

А.А. Волчек, И.И. Курвель, П.И. Курвель

КОЛЕБАНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА ОЗЕР БЕЛАРУСИ В СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

A.A. Volchek, I.I. Kirvel, P.I. Kirvel

VARIATIONS (OSCILLATIONS) OF LAKES WATER BALANCE OF BELARUS IN THE CURRENT CLIMATE CONDITIONS

Проанализированы материалы наблюдений за уровнями воды на 9 озерах Беларуси и за испарением с водной поверхности по 5 метеостанциям за многолетний период. Изложены результаты исследования моделирования временных рядов испарения с поверхности водоемов и уровней воды озер Беларуси с помощью простой и сложной цепей Маркова, построены прогнозные модели, отражающие закономерности колебаний исследуемых параметров.

Ключевые слова: уровень, испарение, модель, вода, баланс, колебания, озера, водоемы.

Materials of observations of water level in 9 Belorussian lakes and of evaporation from water surface according to 5 weather stations were analyzed. Results of modeling of evaporation from water surface and water level time series with the help of simple and complex Markov's model are given. Prognosis models of regularity of studied parameters were developed.

Key words: level, evaporation, model, water, balance, variation (oscillation), lakes, water bodies.

Введение

Озера являются уникальными водными объектами и имеют важное экономическое и экологическое значение. В Беларуси насчитывается более 10 тыс. озер, с общей площадью водного зеркала около 2000 км² и объем воды 6–7 км³. Они служат накопителями чистой пресной воды, а также выполняют функцию регулирования поверхностных и подземных вод. В связи с тем, что водообмен в озерах замедлен, они более уязвимы, чем реки и могут служить чувствительным индикатором изменений большинства климатических факторов. В последнее время климатические факторы и антропогенные воздействия вызвали трансформацию гидрологического режима озер Беларуси и в ряде случаев существенную. Поэтому появилась необходимость экологического прогноза в условиях изменяющегося климата и антропогенных воздействий на водные объекты, которая ставит перед исследователями ряд конкретных задач по изучению эволюции озерных экосистем, разработке имитационных и прогностических моделей [3].

Целью настоящей работы является анализ временных рядов уровней воды и испарения с водной поверхности озер Беларуси для выявления закономерностей в их колебаниях, количественной оценки трансформации гидрологического режима озерных экосистем.

Исходные материалы и методы исследования

Материалом для исследования послужили данные многолетних инструментальных наблюдений за уровнем воды Гидрометеослужбой на 9 крупнейших озер Беларуси, имеющих большое народнохозяйственное и природоохранное значение, расположенные в Белорусской Позерской и Полесской провинциях. Характеристики озер представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Основные географические и морфометрические характеристики
исследованных репрезентативных озер**

Озера	Площадь зеркала, км ²	Объем озера, млн м ³	Максимальная глубина, м	Средняя глубина, м	Показатель открытости	Показатель глубинности	Коэффициент емкости	Коэффициент удлиненности	Удельный водосбор
Сенно	3,13	26,83	31,5	8,6	0,36	5,90	0,27	3,22	21,69
Лукомское	37,71	249,00	11,5	6,6	5,71	2,11	0,57	2,97	4,75
Нешердо	24,62	84,72	8,1	3,4	7,24	1,18	0,42	5,91	5,81
Освейское	52,80	104,00	7,5	2,0	26,40	0,54	0,27	3,56	3,90
Дривяты	36,14	223,52	12,0	6,1	5,92	1,87	0,51	2,76	11,70
Мястро	13,10	70,10	11,3	5,4	2,43	2,31	0,48	2,60	9,16
Нарочь	79,62	710,00	24,8	8,9	8,95	2,10	0,36	2,06	2,50
Выгонощанское	26,00	32,10	2,3	1,2	21,67	0,41	0,52	1,89	2,35
Червоное	40,82	27,35	2,9	0,7	58,31	0,21	0,24	3,33	4,59

В настоящее время в Беларуси наблюдения за испарением с водной поверхности ведутся на пяти метеостанциях: Василевичи, Полесская, Полоцк, Нарочь и Минск.

Для стационарных процессов практический интерес представляет выявление закономерностей в динамике формирования исследуемого процесса: плавного возрастания или убывания (монотонный тренд), периодических изменений (циклический тренд), постоянства в течение каких-то периодов времени и резкого изменения при переходе от одного отрезка к другому (ступенчатый тренд). Когда тренд явно не выражен, необходимо рассматривать совместно выборочные автокорреляционную (АКФ) и частную автокорреляционную (ЧАКФ) функции данного процесса, с помощью которых определяются характер изменения годового стока рек. При этом используются критерии оценки степени нестационарности процесса и выбора модели приведенные в [4].

Оценка различий в статистических параметрах осуществлялась с помощью критериев Стьюдента и Фишера. Исследование цикличности осуществлялось посредством АКФ и ЧАКФ. Проведение более тонких исследований амплитудно-частотных характеристик процесса потребовало применения спектрально-временного анализа (СВАН). Длина окна выбиралась исходя из требований получения данных о гармониках в наиболее широком частотном диапазоне. В нашем случае величина временного окна принята 11 лет.

Анализ результатов исследований

Анализ среднегодовых уровней воды озер Беларуси свидетельствует о наличии в многолетнем ходе этих значений статистически значимых на 95 %-ном уровне трендов. На рис. 1 приведен хронологический ход, а также линейные и полиномиальные второй степени тренд уровней воды рассматриваемых озер Беларуси. Динамика уровней воды в озерах Беларуси носит сложный и неоднозначный характер. Имеет место глобальный (Освейское, Лукомское, Дривяты, Вилейское, Выгонощанское) и локальный (Сенно) рост уровней воды, на ряде озер наблюдается и снижение уровня воды (Червоное) и достаточно стабильный уровень воды (Нарочь). При этом скорости этих процессов существенно разнятся по территории (табл. 2). В табл. 3 представлены выборочные оценки основных статистических параметров временных рядов испарения с водной поверхности за период инструментальных наблюдений Беларуси, за период с мая по октябрь.

Таблица 2

Параметры линейных трендов изменения уровней воды озер Беларуси

Озеро	Период	Коэффициенты	
		Скорость изменения, см/ 10 лет	Корреляции
Сенно	1949–2005	–4,8	–0,39
Лукомское	1975–2005	8,4	0,36
Нешердо	1949–2005	9,7	0,67
Освейское	1951–2005	15,9	0,81
Дривяты	1957–2005	8,1	0,53
Мястро	1962–2005	0,85	0,12
Нарочь	1945–2005	–0,15	0,00
Выгонощанское	1965–2005	3,7	0,32
Червоное	1958–2005	–4,2	–0,24

Примечание. Выделены статистически значимые различия между величинами.

Таблица 3

Основные статистические характеристики испарения с водной поверхности на территории Беларуси за период с мая по октябрь

Метеостанции	Расчетный период	Величина испарения, мм	Коэффициенты		
			вариации (Cv)	асимметрии (Cs)	автокорреляции (r 1)
Василевичи	1952–2005	502	0,15	0,42	0,12
Минск	1952–2005	428	0,17	0,61	0,44
Нарочь	1962–2005	407	0,15	0,36	0,43
Полесская	1972–2005	471	0,15	0,33	0,40
Полоцк	1958–2005	394	0,13	1,00	0,15

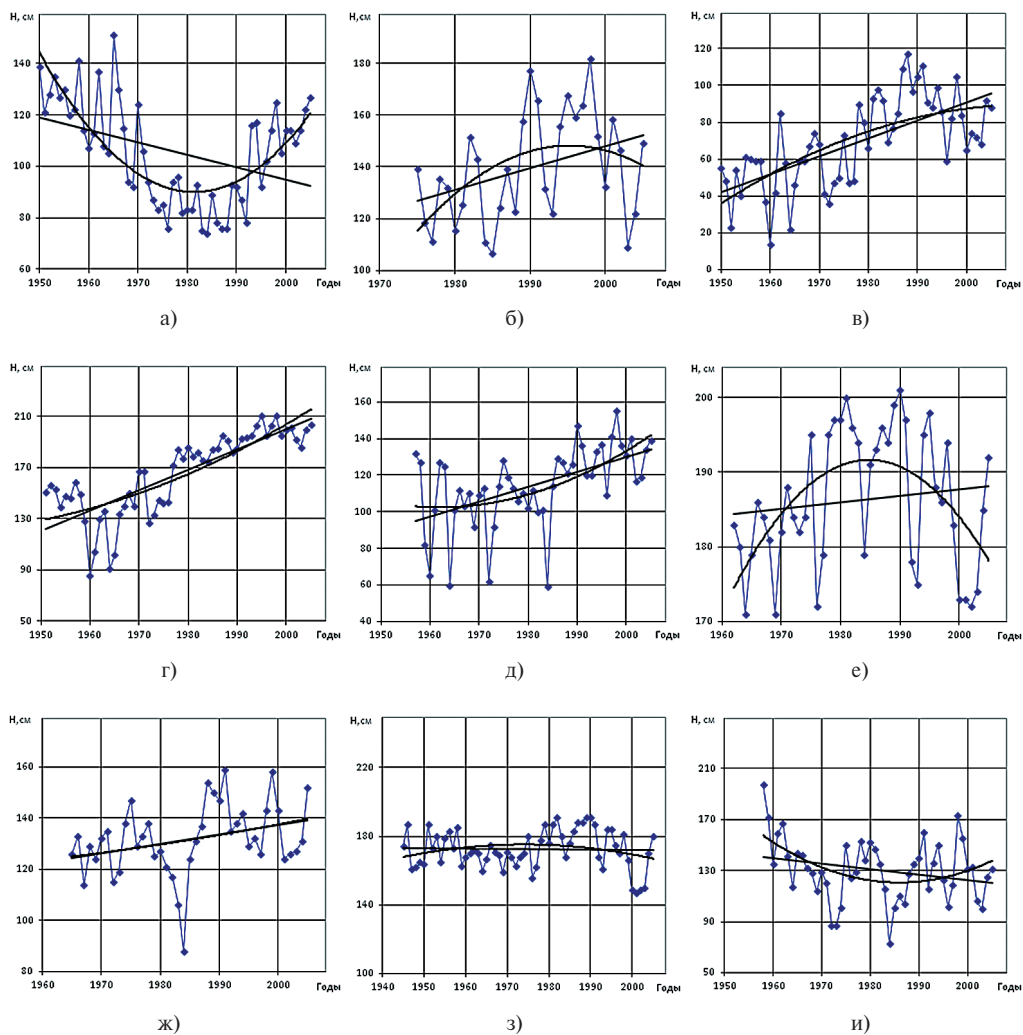


Рис. 1. Хронологический ход среднегодовых уровней воды озер Беларуси:
а — Сенно; *б* — Лукомское; *в* — Нещердо; *г* — Освейское; *д* — Дривяты; *е* — Мястро;
ж — Нарочь; *з* — Выгоношанское; *и* — Червоное

На рис. 2 приведен хронологический ход и линейный тренд величин испарения с водной поверхности за период (май—октябрь) по метеостанциям Беларуси. Как видно из рисунка величина испарения с водной поверхности как правило убывает, но скорости убывания разнятся по территории. Исключение составляет метеостанция Полеская, где наблюдается статистически значимый рост испарения с водной поверхности (табл. 4). Это связано с особенностями ветровой структуры сформировавшийся на территории Беларуси в современных условиях [6].

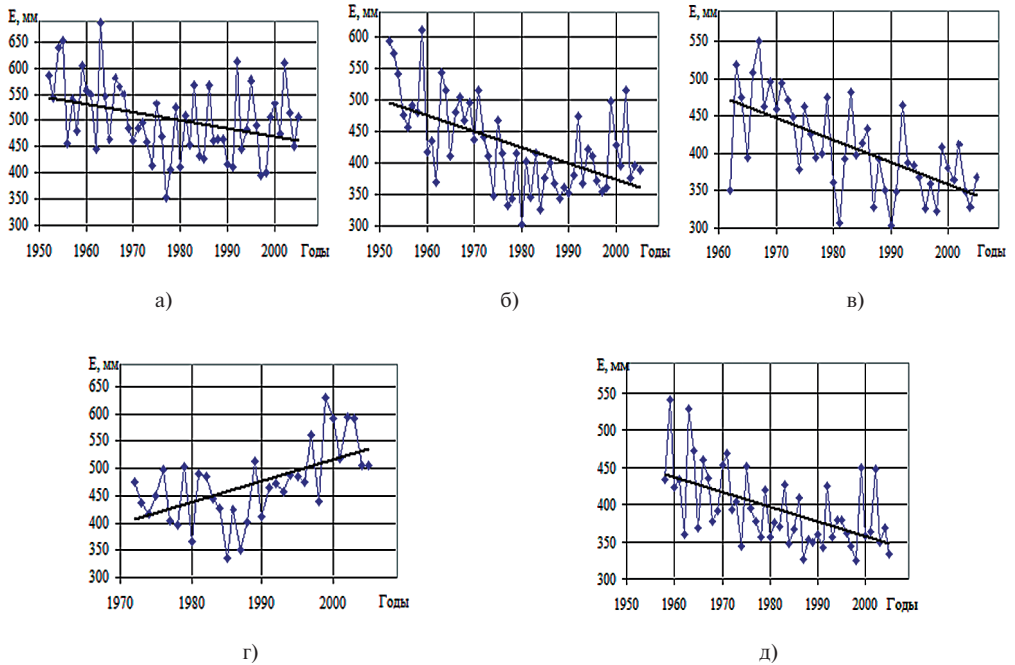


Рис. 2. Хронологический ход испарения с водной поверхности за май—октябрь по метеостанциям: а — Василевичи; б — Минск; в — Нарочь; г — Полесская; д — Полоцк

Таблица 4

Градиенты (α , мм/10 лет) изменения испарения с водной поверхности и коэффициенты корреляции линейных трендов (r) по метеостанциям Беларуси

Период осреднения	Метеостанции									
	Василевичи		Минск		Шарковщина		Нарочь		Полоцк	
	α	r	α	r	α	r	α	r	α	r
май	-3,348	-0,31	-1,094	-0,11	-5,084	-0,31	-0,741	-0,05	-2,443	-0,23
июнь	-6,559	-0,40	-8,575	-0,59	-7,266	-0,40	-11,99	-0,62	-8,113	-0,57
июль	-6,741	-0,38	-9,617	-0,52	-0,695	-0,03	-9,552	-0,50	-5,345	-0,40
август	-1,913	-0,13	-5,101	-0,40	-2,581	-0,14	-6,084	-0,37	-3,033	-0,30
сентябрь	-2,515	-0,29	-4,460	-0,53	-5,271	-0,34	-4,212	-0,44	-2,321	-0,39
октябрь	-0,369	-0,10	-2,003	-0,49	-0,596	-0,12	0,190	0,05	-1,318	-0,40
май—октябрь	-21,45	-0,42	-30,85	-0,61	-21,49	-0,33	-32,39	-0,61	-22,57	-0,57

Примечание. Выделены статистически незначимые коэффициенты корреляции.

Изменения интенсивности испарения с водной поверхности вызваны главным образом изменениями скорости ветра и в меньшей степени притоком суммарной солнечной радиации.

Сравнительный анализ изменения испарения с водной поверхности на территории Беларуси показал, что произошли заметные изменения. В целом величина испарения с водной поверхности увеличилась и в большей степени эти изменения коснулись северной части Беларуси. Кроме того, увеличилась пространственная неоднородность испарения с водной поверхности. О наличии существенных изменений в пространственной и временной структуре испарения с водной поверхности подтверждаются и материалами наблюдений на испарительных бассейнах.

Характер поведения факторов определяющих испарение с водной поверхности детально рассмотрен нами в работах [2, 5].

Анализ однородности временных рядов

Рассмотрим устойчивость выборочных статистик (средних, коэффициентов вариации, коэффициентов автокорреляции) при изменении периодов осреднения применительно к среднегодовым уровням воды и испарения с водной поверхности озер Беларуси за период инструментальных наблюдений. При этом исследуемый временной ряд разбивался на два интервала: с начала наблюдений по 1985 г. включительно и с 1986 г. (начало роста среднегодовых температур воздуха) по 2005 г. Для оценки различий в статистических параметрах использованы критерии Стьюдента (оценка выборочных средних) и Фишера (оценка выборочных дисперсий). В табл. 5 приведены основные статистические параметры для этих интервалов, а также результаты статистической проверки на однородность [1]. Выборочные оценки статистических параметров временных рядов среднегодовых уровней воды озер Беларуси за период инструментальных наблюдений опубликованы нами в работе [2]. Статистически значимые различия установлены для озер Лукомское, Нещердо, Освейское, Дривяты, Вилейское и Выгонощанское, статистически значимые коэффициенты вариации выявлены только для двух озер: Освейское и Дривяты. Что касается коэффициентов автокорреляции, то статистически значимые различия наблюдаются только для озера Нарочь. Это обусловлено как естественно-климатическими, так и антропогенными изменениями гидрологического цикла.

Таблица 5

Основные статистические параметры испарения с водной поверхности на территории Беларуси за период с мая по октябрь

Метеостанции	Расчетные периоды, годы	Величина испарения, мм	Коэффициенты	
			вариации	автокорреляции
Василевичи	1952–1985 / 1986–2005	509/489	0,15/0,13	0,19/–0,03
Минск	1952–1985 / 1986–2005	446/398	0,18/0,12	0,46/0,02
Нарочь	1962–1985 / 1986–2005	438/369	0,14/0,11	0,21/–0,07
Полесская	1972–1985 / 1986–2005	438/494	0,12/0,15	–0,27/0,43
Полоцк	1958–1985 / 1986–2005	412/369	0,13/0,10	0,06/–0,32

Примечание. Выделены статистически значимые различия между величинами.

Стационарность процесса многолетних уровней воды озер имеет место для отдельных озер. При анализе закономерностей многолетних колебаний уровней воды озер использование методов теории случайных процессов должно сочетаться с анализом генезиса рассматриваемого процесса и определяющих его природно-хозяйственных факторов, прежде всего климатических (табл. 6).

Таблица 6

**Основные статистические параметры уровней воды озер Беларуси
для различных периодов осреднения**

Озеро	Период	Средние уровни, см	Коэффициенты		
			вариации	асимметрии	автокорреляции
Сенно	1949–1985	108	0,20	0,14	0,72
	1986–2005	103	0,17	–0,33	0,67
	1949–2005	106	0,19	0,13	0,71
Лукомское	1975–1985	126	0,12	0,27	0,18
	1986–2005	147	0,14	–0,14	0,38
	1975–2005	140	0,15	0,21	0,50
Нещердо	1949–1985	58	0,35	0,05	0,49
	1986–2005	89	0,18	–0,09	0,48
	1949–2005	69	0,35	–0,09	0,69
Освейское	1951–1985	148	0,18	–0,57	0,76
	1986–2005	196	0,04	0,15	0,41
	1951–2005	165	0,19	–0,64	0,88
Дривяты	1957–1985	103	0,20	–0,97	0,08
	1986–2005	131	0,09	0,11	0,08
	1957–2005	114	0,19	–0,91	0,45
Мястро	1962–1985	185	0,05	0,03	0,45
	1986–2005	187	0,05	–0,37	0,62
	1962–2005	186	0,05	–0,13	0,55
Нарочь	1945–1985	172	0,05	0,34	0,21
	1986–2005	173	0,09	–0,60	0,74
	1945–2005	173	0,06	–0,26	0,52
Выгоношанское	1965–1985	125	0,10	–1,11	0,39
	1986–2005	139	0,08	0,38	0,37
	1965–2005	132	0,10	–0,45	0,55
Червоное	1958–1985	132	0,21	–0,04	0,62
	1986–2005	129	0,16	0,48	0,31
	1958–2005	131	0,18	0,13	0,53

Примечание. Выделены статистически значимые различия между величинами.

В результате анализа выборочных средних величин испарения с водной поверхности, коэффициентов вариации и автокорреляции по метеостанциям Беларуси статистически значимые различия установлены практически по всем месяцам и метеостанциям, что свидетельствует об изменении климатических условий за последние 15–20 лет.

Анализ цикличности временных рядов

Параллельно с концепцией случайности многолетних колебаний уровне воды озер необходимо рассматривать концепцию цикличности. Сложность в использовании циклов для прогноза уровня режима озер заключается в их аперIODичности, так как фаза, амплитуда и длительность цикла меняются без видимых закономерностей. Кроме того, пока нет единого мнения о природе этих циклов: отсутствует объективная методика выделения и анализа циклов уровней воды озер. Считается, что циклы обусловлены либо влиянием внешних (космофизических факторов), либо автоколебательными процессами в системе атмосфера-гидросфера Земли, либо естественными свойствами любой случайной последовательности.

Как было показано в работе [2], по характеру изменения АКФ среднегодовых уровней воды озер Беларуси их можно разделить на две группы. Для первой группы озер (Лукомское, Дривяты, Мястро, Нарочь, Выгонощанское, Червоное) характерно наличие статистически значимых значений коэффициентов корреляции при $\tau = 1$, тогда как все остальные значения их ординат статистически незначимы за редким исключением. Для другой группы озер (Сенно, Нещердо, Освейское) характерно наличие статистически значимых коэффициентов корреляции, величины которых постепенно убывают с увеличением сдвижки во времени.

Для временных рядов испарения с водной поверхности озер Беларуси АКФ и ЧАКФ имеют сложный характер. Для всех метеостанций характерен явно выраженная статистически выраженная корреляция при сдвиге $\tau = 3$ и $\tau = 1$, тогда как все остальные значения их ординат статистически незначимы и характеризуются как правило положительными значениями [5].

Анализ СВАН-диаграмм временных рядов среднегодовых уровней воды озер Беларуси показал преобладание в этих рядах 4 и 11-летних циклов, хотя и имеют место 5 и 6 летние циклы [5], а в рядах испарения с водной поверхности по метеостанции Василевичи [5] для периода осреднения май–октябрь преобладающим является 6-летний цикл (1959–1985 гг.), возможно выделение еще двух циклов 3 (1985–1993 гг.) и 12 (1959–1985 гг.).

Построение прогнозных моделей

При совместном рассмотрении АКФ и ЧАКФ данного процесса, с помощью которых определяется характер изменения среднегодовых уровней воды, использовались критерии оценки степени нестационарности процесса и выбор модели осуществлялся с учетом рекомендаций приведенных в [4].

АКФ экспоненциально затухает, а ЧАКФ имеют значительную величину при $\tau = 1$, тогда как все остальные значения их ординат статистически незначимы и

характеризуются чередованием положительных и отрицательных значений. Следовательно, рассматриваемый процесс колебаний уровней воды озер может быть идентифицирован авторегрессионной моделью.

Результаты проведенных исследований закономерностей многолетних колебаний среднегодовых уровней воды озер Беларуси позволяют считать установленным наличием определенной связи уровней смежных лет. Это служит основанием для описания среднегодовых уровней воды озера в виде простой цепи Маркова. Нами предпринята попытка описать колебания уровней воды озер помощью сложной модели Маркова со сдвигом до 11 лет. 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 регрессионно-корреляционного анализа представлены в [2]. В качестве примера приведена модель колебания уровня воды оз. Освейское:

$$H(t+1) = 19,5 + 0,831 \cdot H(t) - 0,369 \cdot H(t-1) + 0,441 \cdot H(t-2), R = 0,93.$$

Аналогичные модели получены и для испарения с водной поверхности [1]. Полученные модели отражают закономерности колебаний уровней воды озер и испарения с водной поверхности озер Беларуси могут использоваться для краткосрочного прогноза.

Заключение

Анализ временных рядов уровней воды и испарения с водной поверхности озер Беларуси за период инструментальных наблюдений выявил наличие статистически значимых изменений в динамике среднегодовых величин для отдельных озер Беларуси, обусловленных как естественно-климатическими, так и антропогенными изменениями гидрологического цикла. Происходящие процессы разнятся как по территории, так и по направленности и скорости самих процессов. Межгодовые изменения в колебаниях уровней воды озер и испарения с водной поверхности вызваны главным образом изменениями скорости ветра и в меньшей степени притоком суммарной солнечной радиации.

При анализе закономерностей многолетних колебаний рассматриваемых характеристик использование методов теории случайных процессов должно сочетаться с анализом генезиса изучаемого процесса и определяющих его природно-хозяйственных факторов, прежде всего климатических. Показана возможность построения прогнозных моделей с заблаговременностью в один год.

Поставленная проблема требует всесторонних дальнейших исследований, так как изменение уровня режима озер и испарения с водной поверхности потребует пересмотра нормативов при проектировании водохозяйственных объектов и разработки компенсационных мероприятий. Вся сложность построения прогнозных моделей заключается в их индивидуальности, наличия большого объема исходной информации и невозможности оперативной оценки полученных результатов.

Литература

1. *Волчек А.А., Кирвель П.И.* Прогнозирование колебаний испарения с водной поверхности водоемов Беларуси. // Вестн. БГУ. Сер. 2, 2008, №2, с. 86–93.
2. *Волчек А.А.* Пространственно-временные колебания уровней воды озер Беларуси в условиях изменяющегося климата. // Вестник БГТУ. Водохозяйственное строительство и теплотехника, 2008, № 2(50), с. 27–37.
3. *Догановский А.М.* Закономерности колебаний уровней озер и их влияние на основные элементы режима водоемов. // Труды 5 Всесоюзного гидрологического съезда, т. 8. — Л., 1990. — 65 с.
4. *Исмайылов Г.Х., Федоров В.М.* Анализ многолетних колебаний годового стока Волги. // Вод. ресурсы, 2001, т. 28, № 5, с. 517–525.
5. *Логинов В.Ф., Волчек А.А.* Изменение испарения с водной поверхности на территории Белоруссии. // География и природные ресурсы, 2005, № 2, с. 137–144.
6. *Volchak A., Kirvel I.* A Lake water level variations in Belarus. // Limnological Review (2013) 13, 2, p. 115–126.