

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЕЙ ГРУНТОВЫХ ВОД НП «БЕЛОВЕЖСКАЯ ПУЩА»

А. А. Волчек, Н. Н. Шешко

Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси

Брест, Беларусь

Брестский государственный технический университет

Брест, Беларусь

E-mail: volchak@tut.by, optimum@tut.by

В статье представлен метод построения прогнозных моделей среднегодовых уровней грунтовых вод территории Национального парка «Беловежская пуца», основанный на использовании метода Монте-Карло. Выделение основных групп гидрогеологических скважин обоснованно результатами кластерного анализа.

Ключевые слова: уровни грунтовых вод, гидрогеологическая скважина, Монте-Карло, коэффициент вариации, прогноз, кластеры.

ВВЕДЕНИЕ

Грунтовые воды – важный элемент любой геосистемы. Они являются одним из источников водного питания растений и живых организмов. Грунтовые воды более инертны по сравнению с реками и озерами, что позволяет четко оценить картину их состояния. В последние годы воздействие природно-климатических и антропогенных факторов привело к значительным изменениям уровенного режима грунтовых вод. В свою очередь последнее оказывает сильное воздействие на биоценозы, в том числе на лесные массивы. Поэтому объективна необходимость геоэкологического прогноза природно-климатических и антропогенных воздействий на грунтовые воды. Для реализации данной задачи могут быть использованы имитационные и прогностические модели.

При этом, решение данной задачи сопряжено с рядом проблем: множество факторов влияющих на уровенный режим, стохастический характер природы колебаний и малая продолжительность ряда наблюдений за глубиной залегания грунтовых вод. Кроме этого, усложняет ситуацию антропогенное воздействие (строительство прудов, водохранилищ и гидромелиоративных систем и т. д.).

Предметом исследования являются временные ряды уровней грунтовых вод (УГВ) НП «Беловежская пуца», для выявления закономерностей колебаний и обоснование возможности построения прогнозных моделей.

ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данными для реализации задач исследования послужили результаты многолетних инструментальных наблюдений за УГВ полученные Гидрогеологической экспедицией Республики Беларусь на территории НП «Беловежская пуца». В настоящее время наблюдения ведутся на более чем 70 гидрогеологических скважинах. В рамках данного иссле-

дования использовано 49 скважин с наибольшим периодом непрерывных наблюдений (30 – 40 лет). Створы наблюдений за УГВ проходят по характерным участкам Национального парка. Глубина закладки скважин варьируется в широких пределах (2...140 м) в зависимости от колебаний среднегодовых значений УГВ и назначения скважин.

В табл. 1 приведены основные статистические характеристики рассматриваемых временных рядов колебаний УГВ по гидрогеологическим скважинам.

Таблица 1

Основные статистические параметры колебаний УГВ

№ скважины	Продолжительность наблюдений	Средне-многолетнее значение УГВ, м	Средне-квадратическое отклонение, м	Коэффициент вариации	№ скважины	Продолжительность наблюдений	Средне-многолетнее значение УГВ, м	Средне-квадратическое отклонение, м	Коэффициент вариации
516	39	1,39	0,10	0,07	655	36	5,71	0,94	0,17
518	39	1,27	0,14	0,11	656	36	1,20	0,22	0,18
519	39	1,43	0,12	0,08	658	36	2,75	0,45	0,16
564	39	2,53	0,29	0,12	661	36	0,99	0,19	0,20
770	39	3,20	0,15	0,05	704	35	7,35	0,43	0,06
771	39	14,88	0,26	0,02	705	35	2,18	0,36	0,17
517	39	1,34	0,11	0,08	707	35	15,29	0,57	0,04
520	39	1,28	0,12	0,09	708	35	18,87	0,57	0,03
522	39	1,15	0,14	0,12	710	35	22,76	0,49	0,02
562	39	1,59	0,20	0,13	711	35	15,64	0,48	0,03
563	39	2,38	0,25	0,11	712	35	6,20	0,45	0,07
772	39	1,17	0,14	0,12	647	39	0,63	0,18	0,28
773	39	4,72	0,30	0,06	652	39	3,30	0,38	0,12
774	39	9,43	0,49	0,05	646	39	0,96	0,31	0,33
775	39	1,43	0,36	0,25	648	39	1,72	0,68	0,39
776	39	3,16	0,41	0,13	649	39	0,92	0,28	0,30
777	38	7,68	0,43	0,06	650	36	0,79	0,26	0,32
778	39	12,18	0,61	0,05	651	36	0,73	0,18	0,24
634	36	1,05	0,10	0,09	1348	31	0,72	0,11	0,15
635	30	6,58	0,40	0,06	1350	31	1,31	0,14	0,11
638	36	0,74	0,14	0,19	1351	31	1,52	0,15	0,10
637	36	3,32	0,62	0,19	1352	31	1,65	0,13	0,08
633	36	0,85	0,22	0,26	1353	31	1,18	0,13	0,11
657	36	2,42	0,14	0,06	662	36	0,82	0,15	0,18
659	36	9,16	0,62	0,07	664	36	2,77	0,28	0,10
706	35	9,59	0,28	0,03	665	36	1,52	0,51	0,33
632	36	6,99	0,31	0,04	666	36	1,94	0,48	0,25
653	36	0,35	0,17	0,48	663	36	2,70	0,22	0,08
654	36	1,47	0,14	0,09	667	35	1,09	0,47	0,43

Факторы, влияющие на формирование уровня режима грунтовых вод можно условно разделить на две группы. К первой группе относятся глобальные факторы, которые касаются больших территорий, а ко второй – локальные факторы. Тогда УГВ можно представить как:

$$z_t = z_t^{\phi} \pm \Delta z_t^{\phi}, \quad (1)$$

где z_t – УГВ в расчетном календарном году, м; z_t^{ϕ} – фоновая составляющая в формировании УГВ в том же году, м; $\pm \Delta z_t^{\phi}$ – вклад в формирование УГВ локальных факторов, м.

Для оценки влияния глобальных z_t^{ϕ} факторов на уровненный режим грунтовых вод с достаточной для практических целей точностью, может быть использованы следующие математические модели: авторегрессии (АР), скользящего среднего (СС), смешанная (АРСС) и проинтегрированная (АРПСС) [1]. При этом данные модели реализованы в пакете прикладных программ STATISTICA [2]. Вклад в формирование УГВ локальных факторов $\pm \Delta z_t^{\phi}$ может быть описан случайной функцией:

$$\pm \Delta z_t^{\phi} = \varepsilon \pm \Delta \tau, \quad (2)$$

где ε – свободный член модели; $\pm \Delta \tau$ – случайная величина, имеющая нулевое математическое ожидание и характеризующая вклад локальных факторов.

Тогда прогнозная модель, с учетом выше сказанного, будет иметь вид:

$$z_{t+1} = \varphi_1 \cdot z_t + \varphi_2 \cdot z_{t-1} + \dots + \varphi_p \cdot z_{t-p+1} + \varepsilon \pm \Delta \tau, \quad (3)$$

где z_{t+1} – совокупность случайных величин в следующий момент времени $t+1$, предсказанных по совокупности значений z_t и z_{t-p+1} ; φ_p – параметр модели p -го порядка.

Аналогично представим модель скользящего среднего:

$$z_{t+1} = \varepsilon - \theta_1 \cdot a_t + \theta_2 \cdot a_{t-1} + \dots + \theta_q \cdot a_{t-q+1} \pm \Delta \tau, \quad (4)$$

где θ_p – параметр модели q -го порядка; a_t, a_{t-1} – скользящее среднее значение в текущий и предшествующий момент времени.

В некоторых случаях может применяться смешанная модель:

$$z_{t+1} = AP(p) + CC(q) + \varepsilon \pm \Delta \tau. \quad (5)$$

Однако приведенные выше модели могут применяться только для стационарных рядов, а исследуемые гидрогеологические ряды в ряде случаев являются нестационарными. Для приведения ряда к стационарному используется преобразование временных рядов с помощью натурального логарифма [3].

Для определения вида и порядка модели необходим анализ выборочных автокорреляционных функций (АКФ) и частных автокорреляционных функций (ЧАКФ). При этом используются следующие критерии оценки степени нестационарности процесса и выбора модели [4] приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Критерии нестационарности процесса и выбора модели

АКФ	ЧАКФ	Вид модели
Экспоненциально затухает	Высокое значение лишь при сдвиге по времени, равном 1	(АР(1)) авторегрессия первого порядка

АКФ	ЧАКФ	Вид модели
Форма затухания в виде синусоидальной волны или экспоненциально затухает	Высокое значение лишь при сдвиге по времени, равному 1 и 2	(АР(2)) авторегрессия второго порядка
Высокое значение при сдвиге по времени, равном 1, остальные значения нулевые	Экспоненциально затухает или осциллируют с изменением знака	(СС(1)) скользящее среднее первого порядка
Высокое значение при сдвиге по времени, равному 1 и 2, остальные значения нулевые	Форма синусоидальной волны или экспоненциально затухает	(СС(2)) скользящее среднее второго порядка
Экспоненциально затухает, начиная со сдвига по времени, равного 1 (затухание может быть монотонным или осциллирующим)	Экспоненциально затухающие значения ординат либо монотонно осциллируют	(АРСС(1,1)) авторегрессия и скользящее среднее первого порядка

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для выявления общих закономерностей в колебаниях УГВ выполнен анализ, обобщение и выделение модульных скважин. Для этих целей применен кластерный анализ с использованием в качестве метрики коэффициент корреляции Пирсона [5], реализованный в пакете прикладных программ STATISTICA (рис. 1).

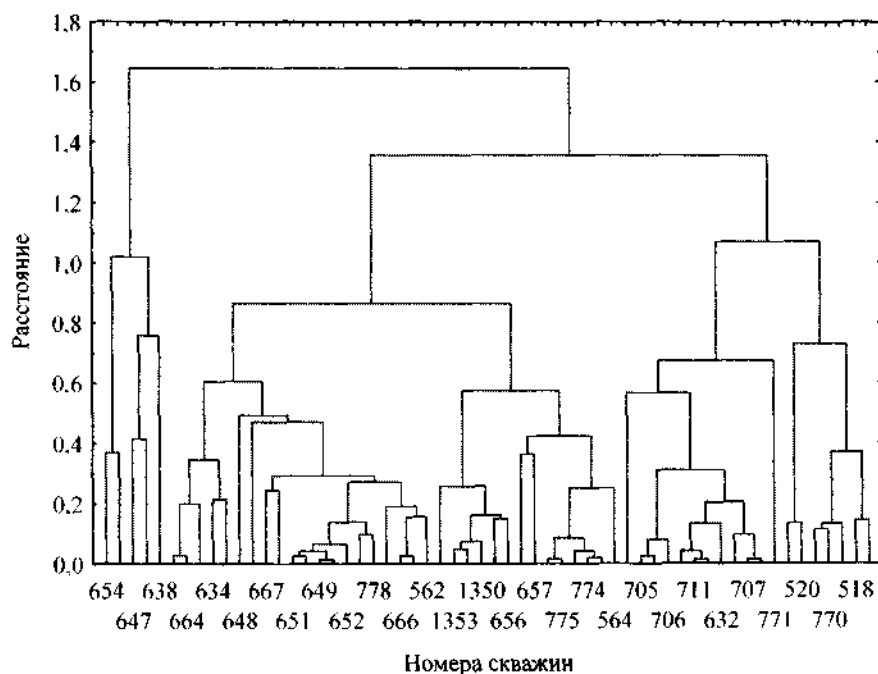


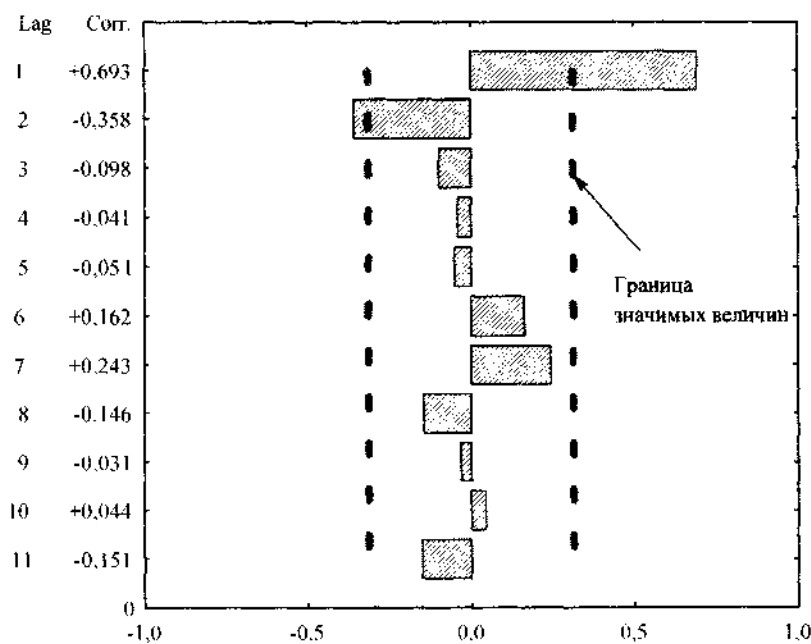
Рис. 1. График связей временных рядов колебаний УГВ по скважинам

Используя результаты кластерного анализа (рис. 1) выделены модельные скважины и основные группы с заданным предельным коэффициентом корреляции (результаты представим в табл. 3).

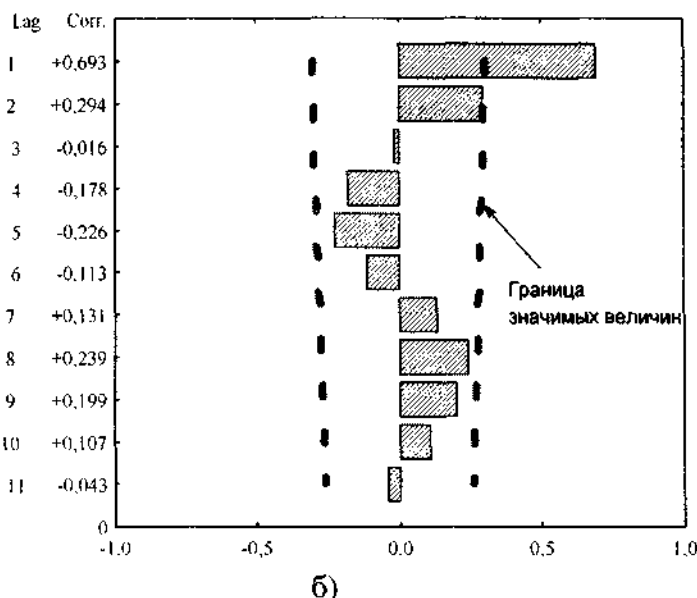
Основные группы скважин с соответствующими модельными скважинами

Номера кластеров	Кластеры								
	1	2	3		4	5	6		7
Номера скважин	517	522	705	632	776	1348	667	652	663
	770	520	704	708	775	1353	653	637	664
	519		706	707	777	1351	651	778	662
	518		712	659	774	1350	650	563	634
	516		711	771	773	1352	649	666	772
			710		564	652	646	665	
Модельные скважины	770	520	771		773	652	649		663

Рассмотрим построение прогнозной модели на примере временного ряда колебаний УГВ по скважине № 771. Как указывалось выше, для определения вида и порядка модели необходимо построение АКФ и ЧАКФ. На рис. 2 приведены данные функции, анализ которых показывает, что для исследуемого временного ряда применима авторегрессионная модель второго порядка (АР(2)).



а)



а) ЧАКФ; б) АКФ

Рис. 2. Корреляционные функции среднегодовых значений УГВ по скважине № 771

Проверка адекватности прогнозных моделей осуществлялась с использованием данных инструментальных наблюдений за последние 5 лет. При этом данные года не использовались при определении параметров моделей. Используя ряд наблюдений за УГВ по данной скважине при помощи пакета прикладных программ STATISTICA, определяем коэффициенты авторегрессионной модели, которые равны $\phi_1 = 0,988$ и $\phi_2 = -0,385$. Таким образом, имеем модель вида:

$$\tilde{z}_{t+1} = 0,988 \cdot z_t - 0,385 \cdot z_{t-1}, \quad (6)$$

где \tilde{z}_{t+1} – прогнозные значения УГВ промежуточной модели.

Свободный член модели ε может быть определен по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{k=1}^n (z_k - \tilde{z}_k)}{k}. \quad (7)$$

Предполагая, что случайная составляющая имеет нормальный закон распределения и математическое ожидание равно нулю, выборочное среднеквадратического отклонения параметра $\pm \Delta \tau$ будет определяться по формуле:

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n [(z_k - \tilde{z}_k) - \varepsilon]^2}{k}}. \quad (8)$$

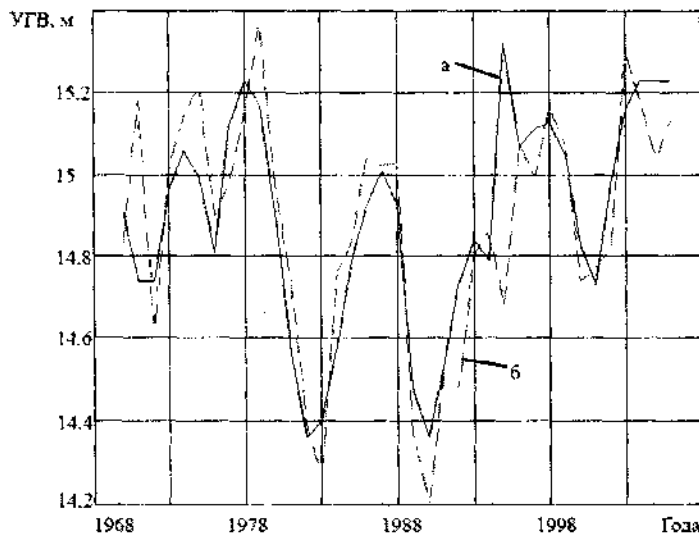
Зная статистические характеристики случайной величины $\pm \Delta \tau$ можно генерировать массив случайных величин Ω . Таким образом, конечная модель будет иметь вид:

$$z_{t+1} = 0,988 \cdot z_t - 0,385 \cdot z_{t-1} + 5,92 + \Omega_t.$$

Результаты построения прогнозных моделей представлены на хронологическом графике колебаний УГВ (рис. 3).

Нами предпринята попытка описать колебания УГВ с помощью сложной модели Маркова и метода Монте-Карло. На основании анализа цикличности во временных рядах с помощью АКФ и ЧАКФ удалось построить ряд прогнозных моделей позволяющих дать

оценку динамики процесса с заблаговременностью в 1 год. Результаты анализа представлены в табл. 4. В таблице приведены статистически значимые модели. Проверка их на независимом материале показала их удовлетворительную сходимость (рис.4). Полученные модели отражают закономерности колебаний УГВ и могут использоваться для краткосрочного прогноза.



а) исходный ряд; б) прогноз

Рис.3. Результаты построения прогнозной модели среднегодовых значений УГВ по скважине № 771

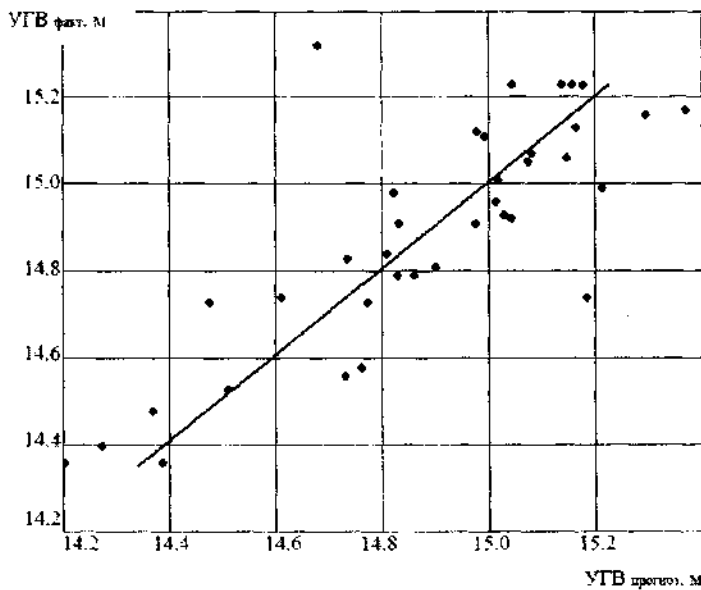


Рис.4. Фактические и прогнозные УГВ

Осно

Прови
территори
ны основн
стерного а
Дана
год, которе
женная ме
рии НП «И
управления
Вся с
сти. Кроме
сти.

1. Исм
стик / Г. Х.]
потенциала Р
2. Бор
ченко. М. : Ф
3. Вуж
ванию опера
4. Бож
1974. Вып. 1.
5. Ман

Основные группы скважин с соответствующими модельными скважинами

Группа (№ модельной скважины)	Вид модели	Коэффициент корреляции
1 (770)	$z_{t+1} = 0,607 \cdot z_t + 1,26 + \Omega_t$	0,63
2 (520)	$z_{t+1} = 0,567 \cdot z_t + 0,542 + \Omega_t$	0,63
3 (771)	$z_{t+1} = 0,988 \cdot z_t - 0,385 \cdot z_{t-1} + 5,92 + \Omega_t$	0,9
4 (773)	$z_{t+1} = 0,647 \cdot z_t + 1,55 + \Omega_t$	0,69
5 (652)	$z_{t+1} = 0,892 \cdot z_t + 0,376 + \Omega_t$	0,86
6 (649)	$z_{t+1} = 0,763 \cdot z_t + 0,2 + \Omega_t$	0,67
7 (663)	$z_{t+1} = 0,581 \cdot z_t + 1,14 + \Omega_t$	0,77

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная оценка основных статистических характеристик временных рядов УГВ территории НП «Беловежская пуца» за период инструментальных наблюдений. Выделены основные группы скважин и отобраны модельные скважины с использованием кластерного анализа.

Дана методика построения прогнозных моделей УГВ с заблаговременностью в один год, которая дает результаты с достаточной для практических целей точностью. Предложенная методика позволяет оперативно получить прогнозные значения УГВ на территории НП «Беловежская пуца», что крайне важно для разработки оперативных планов управления водным режимом.

Вся сложность построения прогнозных моделей заключается в их индивидуальности. Кроме того, неоднородность временных рядов УГВ создает дополнительные трудности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исмайллов, Г. Х. Возможные подходы к оценке будущих значений гидрологических характеристик / Г. Х. Исмайллов, А. В. Перминов // Пробл. Научн. обеспечения развития эколого-экономического потенциала России. 2004. С. 44-49.
2. Боровиков, В. Прогнозирование в системе STATISTICA в среде WINDOWS / В. Боровиков, Г. Ивченко. М. : Финансы и статистика, 1999. 382 с.
3. Вуколов, Э. А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL / Э.А. Вуколов. М. : Форум, 2004. 464 с.
4. Бокс, Дж. Анализ временных рядов, прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. М. : Мир, 1974. Вып. 1. 406 с.
5. Мандель, И. Д. Кластерный анализ / И.Д. Мандель. М. : Финансы и статистика, 1988. 176 с.