе которого получают приближение функции  $z = f(x, y)$  [2].

Окончательно  $z_{ij}^{(k)}$  приобретает значение:

$$z_{ij}^{(k)} = \begin{cases} \frac{1}{9} \sum_{a=i-1}^{i+1} \sum_{b=j-1}^{j+1} z_{ab}^{(k)}, & (i \in [1; 2^k - 2]) \cup (j \in [1; 2^k - 2]); \\ \frac{1}{4} \sum_{a=i}^{i+1} \sum_{b=j}^{j+1} z_{ab}^{(k)}, & (i=0) \cup (j=0); \\ \frac{1}{4} \sum_{a=i}^{i+1} \sum_{b=j-1}^j z_{ab}^{(k)}, & (i=0) \cup (j=2^k - 1); \\ \frac{1}{4} \sum_{a=i-1}^i \sum_{b=j}^{j+1} z_{ab}^{(k)}, & (i=2^k - 1) \cup (j=0); \\ \frac{1}{4} \sum_{a=i-1}^i \sum_{b=j-1}^j z_{ab}^{(k)}, & (i=2^k - 1) \cup (j=2^k - 1); \\ \frac{1}{6} \sum_{a=i}^{i+1} \sum_{b=j-1}^{j+1} z_{ab}^{(k)}, & (i=0) \cup (j \in [1; 2^k - 2]); \\ \frac{1}{6} \sum_{a=i-1}^i \sum_{b=j-1}^{j+1} z_{ab}^{(k)}, & (i=2^k - 1) \cup (j \in [1; 2^k - 2]); \\ \frac{1}{6} \sum_{a=i-1}^{i+1} \sum_{b=j}^{j+1} z_{ab}^{(k)}, & (i \in [1; 2^k - 2]) \cup (j=0); \\ \frac{1}{6} \sum_{a=i}^{i+1} \sum_{b=j-1}^j z_{ab}^{(k)}, & (i \in [1; 2^k - 2]) \cup (j=2^k - 1). \end{cases}$$

Таким образом, на каждой итерации получаем двумерный массив точек с координатами

$$\{x_{ij}^{(k)}, y_{ij}^{(k)}, z_{ij}^{(k)}\}, \quad i, j = \overline{0, 2^k - 1}.$$

$$x_{ij}^{(k)} = x_{\min} + \left(i + \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2^k},$$

$$y_{ij}^{(k)} = y_{\min} + \left(j + \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{y_{\max} - y_{\min}}{2^k}.$$

Величина  $z_{ij}^{(k)}$  с учетом априорного массива  $P = \left\{ p_t : t = \overline{1, N} \right\}$  является усредненным значением функции  $z = f(x, y)$  в  $\Delta_{ij}^{(k)}$ .

Процесс проведения итерационной разбивки прямоугольной области  $\Delta$  завершаем по достижению величины  $k$ , некоторого заранее определенного значения.

Последующий анализ и построение модели осуществляется на основании полиномиальных сплайнов на основе В-сплайнов [2].

Выбор полиномиальных сплайнов обусловлен итерационной процедурой регуляризации данных наблюдений, на выходе которой получаем массив данных. Данные являются усредненными значениями некоторой функции наблюдений на регулярной сетке.

Пусть имеем наблюдения с характеристиками  $T$  и  $Q$  объекта. Оси наблюдения данных характеристик разбиваем точками  $t_i = ih_t (i \in Z)$ , с шагом разбиения  $h_t$ , и точками  $q_j = jh_q (j \in Z)$ , с шагом  $h_q$ . Полиномиальный сплайн от двух переменных на основе В-сплайнов [2] может быть представлен в виде полинома:

$$S_{r,u}(p, t, q) = \sum_{i \in Z} \sum_{j \in Z} p_{i,j} \sum_{c_i=0}^r \sum_{c_q=0}^r \gamma_{i,c_i}^{(r,u)} \gamma_{j,c_q}^{(r,u)} x^{c_i} y^{c_q}$$

где  $r = 2, 3, 4$ ;  $u = 0, 1, 2$ ;

Например, для  $r = 2$  и  $u = 0$ :

$$\gamma^{(2,0)} = \frac{1}{8} \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 6 & 0 & -2 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix};$$

$$x = \frac{2}{h_t}(t - ih_t), |x| \leq 1,$$

$$y = \frac{2}{h_q}(t - jh_q), |y| \leq 1.$$

Формула для вычисления сплайна  $S_{2,0}(p, t, q)$  в развернутом виде [2]:

$$\begin{aligned} S_{2,0}(p, t, q) = & \frac{1}{64} (1-x)^2 (1-y)^2 p_{i-1, j-1} + \\ & + (1-x)^2 (6-2y^2) p_{i-1, j} + (1-x)^2 (1+y)^2 p_{i-1, j+1} + \\ & + (6-2x^2) (1-y)^2 p_{i, j-1} + (6-2x^2) (6-2y^2) p_{i, j} + \\ & + (6-2x^2) (1+y)^2 p_{i, j+1} + (1+x)^2 (1-y)^2 p_{i+1, j-1} + \\ & + (1+x)^2 (6-2y^2) p_{i+1, j} + (1+x)^2 (1+y)^2 p_{i+1, j+1} \end{aligned}$$

Решение поставленной задачи проводилось в системе "Ландшафт". Ядром системы являются локальные полиномиальные сплайны на основе В-сплайнов [2].

Данная система позволяет строить гидрогеохимические карты содержания химических элементов в грунтовых водах.

Модуль ввода выходных данных содержит реализацию алгоритмов нанесения рельефа местности и данных гидрогеохимического мониторинга.

В модуле обработки происходит обработка массивов регулярных данных при помощи математических методов, основанных на полиномиальных сплайнах.

В блоке визуализации происходит построение трехмерных моделей, нанесение изолиний и условных обозначений (хвостохранилище, Анновский карьер, РОФ-2, промышленная площадка, р.Саксагань, населенные пункты; наблюдательные скважины).

Интерфейс пользователя позволяет изменять параметры выведения моделей, позволяет получать результаты обработки информации в виде гидрогеохимических карт.

Полученные карты составляют основу территориального атласа СевГОКа.

Анализируя гидрогеохимические карты содержания сульфат-ионов (рис.1) можно выявить закономерность - постоянное превышение содержания концентраций на территории Северного горно-обогатительного комбината.

Расположение максимумов наблюдается в северо-западной части карты района и охватывает северо-западную часть Анновского карьера, хвостохранилища и рудообогатительную фабрику.

Максимальные значения концентраций выявлены в период с четвертого квартала 1986 года по второй квартал 1987 года и составляют:

- 4 квартал 1986 года – 6064 мг/дм<sup>3</sup>,
- 1 квартал 1987 года – 7476 мг/дм<sup>3</sup>,
- 2 квартал 1987 года – 6478 мг/дм<sup>3</sup>,

В этот период происходит значительное увеличение концентрации сульфат-ионов.

Изменение содержания концентрации сульфат-ионов возможно связано с поступлением в хвостохранилище пирита и других сульфатов, которые содержатся в хвостах обогащения. Поэтому воды из хвостохранилища оказывают достаточно сильное влияние на величину минерализации и содержания сульфат-ионов.

Первичными источниками хлор-иона (рис. 1) в подземных водах являются магматические породы, в состав которых входят хлорсодержащие минералы (содалит, хлорпатит и др.), соленосные отложения.

Значительные количества хлоридов поступают в воду в результате взаимодействия атмосферных осадков с почвами.

Возрастающее значение приобретают промышленные и хозяйственно-бытовые сточные воды.

На основании анализа гидрогеохимических карт можно выделить характерные участки с содержанием хлора:

1. Наибольшему загрязнению подземные воды промышленного района Северного горно-обогатительного комбината подвергались в периоды: третий квартал 1978 года, четвертый квартал 1971 года, второй квартал 1986 года, второй квартал 1990 года, третий квартал 1990 года, третий квартал 1991 года.

Концентрации хлор-ионов за данные периоды наблюдаются в районе Анновского карьера и промышленной площадки, а также в южной части карты.

2. Значения концентраций ионов хлора отображаются на гидрогеохимических картах и составляют: во втором квартале 1981 года – 775 мг/дм<sup>3</sup>, четвертом квартале 1982 – 777 мг/дм<sup>3</sup>, втором квартале 1983 – 785 мг/дм<sup>3</sup>, втором квартале 1984 – 911 мг/дм<sup>3</sup>, третьем квартале 1984 – 870 мг/дм<sup>3</sup>, первом квартале 1985 –

931 мг/дм<sup>3</sup>, втором квартале 1985 – 773 мг/дм<sup>3</sup>, первом квартале 1988 – 735 мг/дм<sup>3</sup>, первом квартале 1990 – 776 мг/дм<sup>3</sup>.

3. В остальных кварталах подземные воды района Северного горно-обогатительного комбината были подвержены загрязнению с меньшей интенсивностью.

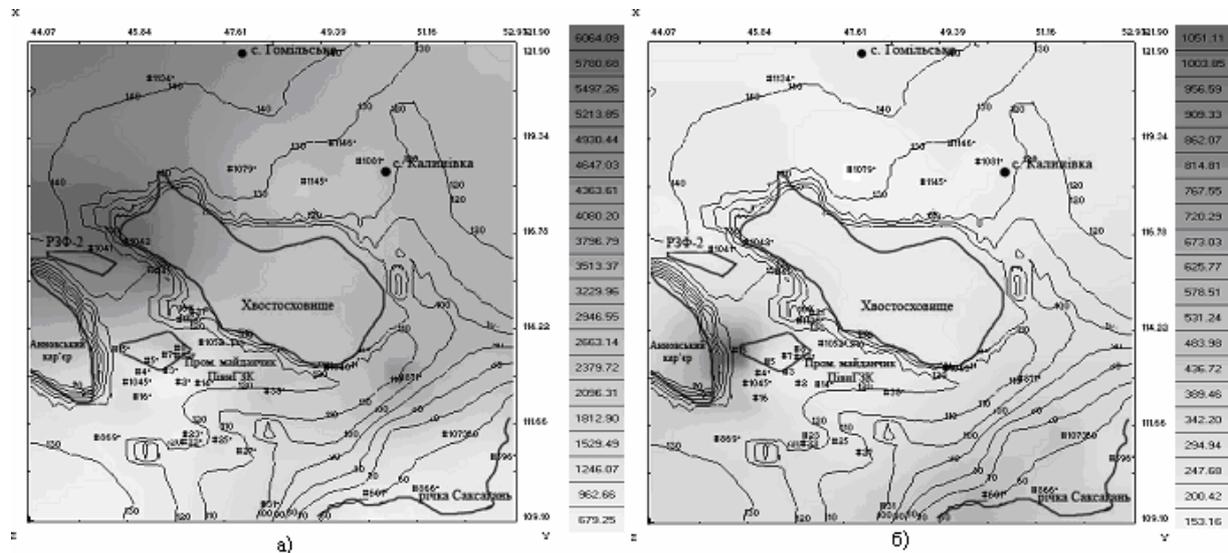


Рис. 1. Гидрогеохимическая карта: а) содержания сульфат-ионов (мг/дм<sup>3</sup>) в грунтовых водах водоносного горизонта четвертичных отложений на территории СевГОКа (4 квартал 1986 года); б) содержания ионов хлора (мг/дм<sup>3</sup>) в грунтовых водах водоносного горизонта четвертичных отложений на территории СевГОКа (3 квартал 1978 года)

Концентрация хлор-иона в подземных водах подвержена заметным сезонным колебаниям. Поступление хлор-иона в грунтовые воды связано с высоким его содержанием в шахтных водах, которые поступают в хвостохранилище [4].

Для оценки техногенной нагрузки выбран химический элемент натрий-ион. Основным источником поступления натрия в подземные воды являются оса-

дочные породы и самородные растворимые хлористые, сернокислые и углекислые соли натрия.

Анализ компонентного состава подземных вод показал, что в период с четвертого квартала 1986 года по второй квартал 1987 года и второй, третий кварталы 1988 года на территории Северного горно-обогатительного комбината существовали периоды максимальной концентрации ионов-натрия.

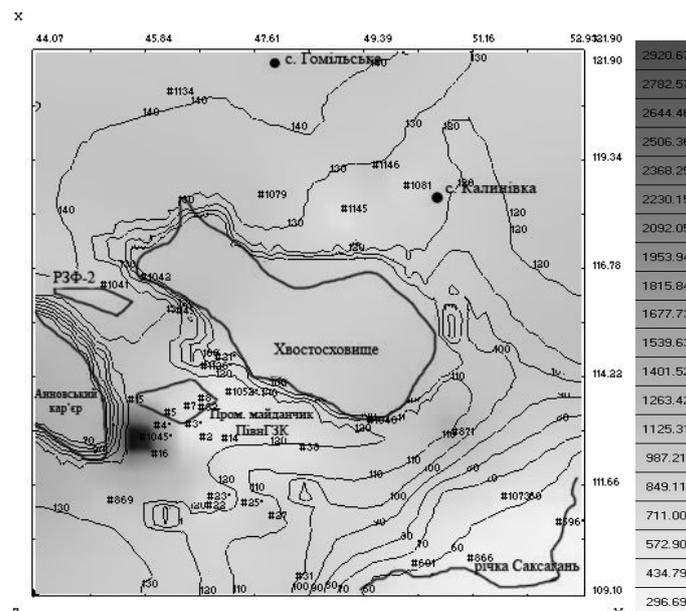


Рис. 2. Гидрогеохимическая карта содержания ионов натрия (мг/дм<sup>3</sup>) в грунтовых водах водоносного горизонта четвертичных отложений на территории СевГОКа (3 квартал 1988 года)

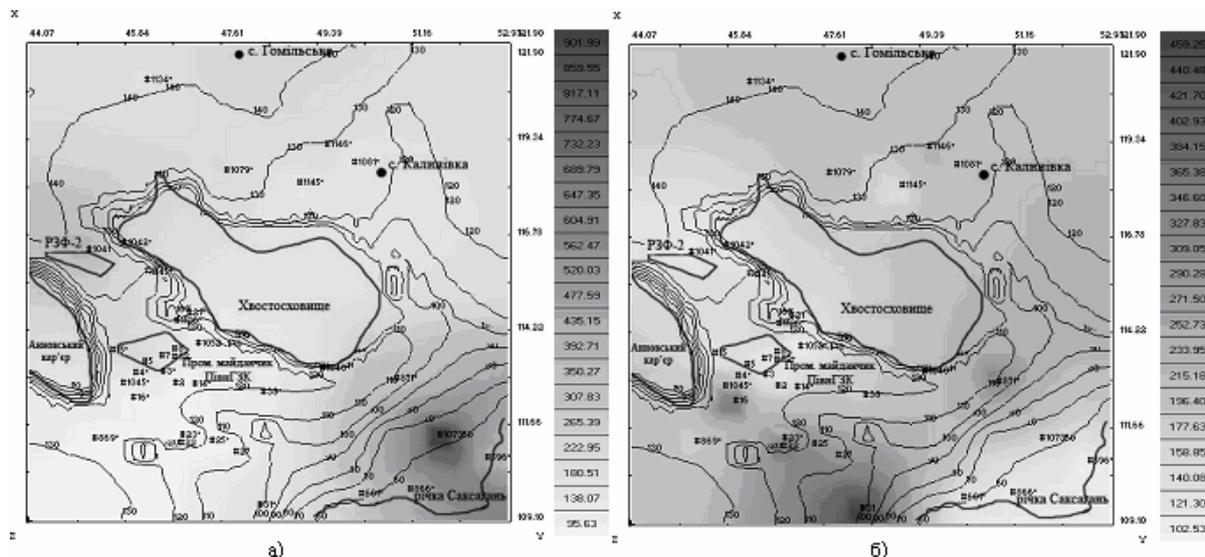


Рис. 3. Гидрогеохимическая карта: а) содержание ионов кальция ( $\text{мг/дм}^3$ ) в грунтовых водах водоносного горизонта четвертичных отложений на территории СевГОКа (2 квартал 1987 года); б) содержание ионов магния ( $\text{мг/дм}^3$ ) в грунтовых водах водоносного горизонта четвертичных отложений на территории СевГОКа (4 квартал 1978 года)

Анализируя изменения концентраций ионов натрия во времени можно заметить, что до 1986 года средние значения концентраций ионов натрия находятся в пределах от  $600 \text{ мг/дм}^3$  до  $900 \text{ мг/дм}^3$ . В подземных водах концентрация натрия колеблется в широких пределах (рис. 2).

Сумма ионов кальция и магния (рис. 3) определяют такой гидрологический показатель как жесткость воды.

Воды СевГОКа обладают повышенной щелочностью обусловленной высоким содержанием гидрокарбонатов.

На территории Северного горно-обогатительного комбината максимальные концентрации ионов магния приближены к хвостохранилищу, а также находятся на юго-востоке территории.

**Выводы**

1. Вычислительная технология аппроксимации экспериментальных данных двумерными полиномиальными сплайнами на основе В-сплайнов, предложенная одним из авторов, реализована в ГИС для оценки техногенной нагрузки в системе гидрохимического мониторинга.
2. Построены гидрогеохимические карты содержания концентраций химических элементов на территории Северного горно-обогатительного комбината.

3. Основными техногенными объектами, которые влияют на содержание концентраций химических элементов в подземных водах на территории Северного горно-обогатительного комбината являются хвостохранилище, рудо-обогатительная фабрика, Анновский карьер.
4. Основными компонентами техногенного загрязнения подземных вод на территории СевГОКа являются хлор-ион и сульфат-ион.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Приставка П.О., Самарець Ю.В. Картографічний моніторинг ґрунтових вод в автоматизованій системі „ThreeD”.- Д.: Наук. вісн. НГУ. – 2003. – №9. – С. 75-80
2. Приставка П.О. Поліноміальні сплайни при обробці даних: Монографія. Д.: Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2004. – 236 с.
3. Приставка О.П., Приставка П.О., Смирнов С.О. Статистичний аналіз в АСОД: Відтворення розподілів. Критерії однорідності: Навч. посіб. Д.: РВВ ДНУ, 2000. – 112 с.
4. Шерстюк Н.П., Власова И.А. Методические подходы к изучению химического состава природно-техногенных вод на территории горно-обогатительного предприятия (СЕВГОК, КРИВ-БАСС). Науковий вісник ДНУ №8, 2004.-142-150 с.