

КОЛЕБАНИЯ УРОВЕННОГО РЕЖИМА ГРУНТОВЫХ ВОД ПРИРОДНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «БЕЛОВЕЖСКАЯ ПУЩА»

А.А. ВОЛЧЕК*, Н.Н. ШЕШКО**

** Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси*

*** Брестский государственный технический университет*

Национальный парк «Беловежская пуца» является уникальным природным объектом не только в масштабах Беларуси, но и Европы и мира в целом. Поэтому сохранение данного природного комплекса является одной из главнейших задач стратегии управления Национальным парком.

В последние годы усилилось влияние природных факторов (потепление климата, увеличение повторяемости экстремальных метеорологических явлений и др.) и антропогенного воздействия (строительство различных сооружений и др.) на развитие экосистем Беловежской пуцы. Из множества факторов, влияющих на развитие экосистем, необходимо в первую очередь выделить водный фактор, который формирует тот или иной биоценоз. Территория Беловежской пуцы расположена на Прибугской равнине, которая характеризуется обширными равнинами и заболоченными территориями.

Исходя из анализа климатических и гидрогеологических условий территории, грунтовые воды можно выделить как один из решающих факторов в формировании биоценозов Беловежской пуцы. Кроме того, грунтовые воды более инертны по сравнению с речными и озерными водами.

Целью настоящего исследования является выявление закономерностей в пространственно-временных колебаниях уровня грунтовых вод (УГВ) природно-территориального комплекса «Беловежская пуца» в современных условиях.

Объекты и методы исследований

Данными для реализации задач исследования послужили результаты многолетних инструментальных наблюдений за УГВ, полученные Гидрогеологической экспедицией Республики Беларусь на территории

Государственного природоохранного учреждения «Национальный парк «Беловежская пуца». В рамках настоящего исследования использованы результаты наблюдений по 52 скважинам из 70 существующих с наибольшим периодом непрерывных наблюдений (30–40 лет). Створы наблюдений за УГВ проходят по характерным ландшафтным участкам Национального парка. Глубина закладки скважин варьируется в широких пределах (2–140 м) в зависимости от гидрогеологических условий и назначения скважин.

Для оценки изменений УГВ выполнен комплексный анализ статистической структуры временных рядов за годовые и месячные интервалы времени. Расчетный интервал принят в основном с 1972 по 2006 гг., хотя для некоторых гидрогеологических скважин интервал составляет с 1966 по 2006 гг.

Определялись следующие статистические параметры:

– среднее многолетнее значение

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{n}$$

где Z_i – значение УГВ за i -ый год, m ; n – число лет наблюдений;

– коэффициент вариации

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Z_i}{\bar{Z}} - 1 \right)^2}{n-1}}$$

– коэффициент асимметрии

$$C_s = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{Z_i}{\bar{Z}} - 1 \right)^3}{\bar{C}_v^3 \cdot (n-1) \cdot (n-2)}$$

– коэффициент автокорреляции

$$r(1) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (Z_i - \bar{Z}_1) \cdot (Z_{i+1} - \bar{Z}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (Z_i - \bar{Z}_1)^2 \cdot \sum_{i=2}^n (Z_i - \bar{Z}_2)^2}}$$

$$\text{где } \bar{Z}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} Z_i}{n-1} \text{ и } \bar{Z}_2 = \frac{\sum_{i=2}^n Z_i}{n-1}$$

Для проверки гипотезы статистического равенства средних значений и дисперсий временных рядов УГВ за отдельные периоды использовались критерии t-Стьюдента и F-Фишера, соответственно, а гипотезы о равенстве дисперсий – критерий, основанный на распределении Фишера, зависящем только от числа степеней свободы m_1 и m_2 . Аналитическое выражение критерия Фишера имеет вид

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$$

где S_1 , S_2 – оценка дисперсии за первый и за второй период инструментальных наблюдений, соответственно, и определяется по формуле

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z}_1)^2}$$

Для альтернативной гипотезы (дисперсии не равны между собой) различие между дисперсиями считают значимым, если выполняется условие

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} > F_{(\alpha), m_1, m_2}$$

где $F_{(\alpha), m_1, m_2}$ – определяется табулированием функции плотности распределения Фишера с уровнем значимости α и степенями свободы отдельных выборок m_1 и m_2 .

Для сравнения выборочных средних за отдельные периоды наблюдений выдвигается гипотеза о равенстве математических ожиданий. Гипотеза проверяется с использованием t -критерия, который определяется для двух случаев: дисперсии статистически равны и не равны между собой (7), тогда, соответственно:

$$t = \frac{\bar{Z}_1 - \bar{Z}_2}{S \cdot \sqrt{1/n_1 + 1/n_2}}$$

$$t = \frac{\bar{Z}_1 - \bar{Z}_2}{\sqrt{S_1^2/n_1 + S_2^2/n_2}}$$

где \bar{Z}_1, S_1, n_1 – статистические параметры за первый период,

\bar{Z}_2, S_2, n_2 – статистические параметры за второй период.

Границы критической области устанавливаются, как и в предыдущем случае, табулированием функции t -распределения с заданным уровнем значимости α и числом степеней свободы m . Тогда для альтернативной гипотезы (математические ожидания не равны между собой) должно выполняться условие

$$|t| \geq t_{\alpha, m}$$

Влияние глобальных факторов на формирование уровня режима грунтовых вод оценивались с помощью линейных трендов

$$Z_f(t) = Z_f(0) \pm \Delta Z \cdot t$$

где $Z_f(0)$ – УГВ на начало расчетного периода, м; ΔZ – скорость изменения уровня грунтовых вод, м/год; t – календарный год.

Скорость изменения УГВ определяется как первая производная функции изменения уровня режима. Для выбранного периода наблюдений тренд определяется следующим методом. Определялся коэффициент корреляции исследуемого ряда и вектора $L \in (1 \dots n)$ по формуле

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n \left[(Z_i - \bar{Z}) \left(i - \frac{n+1}{2} \right) \right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2 \cdot \sum_{i=1}^n \left(i - \frac{n+1}{2} \right)^2}}$$

где Z_i – УГВ в текущий период, m ; n – количество элементов исследуемого ряда. Тогда коэффициент регрессии (тренд ΔZ , м/год) определим как угол наклона линии тренда к оси абсцисс

$$\Delta Z = R \cdot \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2}{n-1}}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(i - \frac{n+1}{2}\right)^2}{n-1}}}$$

Данные наблюдений за уровнем режимом отдельной гидрогеологической скважины представлены в виде непрерывного временного ряда с месячной дискретизацией. Обработка материала связана с большим объемом однотипных операций. Исходя из этого использовано математическое программирование процесса отбора интересующего материала и выполнения его анализа. Программой оболочкой послужил Mathcad 13.0. Общий алгоритм работы представлен в трех блоках:

- работа с базами данных – выборка данных наблюдений по отдельным скважинам и (или) за отдельные месяцы;
- обработка данных – оценка необходимых статистических параметров и тренда;
- вывод данных – формирование отчета с записью в бинарный файл и графическое отображение результатов.

Для выявления цикличности колебаний УГВ и ее трансформации использовался метод спектрально-временного анализа (СВАН). Суть СВАН заключается в вычислении циклов на скользящих временных отрезках (временных окнах) и изображении в виде СВАН-диаграмм (Кобышева и др., 1981; Климат Беларуси, 1994). Спектр вариаций представляет собой набор амплитуд гармонических составляющих, которые получаются спектральным разложением флуктуирующей величины на конкретном временном отрезке. Длина окна не должна быть слишком малой, поскольку при этом уменьшается точность спектрального анализа, а также не дается четкого представления о низких частотах. Однако завышенная длина окна также не дает полной информации, так как при этом будут сглаживаться высокочастотные колебания. В настоящей работе длина окна принята 11 лет (примерно треть периода наблюдений). Периоды гармоник (или обратные им величины – частоты) на СВАН-диаграммах откладывают на вертикальной оси; время, отвечающее середине

окна, – на горизонтальной оси. Амплитуда соответствующих колебаний отражается как цветовая шкала. Повторяемость доминирующих циклов выражается в виде более или менее продолжительных полос с определенной амплитудой. Этот признак показывает продолжительность существования ритмических изменений.

Результаты исследований и их обсуждение

При анализе изменений природных процессов важным является выявление периодов антропогенного воздействия. Основным антропогенным воздействием на экосистемы Беловежской пуцы является осушение избыточно увлажненных земель и строительство крупных водохранилищ (в основном в 60–70-е годы прошлого столетия). Мелиорированные территории предназначались для сельскохозяйственного использования в качестве сенокосов.

В колебании УГВ мы выделили следующие периоды: естественное состояние; период строительства; период стабилизации; период реконструкций гидромелиоративной сети. Выявление названных периодов осуществляется на основе анализа динамики изменения УГВ и последующего сопоставления выделенных периодов с реальными датами гидротехнического строительства.

Для анализа динамики изменений УГВ отобраны ряды с наибольшим периодом наблюдений и ранней датой начала наблюдений. Такими рядами наблюдений за УГВ служат данные по гидрогеологическим скважинам 517; 518; 519; 520; 522; 562; 563, для которых на рисунке 1 приведены гистограммы частот.

Из рисунка видно, что распределение случайной величины УГВ близко к нормальному закону. Исходя из этого, возможно применение вышеприведенных методик анализа временных рядов.

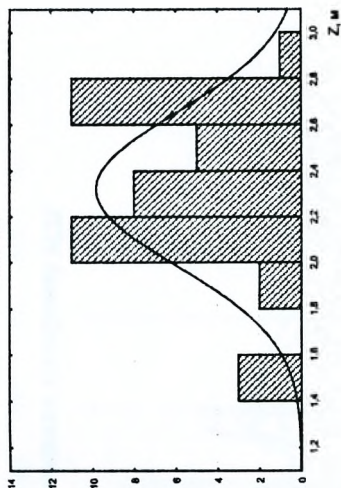
Хронологический ход изменения УГВ по данным скважинам представлен на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2, в ходе колебаний УГВ отчетливо просматриваются несколько периодов:

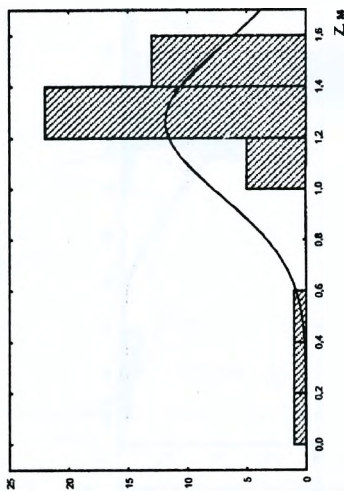
- I. естественное состояние;
- II. период строительства;
- III. период стабилизации;
- IV. период реконструкций гидромелиоративной сети;
- V. период стабилизации после реконструкции.

С использованием формул (1) – (4) определены основные статистические характеристики рассматриваемых временных рядов колебаний УГВ по гидрогеологическим скважинам (табл. 1).

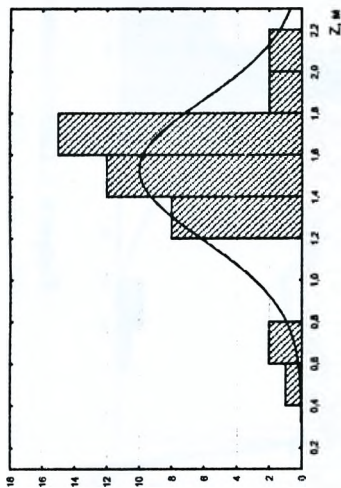
Скв. 563



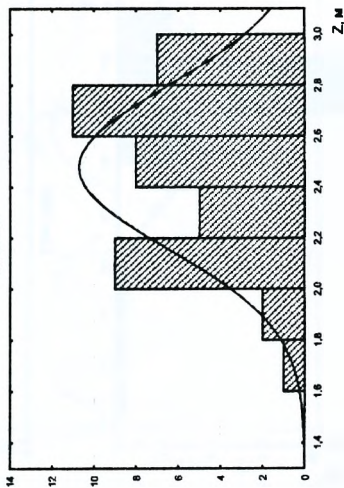
Скв. 517



Скв. 562



Скв. 564



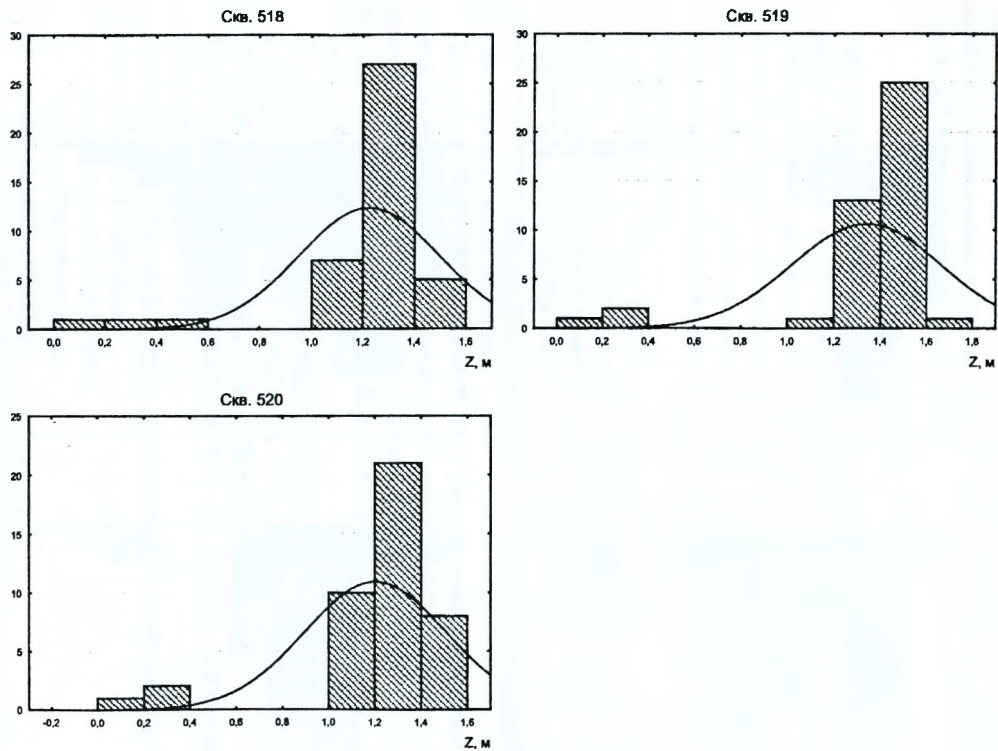


Рисунок 1. Гистограммы частот колебаний УГВ

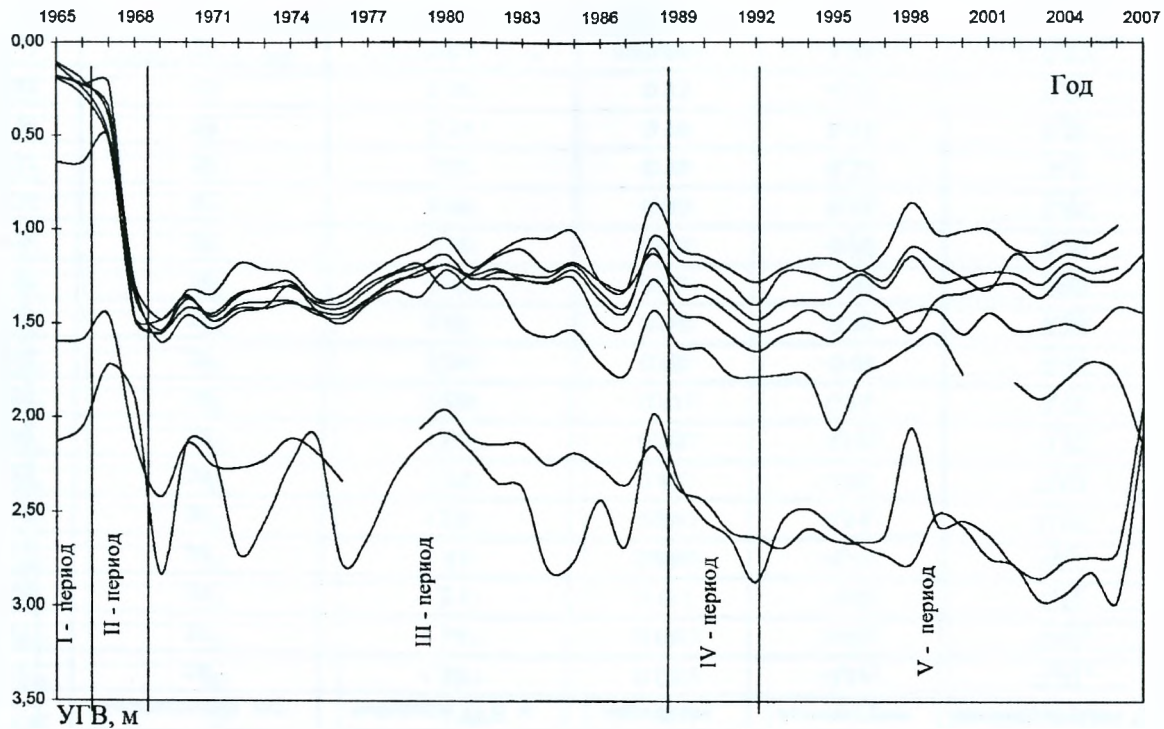


Рисунок 2. Хронологический ход колебаний среднегодовых значений УГВ по скважинам

Таблица 1

Основные статистические параметры временных рядов УГВ

№ скважины	Продолжительность наблюдений, лет	Среднемноголетнее значение УГВ, м	Коэффициент вариации	Коэффициент асимметрии	Коэффициент автокорреляции, $r(1)$
516	39	1,39	0,07	-0,24	0,31
517	39	1,34	0,08	0,08	0,48
518	39	1,27	0,11	-1,53	0,37
519	39	1,43	0,08	-0,38	0,67
520	39	1,28	0,09	0,14	0,56
522	39	1,15	0,12	0,25	0,53
562	39	1,59	0,13	0,09	0,76
563	39	2,38	0,11	0,21	0,75
564	39	2,53	0,12	-0,46	0,33
632	36	6,99	0,04	-0,31	0,74
633	36	0,85	0,26	-0,01	0,65
634	36	1,05	0,09	-0,86	0,36
635	30	6,58	0,06	0,18	0,85
637	36	3,32	0,19	0,22	0,9
638	36	0,74	0,19	0,18	0,05
646	39	0,96	0,33	-0,33	0,88
647	39	0,63	0,28	1,24	0,82
648	39	1,72	0,39	-1,16	0,87
649	39	0,92	0,3	0,18	0,82

№ скважины	Продолжительность наблюдений, лет	Среднемноголетнее значение УГВ, м	Коэффициент вариации	Коэффициент асимметрии	Коэффициент автокорреляции, $r(1)$
650	36	0,79	0,32	-0,43	0,86
651	36	0,73	0,24	-0,13	0,83
652	39	3,3	0,12	-2,91	0,38
653	36	0,35	0,48	-0,03	0,8
654	36	1,47	0,09	0,64	0,77
655	36	5,71	0,17	-0,95	0,76
656	36	1,2	0,18	0,25	0,49
657	36	2,42	0,06	1,11	0,33
658	36	2,75	0,16	1,11	0,57
659	36	9,16	0,07	-0,18	0,86
661	36	0,99	0,2	1,01	0,53
662	36	0,82	0,18	-0,26	0,41
663	36	2,7	0,08	-0,31	0,51
664	36	2,77	0,1	-0,01	0,6
665	36	1,52	0,33	0,29	0,84
666	36	1,94	0,25	0,15	0,84
667	35	1,09	0,43	0,25	0,82
704	35	7,35	0,06	-0,72	0,83
705	35	2,18	0,17	-0,36	0,84

№ скважины	Продолжительность наблюдений, лет	Среднемноголетнее значение УГВ, м	Коэффициент вариации	Коэффициент асимметрии	Коэффициент автокорреляции, $r(1)$
706	35	9,59	0,03	-0,45	0,75
707	35	15,29	0,04	-0,32	0,83
708	35	18,87	0,03	-0,07	0,78
710	35	22,76	0,02	-0,29	0,88
711	35	15,64	0,03	-0,42	0,87
712	35	6,2	0,07	-0,37	0,86
770	39	3,2	0,05	-0,41	0,59
771	39	14,88	0,02	-0,38	0,7
772	39	1,17	0,12	1,48	0,61
773	39	4,72	0,06	-0,47	0,66
774	39	9,43	0,05	-1,16	0,2
775	39	1,43	0,25	-0,32	0,62
776	39	3,16	0,13	-0,48	0,64
777	38	7,68	0,06	-0,9	0,56
778	39	12,18	0,05	0,05	0,88
1348	31	0,72	0,15	0,23	0,4
1350	31	1,31	0,11	-0,49	0,27
1351	31	1,52	0,1	-0,37	0,36
1352	31	1,65	0,08	-1,07	0,27
1353	31	1,18	0,11	0,24	0,41

На основе полученных результатов расчета основных статистических характеристик колебаний УГВ выделен ряд гидрогеологических скважин, имеющих значительные коэффициенты вариаций ($>0,25$). Большие значения коэффициента вариации свидетельствуют о значительной изменчивости УГВ территории расположения скважин. Это зачастую связано с непосредственной гидрогеологической связью грунтовых вод с близлежащими водоемами. Так, скважины № 646, 649, 650, 651 расположены на болотном массиве в урочище Березовик. Непосредственно в пойме р. Тисовка находятся скважины № 647, 648. В пойме р. Пчелка находятся скважины № 664, 665, 666 со среднегодовым значением УГВ в пределах 0,8...2,0 м.

Используя вышеизложенную методику, нами выполнена оценка изменений среднегодовых значений и дисперсий УГВ для двух периодов (период III и V) по формулам (5) – (10). Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

Основные статистические параметры временных рядов УГВ

№ скважины	Критерий Фишера, $F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$	Критическое значение критерия, $F_{(\alpha)m1, m2}$	Гипотеза статистической значимости отличий по дисперсии (подтверждается – 1)	Критерий Стьюдента, t	Критическое значение критерия, $t_{\alpha, m}$	Гипотеза статистической значимости отличий по математическому ожиданию (подтверждается – 1)
517	0,969	0,448	0	-1,572	1,694	0
518	1,708	2,400	0	0,271	1,692	0
519	2,713	2,340	1	-5,377	1,694	1
520	1,865	2,400	0	3,433	1,692	1
522	2,122	2,400	0	2,358	1,692	1
562	0,867	0,443	0	-6,848	1,699	1
563	0,210	0,433	1	-6,024	1,694	1
564	1,539	2,340	0	-3,159	1,691	1

Темным фоном выделены статистически значимые изменения исследуемых параметров

Дисперсии на большинстве скважин для двух периодов (III и V) не изменились, что свидетельствует о неизменности влияния локальных факторов на формирование режима УГВ. В свою очередь, средние значения УГВ за данные периоды для большинства гидрогеологических скважин имеют статистически значимые изменения. Это подтверждает объективность выделения характерных периодов (рис. 2).

Для выявления трансформаций внутригодового распределения колебаний УГВ выполнен анализ тенденций его изменений за выделенный период (V) с использованием уравнения (13), результаты которого представлены на спектрограмме (рис. 3). На спектрограмме по вертикали расположены скважины, для которых за отдельные месяцы (по горизонтали), в зависимости от цветовой шкалы, приведены значения линейного тренда. На рисунке 3 отчетливо видны месяцы со значительными отклонениями тренда УГВ. Так, можно выделить периоды *сентябрь – ноябрь* и *апрель – июнь*, для которых на большинстве скважин значение линейного тренда в наибольшей мере отличается от фонового.

Для остальных месяцев наблюдается сходный (фоновый) положительный тренд УГВ величиной 6 см/год. Гидрогеологические скважины, коренным образом отличающиеся тенденцией изменения месячных значений УГВ от фонового тренда, приведены в таблице 3, а их географическое расположение на территории парка – на рисунке 4.

Анализ местоположения данных скважин показал, что формирование отрицательного тренда (уменьшение УГВ) для скважин № 655, 707, 708 связано с влиянием на него крупного водохранилища Лядское на р. Соломенка. В результате затопления ложа водохранилища произошло подтопление прилегающей территории. Это влияние (подтопление) заключается в уменьшении уклона свободной поверхности зеркала грунтовых вод в направлении их разгрузки, что, в свою очередь, приводит к уменьшению скорости движения подземных вод.

Скважины №771 и №774, имеющие близкие значения линейного тренда по модулю ($\approx 0,08$ м/год), но отличающиеся по направлению, расположены в непосредственной близости от существующих мелиоративных систем. Разнонаправленность тренда может объясняться тем, что определенные сегменты мелиоративной сети не соответствуют техническим требованиям и приводят к неуправляемым процессам.

Тенденции, наблюдающиеся по другим скважинам (табл. 2), связаны с особенностями геологического строения территории.

Оценка цикличности в колебаниях среднегодовых УГВ выполнена на основе вышеописанной методики СВАН за период непрерывных инструментальных наблюдений. Анализ осуществлялся для гидрогеологичес-

ких скважин, приведенных в таблице 3. Результаты представлены на рисунке 5.

Таблица 3

*Показатели сезонного линейного тренда
по гидрогеологическим скважинам, см/год*

Месяцы	Номера скважин										
	632	633	655	659	707	708	710	711	712	771	774
январь	4	10	3	11	7	10	9	7	6	3	-9
февраль	4	8	-11	11	-32	-47	8	4	7	3	-7
март	4	5	-10	11	-32	-47	8	6	7	2	-7
апрель	3	2	-9	12	-32	-46	8	6	7	24	-8
май	19	2	-10	11	-33	-46	8	7	7	25	-8
июнь	4	3	4	11	-32	-46	8	8	8	25	-8
июль	4	7	3	11	-33	-46	9	8	8	1	-10
август	3	6	2	10	-33	-47	8	7	8	1	-10
сентябрь	3	6	1	9	-33	-48	8	7	7	1	-9
октябрь	4	9	-12	10	-68	-48	8	8	8	2	-9
ноябрь	15	8	-4	10	-69	39	8	7	7	2	-9
декабрь	3	7	-11	9	-34	9	8	7	7	2	-8

На основе полученных результатов СВАН (рисунок 5) для гидрогеологической скважины №774 можно выделить интервал с 1971 и до 1981 гг., на протяжении которого наблюдались колебания УГВ с периодом в 5 лет и амплитудой 0,28 м. В течение нескольких лет значимых колебаний не было, но с 1987 года они возобновляются с тем же периодом. Амплитуда с этого момента времени постепенно возрастает. Для скважины №771, исходя из диаграммы, прослеживается одиннадцатилетний цикл с амплитудой 0,3 м до 1984 года. Восстановление цикла начинается с 1991 года, но уже с меньшей амплитудой. В свою очередь, для скважин №712 и №707 на всем протяжении исследуемого периода наблюдается цикл с периодом колебаний 8 и 9 лет, амплитудой 0,25 м и 0,3 м соответственно.

Скважины №710 и №711 имеют практически одинаковые результаты анализа. Для них характерна цикличность с периодом 10 лет и амплитудой 0,38 м, наблюдающаяся до 1987 года. Восстановление цикла прослеживается с 1991 года, но с меньшей амплитудой колебаний (0,25 м).

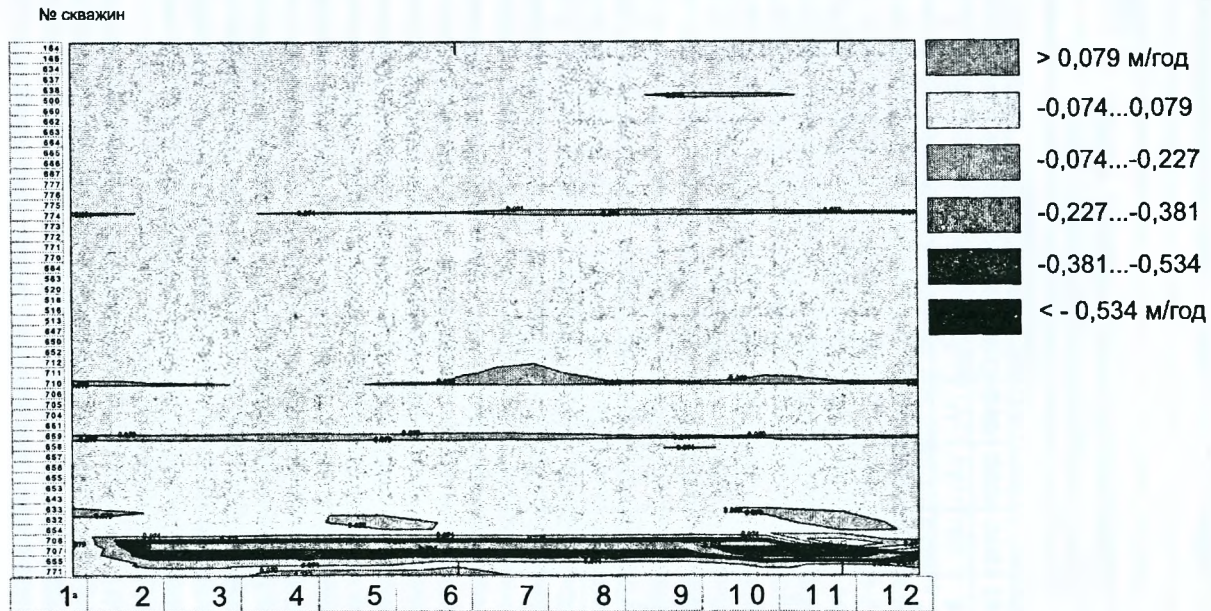


Рисунок 3. Спектрограмма тенденций изменений уровней грунтовых вод по месяцам

7 0 7 14 километры

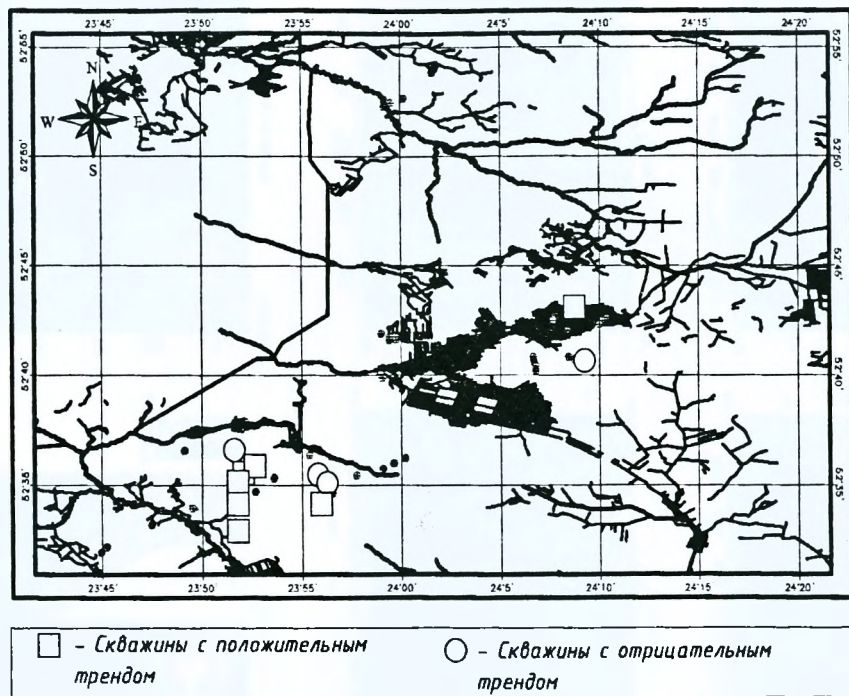
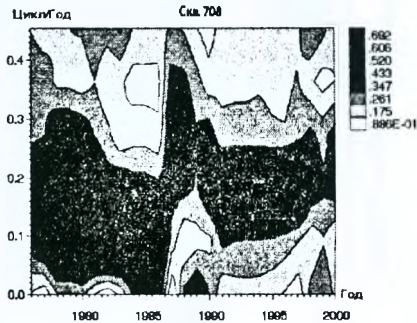
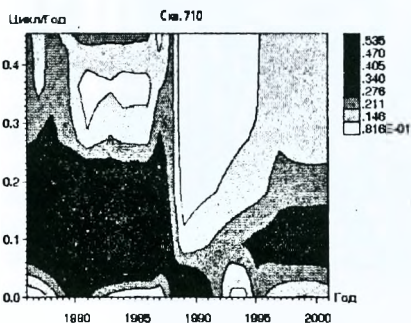
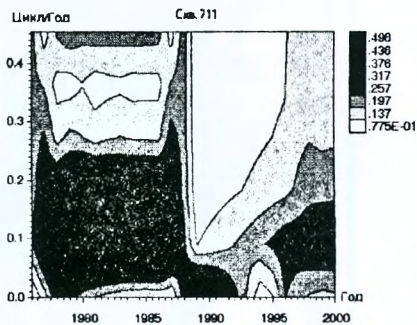
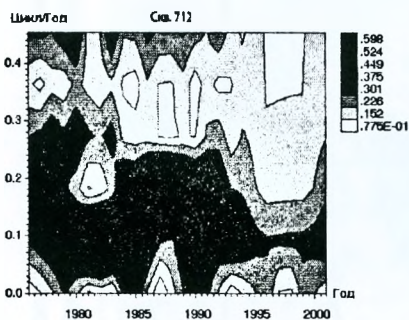
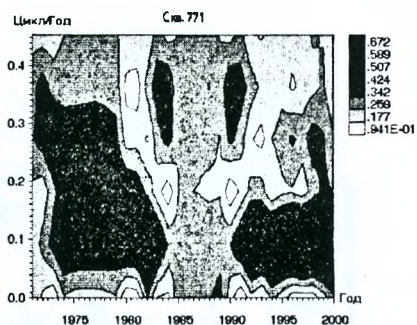
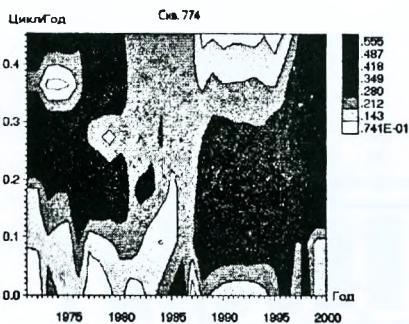


Рисунок 4. Схема расположения выделенных гидрогеологических скважин (в географических координатах, 34–35 зона)



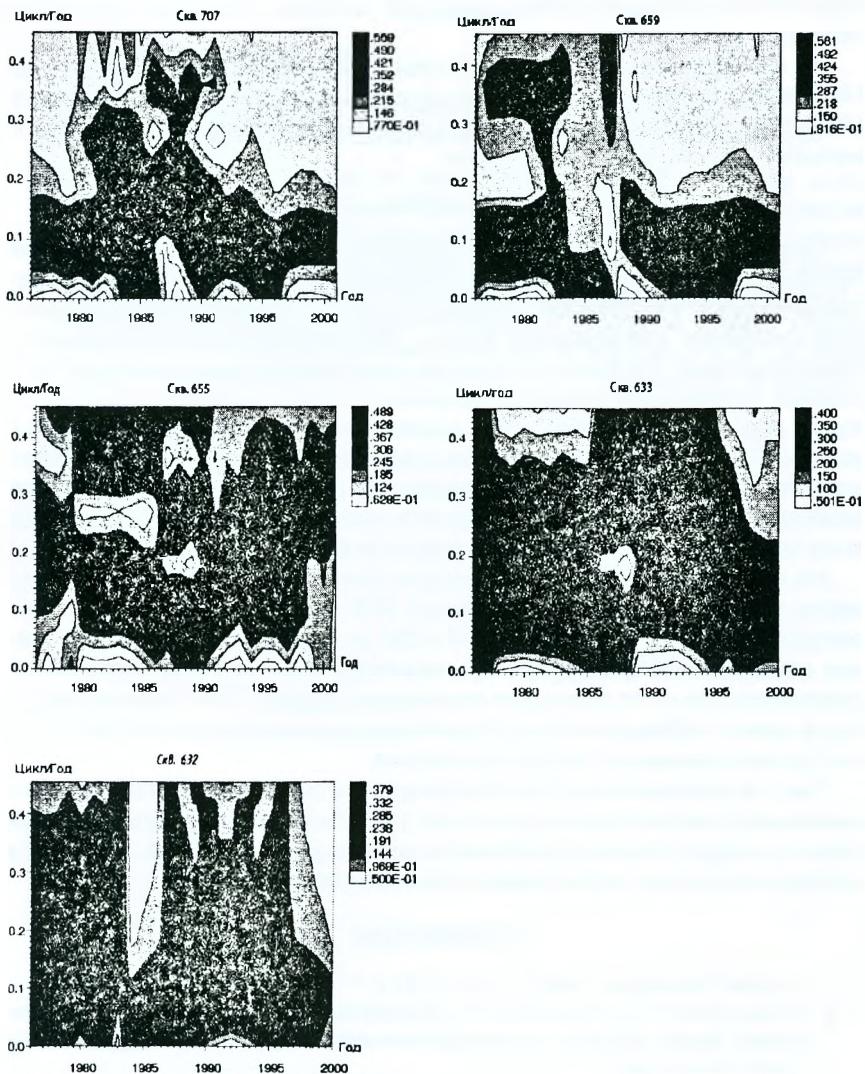


Рисунок 5. СВАН-диаграммы среднегодовых значений УГВ по гидрогеологическим скважинам

Аналогичная ситуация наблюдается для скважины №708, но с меньшим периодом колебаний (5 лет).

На СВАН-диаграмме для скважины №659 выявлены колебания до 1984 года с параметрами: период 11 лет и амплитуда 0,4 м. В течение 1984–1989 годов они исчезают, но в дальнейшем возобновляются уже с меньшей амплитудой, равной 0,3 м.

Выводы

Проведенный анализ колебаний уровня режима грунтовых вод за период инструментальных наблюдений свидетельствует о наличии характерных периодов в динамике среднегодовых УГВ природно-территориального комплекса «Беловежская пуца», обусловленных как естественно-климатическими, так и антропогенными изменениями гидрогеологического режима. Наибольший интерес представляет период стабилизации (с 1992 года и по настоящее время). При анализе выявлена общая тенденция к увеличению годовых и внутригодовых значений УГВ на 6 см/год. Наличие скважин, выпадающих из общей тенденции изменения УГВ, объясняется влиянием на формирование уровня режима как геологического строения территории, так и крупных водохранилищ.

На основе СВАН выявлено, что для исследуемой территории характерны естественные циклы колебаний УГВ с периодом 9–10 лет и амплитудой 0,3 м. На протяжении 1987–1991 гг. прослеживалось исчезновение естественных циклов, что объясняется интенсивной антропогенной деятельностью в тот период на территории пуцы. С 1991 года по настоящее время наблюдается восстановление циклических колебаний УГВ, но с уменьшением амплитуды колебаний.

Так, на современном этапе наблюдается тенденция к стабилизации изменений среднегодовых значений УГВ. Любое вмешательство, связанное с искусственным понижением либо повышением УГВ, приведет к повторному выходу экосистемы из равновесного положения.

Литература

1. Климат Беларуси. – Мн., 1996. – 234 с.
2. Кобышева Н.В., Наумова Л.П., Михайлова В.Н. Трендовые составляющие рядов основных метеорологических величин. – Труды ГГО. – 1981. – Вып. 460.

Summary**A.A. Volchek, N.N. Sheshko****THE FLUCTUATIONS OF GROUNDWATER LEVEL REGIME
NATURAL-TERRITORIAL COMPLEX "BELOVEZHSKAYA PUSHCHA"**

Analysis of the fluctuations of groundwater level regime for the period of instrumental observations indicates the presence of characteristic periods in the dynamics of average annual GWL natural-territorial complex "Belovezhskaya Pushcha". These fluctuations are caused by natural climatic and anthropogenic changes of a hydrogeological regime. A general trend of increasing annual and intraannual values at 6 cm/year is defined. Through STAN, is determined that the investigated area is characterized by the natural cycles of GWL fluctuations with a period of 9–10 years and an amplitude of 0.3 m.