

## ГИС В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

*Проведен анализ и классификация геоинформационного обеспечения для задач мониторинга уровня грунтовых вод. Выделены соответствующие функциональные ГИС-процедуры, предложены алгоритмы их решения. На реальных показателях мониторинга Днепропетровской области рассмотрены примеры использования ГИС для генерирования новых знаний.*

### **1. Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами.**

Грунтовые воды – подземные воды первого от поверхности земли постоянного водоносного горизонта, не имеющего сверху сплошной кровли водонепроницаемых пород, не обладают напором и подвержены сезонным колебаниям уровня и дебита [1]. Область питания грунтовых вод совпадает с областью их распространения.

ГИС – геоинформационная система, обеспечивающая сбор, хранение, обработку, доступ, отображение и распространение пространственных данных.

Мониторинг – специально организованное систематическое наблюдение объекта и краткосрочное прогнозирование хода связанных с ним процессов с целью их анализа, идентификации и выявления круга регулируемых факторов для подготовки и принятия решений.

Контроль за состоянием и изменением гидрогеологической обстановки осуществляется на основе стационарных наблюдений за режимом подземных вод. Особое внимание уделяется грунтовым водам, так как они более всего подвержены антропогенному воздействию. Поступающие от наблюдений данные обрабатываются с получением среднемесячных, среднегодовых и среднемноголетних значений глубины залегания уровня, сроков наступления и характеристик его экстремальных значений, сезонных и многолетних амплитуд колебаний и т.д.

Необходимость оперативной аналитической обработки пространственной информации мониторинга уровня грунтовых вод (УГВ) требует привлечения методов геоинформационного и геостатистического анализа данных, использования современных программных продуктов, компьютерных систем и технологий.

**Цель работы** – анализ и классификация геоинформационного обеспечения для задач УГВ-мониторинга; выделение соответствующих функциональных процедур в ГИС и проверка их адекватности задачам на реальных мониторинговых данных Днепропетровской области.

### **2. Классификация ГИС для задач УГВ-мониторинга.**

ГИС позволяет решать значительное число задач мониторинга: сбор, хранение, анализ и обработка больших объемов разнородных данных; оперативный доступ и визуализация информации; быстрая и качественная подготовка отчетных материалов. Благодаря модульной организации ГИС допускает независимую модернизацию блоков и расширение функциональности [2, 3].

Спектр предлагаемого сегодня программного обеспечения ГИС очень широк. Наиболее известны в нашей стране программные продукты: ArcView, ArcInfo, ArcGIS (Environment System Research Institute), MapInfo (MapInfo Corp.), MGE (Intergraph), GeoDraw/GeoGraph/GeoConstructor (ЦГИ ИГ РАН, Москва), Atlas GIS (Strategic

Mapping Inc.), WinGIS/WinMAP (Progis), Geocad System 3 (Geocad Ltd, Новосибирск), Sinteks/Tri (Трисофт), КАРТА 2000 (GeoSpectrum International, Москва) и др.

Универсальные ГИС (ArcView, ArcGIS, ArcINFO, КАРТА 2000 и др.) позволяют выполнять как картографический анализ, так и вычисление определенных характеристик УГВ, вплоть до построения моделей. Для узконаправленных задач гидрологического моделирования существуют специальные программные модули, расширяющие возможности базовых пакетов. Например, модуль ArcHydro позволяет моделировать гидрологию в среде ArcGIS, а программный продукт AquaView фирмы Micromine предоставляет гидрогеологам процедуры для решения вопросов создания баз данных, интерпретации разрезов, трехмерной визуализации и моделирования водоносных горизонтов.

Программные продукты, предназначенные только для гидрогеологических либо геологических исследований: Modflow [<http://www.mindspring.com/%7Eerbwinston/>], PHREEQC, VS2DTI [<http://www.flowpath.com/>], Feflow, Modtech, Hydrus, GeoPack, RETC, Visual Groundwater, Aquifer Test, MINEDW, MIFT и другие. Все они реализуют хорошо известные численные методы моделирования при изучении движения подземных вод.

Обработку данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) при исследовании гидрологических процессов целесообразно производить в пакетах ERDAS, MultiSpec и др. В них можно определять не только динамику изменения осадков и режима уровня, но и оценивать степень санитарно-экологической обстановки.

Классификация крупных ГИС для УГВ-мониторинга по типу используемых данных и решаемым задачам представлена в табл. 1.

**Табл. 1.** Классификация ГИС для задач УГВ-мониторинга

Тип ГИС	НАЗВАНИЕ ГИС	Тип используемых данных	Решаемые задачи
Универсальная	MAPINFO	Геологические и гидрологические данные	Построение цифровых карт и разрезов Создание базы геоданных Расчет математических параметров и их визуализация на цифровых картах Другие ГИС-задачи
	ARCVIEW		
	ARCGIS		
	КАРТА 2000		
	ERDAS	Данные дистанционного зондирования Земли	Спектральный анализ Кластеризация Классификация Оценка динамики изменения поверхностных вод
	MULTISPEC		
Специализированная	MODFLOW	Геологические и гидрологические данные	Построение цифровых геологических карт и автоматическое создание по ним разрезов Фильтрационные и миграционные расчеты Автоматическая визуализация результатов
	FEFLOW		
	MIFT		
	MINEDW		

### 3. Методы и средства ГИС применительно к задачам УГВ-мониторинга

1) ГИС является инструментом для решения следующих задач УГВ-мониторинга:

- 2) ведение базы геоданных (БГД) [4];
- 3) визуализация данных;
- 4) анализ данных (в том числе сети мониторинга);
- 5) построение моделей;

- б) прогноз развития ситуации;
- 7) формирование управляющих решений на основе моделирования, анализа и прогноза.

Рассмотрим более подробно первые четыре задачи.

**Ведение БГД** включает: проектирование, создание, наполнение, сопровождение (просмотр, редактирование и удаление данных), решение задач путем организации запроса к БГД, одновременный доступ нескольких пользователей в компьютерной сети. БГД обеспечивает не только все функции БД, но и дополняет их географическим программным обеспечением.

В основе БГД лежит сеть УГВ-мониторинга, которая состоит из буровых скважин, колодцев, источников. В БГД заносятся первичные материалы многолетних наблюдений (значения УГВ, дебита, температуры и показателей качества подземных вод), материалы об условиях формирования и использования подземных вод, дополнительные факторы (атмосферные осадки, температура воздуха, уровни и дебит речек и прочее), обобщенные информационные и картографические материалы. Пример таблицы атрибутов слоя «колодцы» приведен на рис. 1.

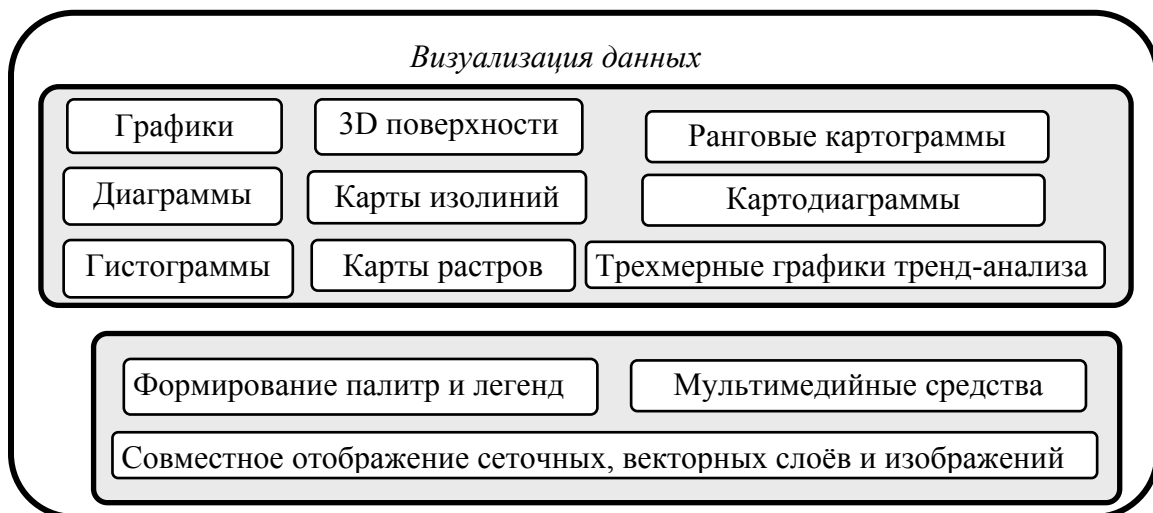
FID	Shape*	Kol_kart	X	Y	Kol	Код_Район	Район	Имя	Власна_наз	АбсОтм	Абс_отм_ур	Glublr
0	Point	228	33,6743	48,7898	1861	122450000	Пятихатський	село	Троцьке	100	89,2	10,8
1	Point	229	34,8782	48,7889	85	122230000	Магдалинівський	село	Нововасилівка	100	96,75	3,25
2	Point	230	35,129	48,7861	119	122320000	Новомосковський	село	Миколаївка	100	90,88	9,12
3	Point	231	34,0377	48,7848	1838	122100000	Верхньодніпровський	село	Суслівка	84	67,8	16,2
4	Point	232	33,7415	48,7847	1857	122450000	Пятихатський	село	Плоске	120	108,25	11,75
5	Point	233	35,3774	48,7773	135	122320000	Новомосковський	село	Івано-Михайлівка	55	53,7	1,3
6	Point	234	33,6898	48,784	1859	122450000	Пятихатський	село	Троцьке	105	92,65	12,35
7	Point	235	35,2129	48,7865	238	122320000	Новомосковський	село	Миколаївка	115	105,8	9,2
8	Point	236	35,9314	48,7799	368	122590000	Юртівський	село	Дубове	150,7	145,3	5,4
9	Point	237	34,5519	48,7815	58	122560000	Царичанський	село	Ступино	70	64,32	5,68
10	Point	238	34,796	48,7813	63	122230000	Магдалинівський	село	Першотравенка	90	81,2	8,8
11	Point	239	35,7756	48,7812	359	122590000	Юртівський	село	Ново-Язівське	93,8	90,1	3,7
12	Point	240	34,8894	48,7806	84	122230000	Магдалинівський	село	Нововасилівка	100	96,6	3,4
13	Point	241	33,6517	48,7839	1862	122450000	Пятихатський	село	Зохотницьке	98	95,65	2,35
14	Point	242	33,7064	48,7797	1858	122450000	Пятихатський	село	Малі Лозки	115	95,9	19,1
15	Point	243	35,6119	48,7779	403	122320000	Новомосковський	село	Капітанівка	163,6	155,3	8,3
16	Point	244	33,7591	48,7764	1856	122450000	Пятихатський	село	Плоске	70	65,05	4,95
17	Point	245	34,872	48,7744	723	122230000	Магдалинівський	село	Веселе	103	98,42	4,58
18	Point	246	33,7985	48,7735	1855	122450000	Пятихатський	село	Олександро-Григорівка	110	101	9

**Рис.1.** Пример таблицы атрибутов слоя «колодцы»

Визуализация данных в ГИС отличается широтой функциональных возможностей (рис.2).

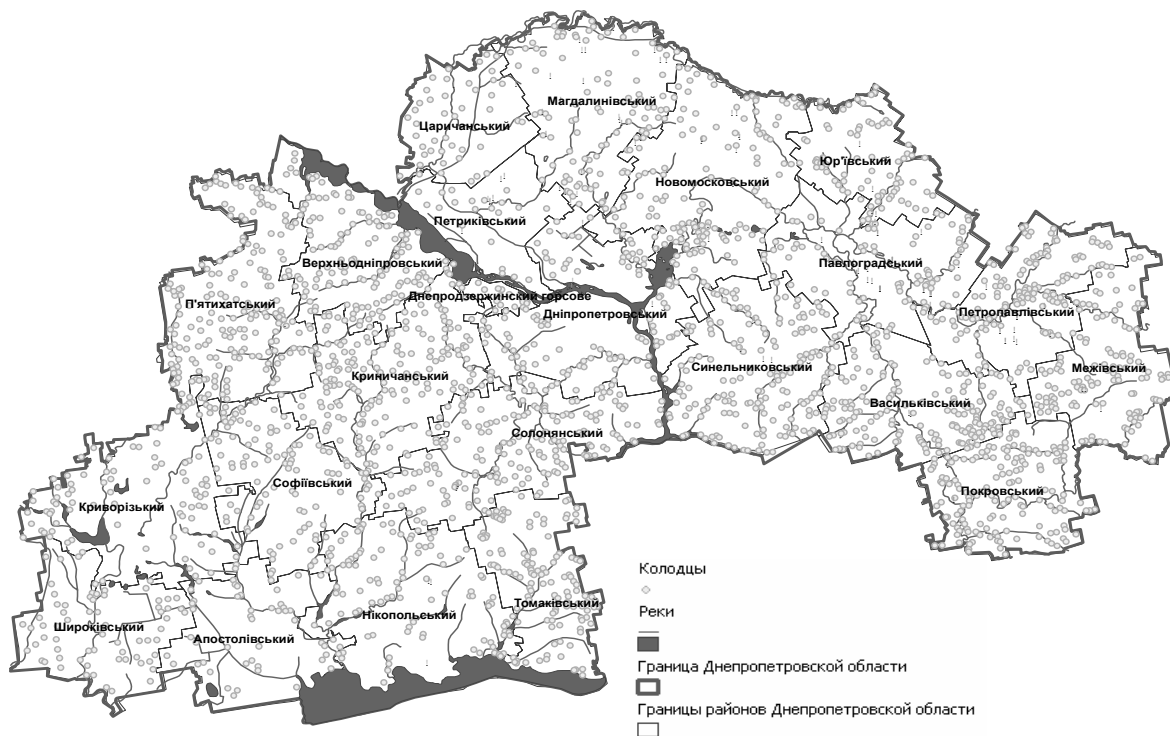
При картировании в ГИС пунктов сети УГВ-мониторинга с соответствующей идентификационной и атрибутивной информацией, показателей уровня и качества грунтовых вод используются все преимущества электронных карт (над бумажными):

- создание непрерывных шкал интенсивности, изменение цвета;
- просмотр всей территории, не прерываясь на границах листов карты;
- увеличение фрагментов и изменение масштаба;
- трехмерное изображение угла обзора в «реальном времени»;
- наличие нескольких слоев, которые можно подключать или отключать, накладывая друг на друга в определенном порядке;
- автоматический поиск требуемой информации;
- наличие функций баз данных, содержащих атрибутивную информацию о географических объектах;
- средства анимации;
- оперативность, гибкость и многовариантность.



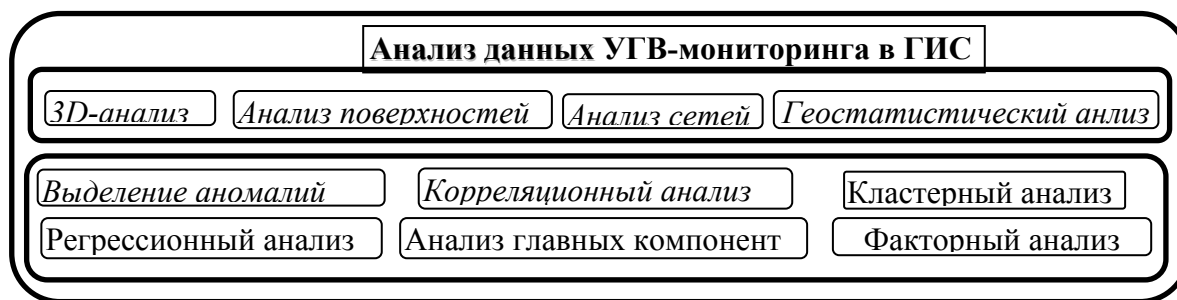
**Рис.2.** Процедуры визуализации данных в ГИС применительно к задачам УГВ-мониторинга

Пример визуализации сети УГВ-мониторинга («колодцы», 2006) Днепропетровской области в ArcGIS представлен на рис.3.



**Рис. 3.** Сеть УГВ-мониторинга («колодцы», 2006) Днепропетровской области в ArcGIS

**Анализ данных УГВ-мониторинга в ГИС** использует процедуры наложения слоев для совместного рассмотрения, инструментарий создания сложных логических выражений для отображения информации по запросам, оверлейные операции, все основные аналитические функциональные модули ГИС (рис.4).



**Рис.4.** Функциональные модули применительно к анализу данных УГВ

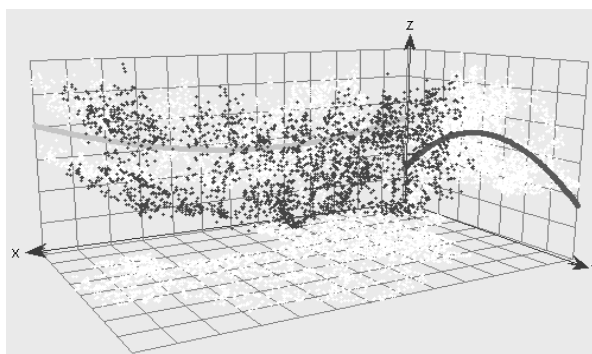
Анализ данных мониторинга в ГИС существенно зависит от сети наблюдений. Анализ сети является первостепенной задачей. Если опорные точки сети наблюдений не распределены в пространстве равномерно, и при этом показатели УГВ пространственно автокоррелируют, результирующая гистограмма выборки может не соответствовать гистограмме для данных всей совокупности. Поэтому для корректного применения методов интерполяции целесообразно использовать декластеризацию. Обычно в ГИС применяют два метода декластеризации – по ячейкам и полигональный.

ГИС-анализ данных включает: анализ местоположения объектов (пунктов сети мониторинга, водных источников, населенных пунктов и т.п.), анализ распределения числовых показателей (УГВ, температуры, осадков и т.д.), построение карт плотности, поиск объектов внутри области, анализ окружения, анализ пространственных изменений [5].

При заполнении в ГИС пропущенных значений в мониторинговых данных используют методы геостатистического анализа – кригинг и кокригинг [6].

Технологическая цепочка выполнения процедур геостатистического анализа в ГИС: 1) проверка гипотезы о нормальности распределения данных с помощью построения гистограмм и графиков квантиль-квантиль; 2) моделирование вариограммы; 3) анализ тренда; 4) интерполяция по методу глобального и локального полинома; 5) кригинг и кокригинг (простой, ординарный, универсальный, вероятностный); 6) сравнение моделей путем перекрестной проверки (последовательное исключение каждой опорной точки из процесса интерполяции, а затем сравнение известного значения с интерполированным для этого местоположения); 7) выбор наилучшей модели по среднеквадратической, средней стандартной, нормированной среднеквадратической ошибке интерполяции [6].

Тренд-анализ позволяет увидеть данные на трехмерном изображении. Пример тренд-анализа среднегодового показателя УГВ Днепропетровской области (2006) приведен на рис.5.



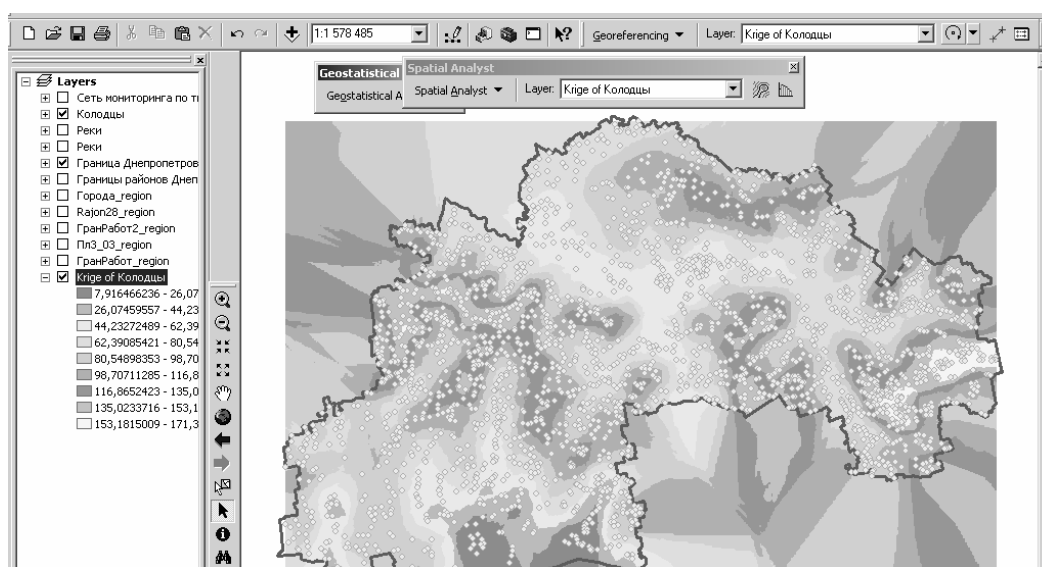
**Рис. 5.** Тренды-среднегодового показателя УГВ

Координаты опорных точек наносятся в плоскости  $xOy$ . В каждой опорной точке высотой отрезка показано значение показателя УГВ (по оси  $Oz$ ). Значения точек затем проецируются на плоскости  $xOz$  и  $yOz$ , образуя точечные графики. Эти графики – проекции трехмерных данных. Затем к точечным графикам на плоскостях проекций подбираются полиномы, аппроксимирующие их расположение.

В ГИС можно «вращать» данные (чтобы выделить в значениях показателей тренды по направлениям), менять перспективу изображения, размер и цвет точек и линий, удалять плоскости и точки, выбирать степень полинома для аппроксимации точечных графиков.

Если в данных присутствует глобальный тренд, можно построить поверхность с использованием одного из детерминистских методов интерполяции (глобального или локального полинома), либо вычесть тренд из данных перед моделированием вариограммы/ковариации для кригинга или кокригинга.

Геостатистический анализ показателей УГВ-мониторинга применяется для построения поверхностей (УГВ, показателей загрязнения УГВ, количества осадков, температуры воздуха) с оценкой ошибки интерполяции, используя значения показателей в опорных точках. Пример применения ординарного кригинга в ArcGIS для интерполяции (на основе данных в точках сети наблюдений) среднегодового показателя УГВ (2006) приведен на рис.6.



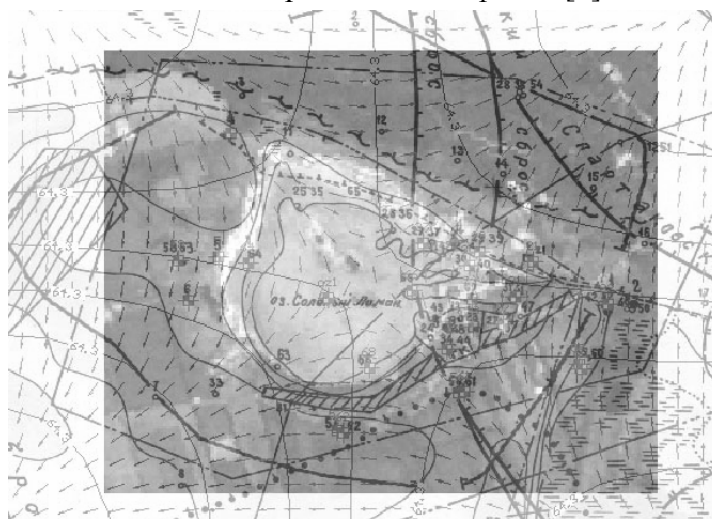
**Рис.6.** Применение ординарного кригинга для интерполяции среднегодового показателя УГВ (2006) Днепропетровской области

Совместный анализ слоев разнородной УГВ-информации (геологических карт, данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), показателей температуры, осадков, УГВ) в ГИС реализуется с помощью наложения в определенном порядке и отображения соответствующих сеточных, векторных слоёв и изображений. Пример наложения в ГИС космоснимка и карты направления движения подземных и поверхностных вод во время обводнения озера Солёный лиман, построенной в Visual ModFlow [7], приведен на рис. 7.

Для анализа максимумов и минимумов УГВ за несколько лет мониторинга строятся карты «экстремумы» [8].

Выделение аномалий (значимые отклонения показателей отдельных пунктов наблюдений от средних значений за весь временной срез мониторинга, значительный по-

стоянный рост или спад самого значения показателя, скорости и ускорения его изменения) на основе анализа временных тенденций изменения показателя в ГИС проводится с помощью построения логических выражений – запросов [8].



**Рис.7.** Наложение слоев (Космоснимок + Карта направления движения подземных и поверхностных вод во время обводнения озера Солёный лиман, построенная в ModFlow)

Пусть  $x_i(t)$  – значение показателя в  $i$ -й точке в момент времени  $t$ . Для наглядности рассмотрим, например, три градации (которые обозначим 0, 1, 2):

0 – если  $x_i(t) < \mu(t) - \sigma(t)$ , 1 – если  $\mu(t) - \sigma(t) \leq x_i(t) < \mu(t) + \sigma(t)$ , 2 – если  $x_i(t) \geq \mu(t) + \sigma(t)$ ,

где  $\mu(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(t)$ ,  $\sigma(t) = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i(t) - \mu(t))^2 \right)^{1/2}$ .

В зависимости от того, к какой из 3-х градаций принадлежит значение показателя в моменты времени  $t$  и  $t+1$ , все точки можно разбить на 9 классов (некоторые классы – пустые):

Показатель	КЛАССЫ								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$x_i(t)$	0	0	0	1	1	1	2	2	2
$x_i(t+1)$	0	1	2	0	1	2	0	1	2

К аномалиям в этом случае относятся 1-й и 9-й классы. Запрос для 1-го класса – найти все  $i$ , для которых истинна конъюнкция

$$(x_i(t) < \mu(t) - \sigma(t)) \text{ AND } (x_i(t+1) < \mu(t+1) - \sigma(t+1)).$$

Аналогично, в случае двух градаций одного показателя для четырех моментов времени  $t, t+1, t+2, t+3$  рассматривается 16 классов. Для учета динамики изменения показателей подобным образом рассматриваются три величины: значение  $x_i(t)$ , скорость  $v_i(t)$  и ускорение  $w_i(t)$  показателя в моменты времени  $t=1, 2, \dots, q$ .

Для классификации данных УГВ в ГИС используются следующие схемы [5, 9]: естественная разбивка, квантиль, равные интервалы, стандартное отклонение. С их помощью также отражаются результаты кластеризации, «остатки» регрессионных моделей и т.п.

Построение моделей движения грунтовых вод целесообразно в специализированных ГИС [10], например, Visual ModFlow. Эта ГИС наиболее приспособлена к ре-

шению задач УГВ-мониторинга, использующих математический аппарат дифференциальных уравнений.

Геоконическое моделирование показателей мониторинга в ГИС, рассмотренное в работе [3], используется применительно к УГВ.

Процедуры извлечения из данных УГВ-мониторинга новых знаний на основе ГИС-инструментария следующие.

1. Районирование территории на основе классификации и кластеризации пунктов сети наблюдений по совокупности мониторинговых данных.

2. Выявление закономерностей территориального распределения многомерных аномалий.

3. Комплексный анализ развития территории на базе синтеза и агрегирования в ГИС отчетных материалов гидрогеологических партий.

4. Обнаружение пространственных взаимосвязей между разнородными показателями УГВ-мониторинга.

5. Сопоставление многомерных регрессионных моделей зависимостей между показателями и результатов геоконического моделирования остатков регрессионных моделей, нахождение объяснения остаткам и уточнение модели.

6. Выявление тенденций динамики изменений УГВ-показателей и т.д.

**Выводы.** Проведенный анализ функций существующих ГИС позволяет утверждать, что их программное обеспечение содержит множество адекватных для решения задач УГВ-мониторинга функциональных процедур.

Эффективность ГИС при решении задач УГВ-мониторинга может быть повышена за счет новейших аналитических, графических и анимационных возможностей ГИС будущих поколений. Требуется привлечение новых методов многомерного анализа пространственных данных, поддержка интерактивного управления картографикой и обеспечение подсветки анализируемых объектов во всех открытых окнах: картографических, графических и табличных. В идеале – полученная из разных источников УГВ-информация в реальном масштабе времени в компьютерной сети в интерактивном режиме синтезируется, преобразуется в «разумное изображение», гипергеоконическую модель, которая наглядно отображает свойства изучаемых многомерных данных УГВ-мониторинга.

### Библиографический список

1. Рубан С.А., Ніколішина А.В. Ґрунтові води України. ДВ УкрДГПІ, Дніпропетровськ, 2005.– 426 с.
2. ДеМерс, Майкл Н. Географические Информационные Системы. Основы.: Пер. с англ.-М.: Дата+, 1999. - 490 с.
3. Сарычева Л.В. Компьютерный эколого-социально-экономический мониторинг регионов. Геоинформационное обеспечение: Монография. – Днепропетровск: НГУ, 2003. – 174 с.
4. Майкл Зейлер. Моделирование нашего мира. Руководство ESRI по проектированию базы геоданных. Пер. с англ.– ESRI. – М.: ГФ МГУ, 2001.– 254 с.
5. Энди Митчелл. Руководство по ГИС анализу. – Часть 1: Пространственные модели и взаимосвязи. Пер. с англ.– Киев, ЗАО ECOMM Co., Стилос, 2000.–198 с.
6. ArcGIS Geostatistical Analyst. Руководство пользователя. Пер. с англ.– ESRI. – М.: ГФ МГУ, 2002.– 278 с.
7. GROUNDWATER MODELING. - <http://geodynamics.wustl.edu/classes/hydrology/lectures/>
8. Сарычева Л.В. Компьютерный эколого-социально-экономический мониторинг регионов. Математическое обеспечение: Монография. – Днепропетровск: НГУ, 2003. – 222 с.
9. Сарычева Л.В., Качанов О.В. Схеми класифікації регіонів за показниками еколого-соціально-економічного моніторингу в геоінформаційній системі. Геоінформатика, 2002, №4. – С.53-63.
10. Geological Survey - <http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/>