

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

9. *Определение стока расчетной обеспеченности исходной реки по рекам-аналогам методом линейной интерполяции.* Рассчитывается сток рек-аналогов для заданной расчетной обеспеченности, и вносятся поправки на асинхронность с помощью ФПА, полученных в блоке 5. Затем методами линейной интерполяции по рекам-аналогам определяется сток заданной расчетной обеспеченности исследуемой реки.

10. *Анализ полученных результатов.* Полученные значения стока заданной расчетной обеспеченности исследуемой реки двумя методами сопоставляются между собой. Если расхождение не превышает заданной величины, то расчетный сток заданной обеспеченности принимается как средняя величина из двух полученных величин. В противном случае привлекается метод изолиний и его результат учитывается при принятии окончательного решения.

Предложенная методика и компьютерная программа позволяют в автоматическом режиме рассчитывать расходы воды слабоизученных малых рек с использованием данных отдельных измерений. При этом контролируется подбор рек-аналогов и полученные конечные результаты.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пособие к строительным нормам и правилам. П1-98 к СНиП 2.01.14-83 Определение расчетных гидрологических характеристик. – Минск: РУП «Минсктиппроект», 2000. – 174 с.
2. Волчек А.А., Плужников В.Н. Пространственно-временные колебания элементов водного баланса (на примере Белоруссии)// Водные ресурсы, 1991. - №5. – С. 21 – 29.

*Материал поступил в редакцию 25.11.07*

**VOLCHEK A.A., PARFOMUK S.I., VOLCHEK An.A. Method for definition of runoff calculation characteristics of poorly investigated rivers with use of separate supervision data**

The method of use of individual supervision data is developed at definition of runoff calculation characteristics that based on the automated selection of rivers-analogues and construction of local spatial asynchronous functions. The offered method allows obtaining more authentic calculation data by means of the control intermediate and ending results. The developed method and the automated computer program can be used for calculation of water flows of poorly investigated rivers with use of separate supervision data with high degree of accuracy that is checked up on the plenty of small rivers of Belarus.

УДК 556.048(476)

**Волчек А.А.**

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЕЙ ВОДЫ ОЗЕР БЕЛАРУСИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА**

**ВВЕДЕНИЕ**

Озера являются уникальными водными объектами и имеют важное экономическое и экологическое значение. В Беларуси насчитывается около 10 тыс. озер, площадь водного зеркала которых составляет 2000 км<sup>2</sup> и объем воды 6 – 7 км<sup>3</sup>. 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 являются более уязвимыми по сравнению с реками, могут служить чувствительным индикатором изменений большинства климатических факторов. В последнее время природно-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 количественных, качественных диагностических, имитационных и прогностических моделей.

Существенной трудностью при моделировании гидрологического режима озер во времени является недостаток данных для ретроспективного анализа их эволюции. Кроме того, проблема усугубляется возрастающим антропогенным влиянием на водные экосистемы, сложностью выделения природных и антропогенных составляющих в наблюдаемых процессах. Индивидуальность в формировании водного режима озер требует в каждом конкретном случае отдельного рассмотрения. Однако создание математических моделей, отражающих объективные закономерности развития гидрологических процессов во времени, и построение прогнозов представляет значительный научный и практический интерес и разрабатывается в самых различных направлениях. Одной из главных количественных гидрологических характеристик озера является его уровень, с помощью которого можно выявить и отследить результаты тех или иных воздействий. Кроме того, данные об уровне озер требуются при решении ряда гидрологических и водохозяйственных задач.

Целью настоящей работы является анализ временных рядов уровней воды озер Беларуси для выявления закономерностей в их

колебании, количественной оценки трансформации гидрологического режима озерных экосистем и построении прогнозных моделей.

**ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Материалом для исследования служат данные многолетних инструментальных наблюдений за уровнем воды выполненных Гидрометеослужбой на 9 крупнейших озер Беларуси. Объектами изучения – озера, имеющие большое народнохозяйственное и природоохранное значение, расположенные, согласно природному районированию, в Белорусской Позерской, и Полесской (озеро Червоное) провинциях. Площади зеркала озер от 3,13 (Сенно) до 79,62 км<sup>2</sup> (Нарочь), объем воды 26,83 – 710 млн.м<sup>3</sup> соответственно. Озера относятся к мелководным (максимальная глубина Выгонощанское – 2,3 м, до Нещердо – 8,1 м), среднеглубоким (Лукомльское – 11,5 м, Нарочь – 24,8 м) и глубоководным (Сенно – 31,5 м). Все озера имеют высокую тесноту связи с гидрографической сетью. Площадь водосбора изменяется от 61,1 км<sup>2</sup> (Выгонощанское) до 423 км<sup>2</sup> (Дривяты), величина удельного водосбора от 0,046 (Сенно) до 0,42 (Выгонощанское) при средней величине для озер – 0,2. Все озера характеризуются замедленным водообменом, при этом величина удельной водообменности ( $V_{оз}/W_{прит.}$ ) изменяется от 0,15 (Лукомское) до 1,9 (Сенно), исключительно низкое значение отличает озеро Нарочь – 14,9.

Годовой ход изменения уровня озер типичен для озер умеренной зоны. Многолетняя амплитуда колебания уровня озер для лет различной обеспеченности изменяется от 0,29 см (Мястро) до 0,86 м (Нещердо) при средних величинах 0,67 м. Большая величина амплитуды колебания уровня для озера Освейское (1,07 м) носит антропогенный характер. Морфометрические особенности котловин озер, влияющие на высоту подъема уровня воды – наличие четко выраженной пологой зоны мелководий (литорали), пологих склонов и развитой поймы (исключая озеро Сенно).

Факторы, влияющие на формирование уровня озер, можно условно разделить на две группы. К первой группе относятся глобальные факторы, которые касаются больших террито-

Таблица 1. Критерии нестационарности процесса и выбора модели

АКФ	ЧАКФ	Вид модели
Экспоненциально затухает	Высокое значение лишь при $\tau=1$	(АР(1)) авторегрессия первого порядка
Форма затухания в виде синусоидальной волны или экспоненциально затухает	Высокое значение лишь при $\tau=1$ $\tau=2$	(АР(2)) авторегрессия второго порядка
Высокое значение при $\tau=1$ , остальные значения нулевые	Экспоненциально затухает или осциллирует с изменением знака	(СС(1)) скользящее среднее первого порядка
Высокое значение при $\tau=1$ и $\tau=2$ , остальные значения нулевые	Форма синусоидальной волны или экспоненциально затухает	(СС(2)) скользящее среднее второго порядка
Экспоненциально затухает, начиная с $\tau=1$ (затухание может быть монотонным или осциллирующим)	Экспоненциально затухающие значения ординат либо монотонно осциллируют	(АР СС(1)) авторегрессия и скользящее среднее первого порядка

а ко второй – локальные факторы. Тогда уровень воды в озере можно представить как:

$$H(t) = H_{\phi}(t) \pm \Delta H_{\eta}(t), \tag{1}$$

где  $H(t)$  – уровень воды в озере в расчетном календарном году, см;  $H_{\phi}(t)$  – фоновая составляющая в формировании уровня озера в том же году, см;  $\pm \Delta H_{\eta}(t)$  – вклад в формирование уровня озера локальных факторов, см.

Влияние глобальных факторов на формирование уровня озера, с достаточной для практических расчетов точностью, можно описать с помощью линейных или полиномиальных второй степени трендов:

$$H_{\phi}(t) = H_{\phi}(0) \pm \Delta H \cdot t, \tag{2}$$

$$H_{\phi}(t) = \alpha \cdot t^2 + \beta \cdot t + \gamma, \tag{3}$$

где  $H_{\phi}(0)$  – уровень воды в озере на начало расчетного периода, см;  $\Delta H$  – скорость изменения уровня воды, см/год;  $\alpha, \beta, \gamma$  – эмпирические коэффициенты;  $t$  – календарный год.

Скорость изменения уровня воды в озере определяется как первая производная функции изменения уровня озера. Для уравнения (2) скорость изменения уровня является величиной постоянной и равна коэффициенту регрессии. При описании динамики колебаний уровня воды в озере уравнениями, отличными от линейных, скорость изменения уровня озера является величиной переменной и в нашем случае имеет вид:

$$\Delta H(t) = 2 \cdot \alpha \cdot t \pm \beta. \tag{4}$$

Уравнения (2-3) описывают фоновую составляющую формирования уровня озера, а разность между фактическим уровнем воды и фоновой составит отклонения, которые определяются, в основном, колебаниями погодных условий и изменением локальных факторов.

Динамика локальной составляющей формирования уровня озера может быть представлена в виде аддитивной функции

$$\Delta H_{\eta}(t) = H_{\eta}(t) \pm H_{\eta}(t), \tag{5}$$

где  $H_{\eta}(t)$  – детерминированная функция,  $H_{\eta}(t)$  – случайная составляющая.

Функцию  $H_{\eta}(t)$  часто удается подобрать так, что процесс  $H_{\eta}(t)$  оказывается значительно более простым, чем  $\Delta H_{\eta}(t)$ , и тогда решение задач, связанных с этими процессами, существенно упрощается.

Для стационарных процессов практический интерес представляет выявление закономерностей в динамике формирования уровня воды: 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). Все эти ситуации могут быть описаны полиномиальной аппроксимацией тренда вида [1]:

$$H_u(t) = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i \cdot \phi_i(t), \tag{6}$$

где  $\phi_i(t) \dots \phi_k(t)$  – заданные функции времени;  $a_0 \dots a_k$  – коэффициенты регрессии.

Функции времени могут быть либо линейными, степенными, показательными или логарифмическими при монотонном тренде, либо тригонометрическими при циклическом и кусочно-постоянными – при ступенчатом тренде. Во всех этих случаях параметры  $a_0 \dots a_k$  оцениваются по имеющемуся ряду наблюдений  $H_1 \dots H_n$ .

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 следующие критерии оценки степени нестационарности процесса и выбора модели [1, 4] приведенные в табл. 1.

Вклад случайной составляющей в динамику формирования уровня озера можно определить как:

$$H_{\eta}(P\%) = \bar{H}_{\eta}(\Phi_{P\%} \cdot C_v + 1), \tag{7}$$

где  $\bar{H}_{\eta}$  – среднее значение случайной составляющей уровня водной поверхности, см;  $\Phi_{P\%}$  – число Фостера расчетной обеспеченности  $P\%$ ;  $C_v$  – коэффициент вариации.

Используя стандартные статистические методы, находят значения средней величины случайной составляющей ( $\bar{H}_{\eta}$ ), коэффициенты вариации ( $C_v$ ) и асимметрии ( $C_s$ ). По найденным параметрам строят теоретическую кривую обеспеченности. По таблице случайных чисел путем розыгрыша моделируются значения обеспеченности ( $P_j$ ). Таким образом, имея некоторый ограниченный объем информации, можно получить, при принятом законе распределения, временной ряд уровня воды озера практически неограниченной длины.

При статистическом анализе временных рядов использованы следующие методики:

- для выявления тенденций изменений использовались хронологические месячные графики колебаний и разностные интегральные кривые;
- для оценки различий в статистических параметрах использовались критерий Стьюдента и критерий Фишера:

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{n_x \cdot \hat{\sigma}_x^2 + n_y \cdot \hat{\sigma}_y^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_x \cdot n_y \cdot (n_x + n_y - 2)}{n_x + n_y}}; \tag{8}$$

$$F = \frac{\hat{\sigma}_x^2}{\hat{\sigma}_y^2}, \tag{9}$$

где  $\bar{x}, \bar{y}$  – выборочные средние;  $\hat{\sigma}_x^2$  и  $\hat{\sigma}_y^2$  – выборочные дисперсии;  $n_x$  и  $n_y$  – объемы выборок.

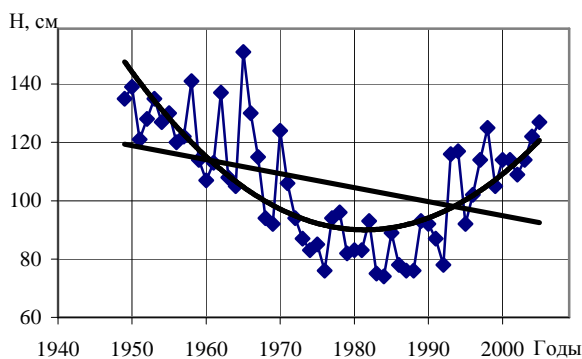
Полученное значение  $t$  критерия Стьюдента и  $F$ -критерия Фишера сравнивалось с их критическими значениями при заданном уровне значимости  $\alpha=5\%$ . Если  $t > t_{\alpha}$ , принимается гипотеза статистического различия двух выборочных средних, а при  $F > F_{\alpha}$  принимается гипотеза статистического различия в колебаниях рассматриваемых рядов.

Для исследования цикличности использованы автокорреляционные функции (АКФ), частные автокорреляционные функции (ЧАКФ). Проведение более тонких исследований амплитудно-частотных характеристик процесса требует применения спектрального анализа. Для обнаружения характерных ритмов, анализа их устойчивости или, наоборот, изменчивости во времени, нами использована процедура спектрально-временного анализа (СВАН), который представляет спектральный анализ в скользящем временном окне. Длина окна выбирается исходя из требований получить данные о гармониках в наиболее широком частотном диапазоне, из требуемой детальности фактического частотного состава процесса. При слишком малом окне теряется информация о низких частотах, а при большом окне СВАН-диаграмма становится слишком зарегулированной. В нашем случае величина временного окна принята 11 лет.

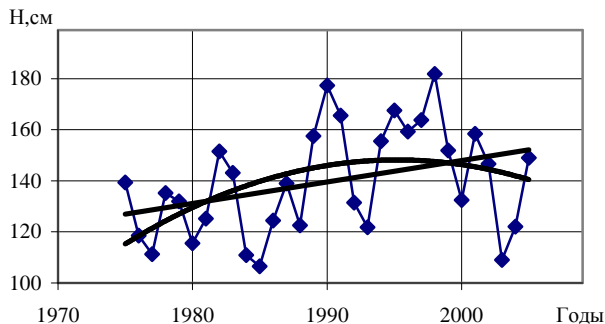
### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Временной ход колебаний уровней воды озер Беларуси отслеживался с помощью хронологических графиков и разностных интегральных кривых. 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. Как видно из рисунка, динамик уровней воды в озерах Беларуси носит сложный и неоднозначный характер. Имеет место глобальный (Освейское, Лукомское, Дривяты, Вилейское, Выгонощанское) и локальный (Сенно) рост урвней воды, на ряде озер наблюдается и снижение уровня воды (Червоное) и достаточно стабильный уровень воды (Нарочь). При этом скорости этих процессов существенно различаются по территории (табл. 2). Это связано с особенностями ветровой структуры сформировавшийся на территории Белаоруси в современных условиях [3, 5].

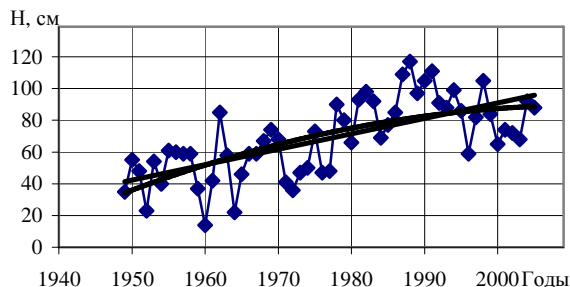
а)



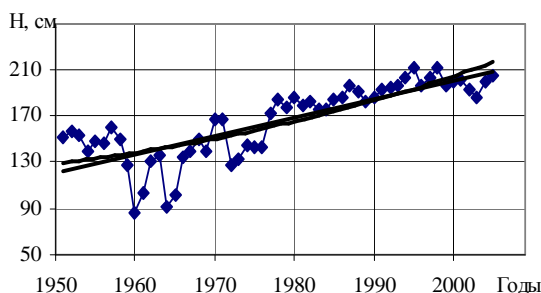
б)



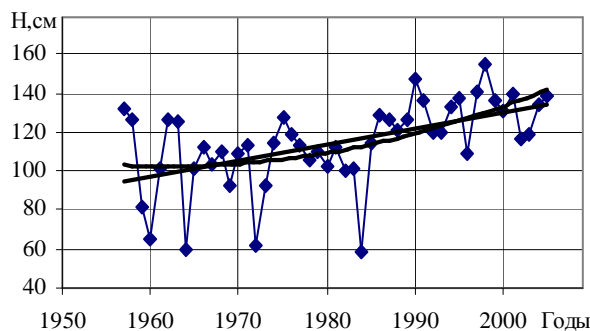
в)



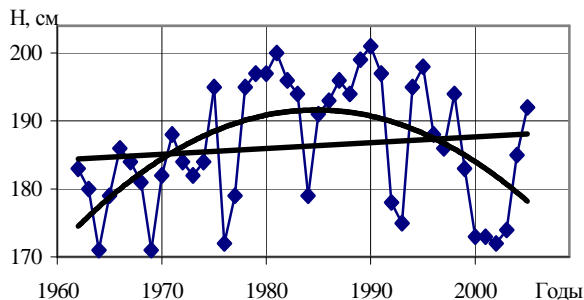
г)



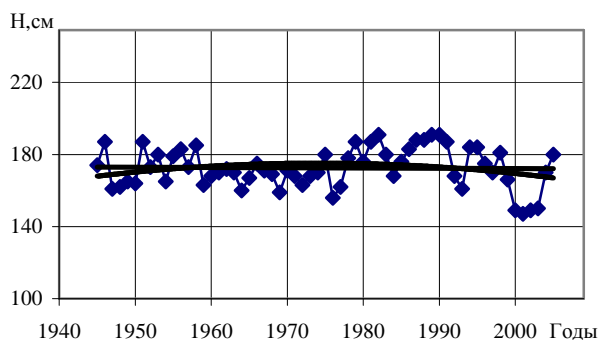
д)



е)



ж)



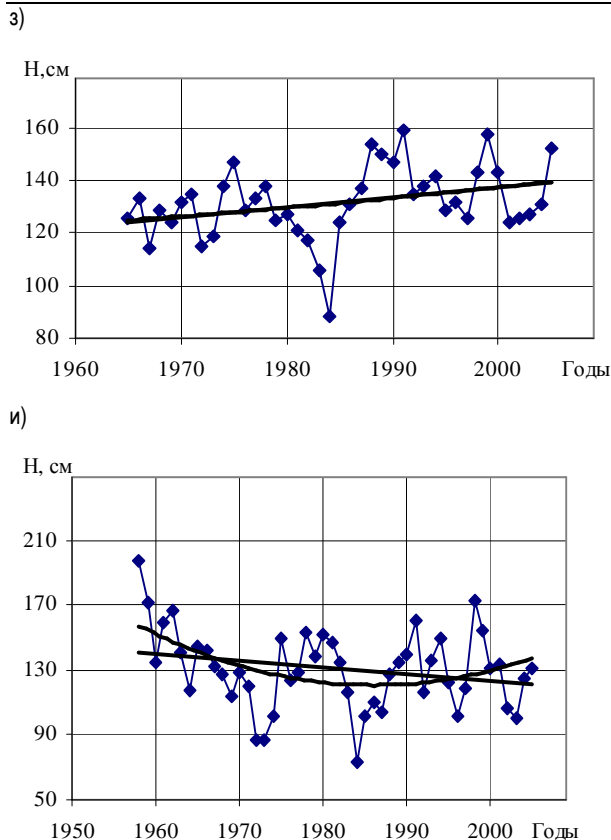


Рис. 1. Хронологический ход среднегодовых уровней воды озер Беларуси: а) Сенно; б) Лукомское; в) Нещердо; г) Освейское; д) Дривяты; е) Мястро; ж) Нарочь; з) Выгонощанское; и) Червоное

Эмпирические кривые обеспеченности для временных рядов уровней воды озер Беларуси для всех периодов соответствуют распределению Пирсона III типа при различных сочетаниях  $C_s = (1-3)C_v$ . Поскольку функция распределения вероятностей уровней воды озер при таких оценках параметров незначительно отличается от функции нормального распределения, применение параметрических критериев для проверки статистических гипотез можно считать допустимым. Гистограммы, построенные для среднегодовых уровней воды озер Беларуси, свидетельствуют, что распределение близко к нормальному (рис. 2).

В табл. 3 представлены выборочные оценки основных статистических параметров временных рядов среднегодовых уровней воды озер Беларуси за период инструментальных наблюдений.

**Анализ однородности рядов испарения с водной поверхностью.** Рассмотрим устойчивость выборочных статистик (средних, коэффициентов вариации, коэффициентов автокорреляции) при изменении периодов осреднения применительно к среднегодовым уровням воды озер Беларуси за период инструментальных наблюдений. При этом исследуемый временной ряд разбивался на два периода: с начала наблюдений по 1985 г. включительно и с 1986 г. (начало роста среднегодовых температур воздуха) по 2005 г. Для оценки различий в режиме уровней воды озер использованы статистические критерии Стьюдента (оценка выборочных средних, формула (8)) и Фишера (оценка выборочных дисперсий, формула (9)). В табл. 4 приведены основные статистические параметры для этих интервалов, а также результаты статистической проверки на однородность.

В результате анализа выборочных средних среднегодовых уровней воды рассматриваемых озер Беларуси статистически значимые различия были 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.

**Анализ цикличности рядов испарения с водной поверхностью.** Параллельно с концепцией случайности многолетних колебаний уровня воды озер необходимо рассматривать концепцию цикличности. Сложность в использовании циклов для прогноза уровня режима озер заключается в их аperiodичности, 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 видно из рис. 3, 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 сдвига во времени.

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 (рис. 4). Для оз. Сено можно выделить два непродолжительных цикла: 4-летний в период с 1957 по 1968 г., а также 6-летний цикл с 1963 по 1973 г. Для оз. Лукомское помимо 4-летнего цикла в период с 1980 по 1988 г. и 6-летнего с 1988 по 1996 г. имеет место также 11-летний цикл на всем протяжении рассматриваемого периода. Для оз. Нещердо выделен 5-летний цикл, который приходится на период с 1958 по 1968 г. Для оз. Освейское характерен мощный 11-летний цикл, приходящий на период с 1955 по 1983 г. и менее мощный 6-летний цикл с 1955 по 1965 г. Для оз. Дривяты выделить каких-либо устойчивых циклов не удалось. Для оз. Мястро характерен 4-летний цикл, который приходится на период с 1975 по 2003 г. Для оз. Нарочь можно выделить два цикла: 6-летний в период с 1972 по 2003 г., а также 11-летний 1977 по 2003 г. Для озер Полесья Выгонощанское и Червоное характерны 11-летние циклы, приходящиеся на период 1978 – 1995 г. и 1967 – 1992 г. соответственно.

Как показала практика применения спектральных анализов и методов отыскания скрытых периодичностей, результаты в моделях прогноза не дали положительного результата [2]. К числу слабых сторон такого подхода помимо неустойчивости циклов относится и возможность их физической (генетической) интерпретации. Последнее характерно и для всех методов, разработанных в рамках статистической концепции.

В связи с тем, что оба критерия дают сравнимые результаты, использование принципа цикличности (квазипериодичности) при анализе и прогнозе многолетних колебаний среднегодовых уровней воды озер Беларуси допустимо.

**Построение прогнозных моделей.** Когда тренд явно не выражен, необходимо рассматривать совместно выборочные АКФ и ЧАКФ данного процесса, с помощью которых определяются характер изменения среднегодовых уровней воды. При этом использовались критерии оценки степени нестационарности процесса и выбор модели осуществлялся с учетом рекомендаций, приведенных в табл. 1.

В нашем случае 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 (рис. 3). Следовательно, рассматриваемый процесс колебаний уровней воды озер может быть идентифицирован авторегрессионной моделью AP ( $\tau$ ) вида:

$$H(t+1) = H_{cp} + r(1) \cdot [H(t) - H_{cp}] + \xi(t+1), \quad (10)$$

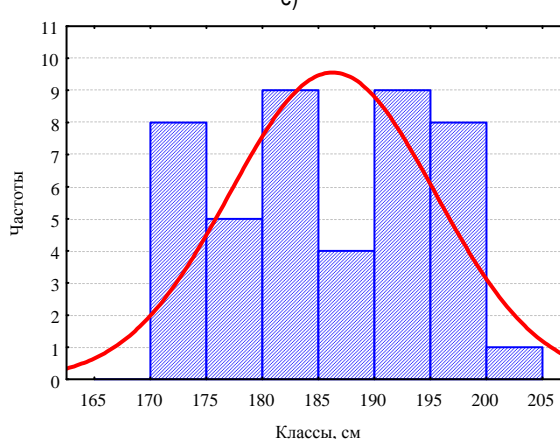
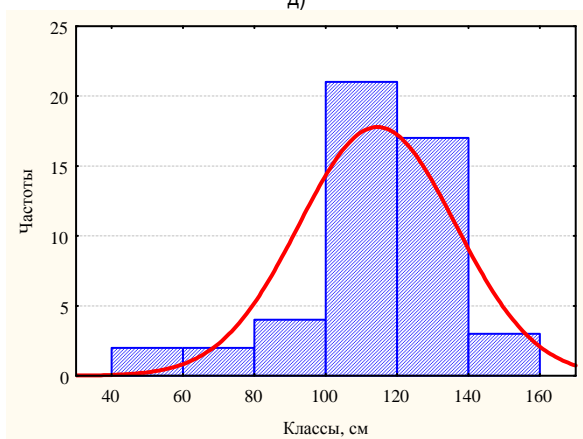
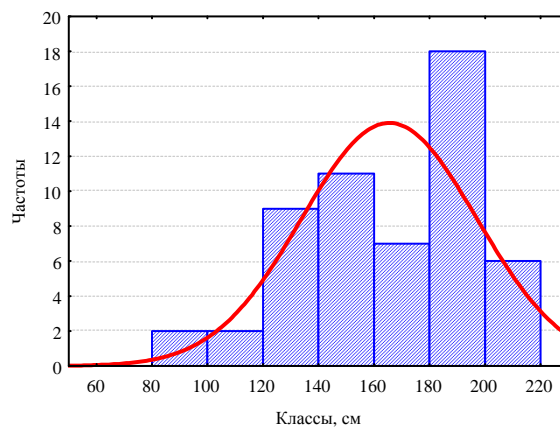
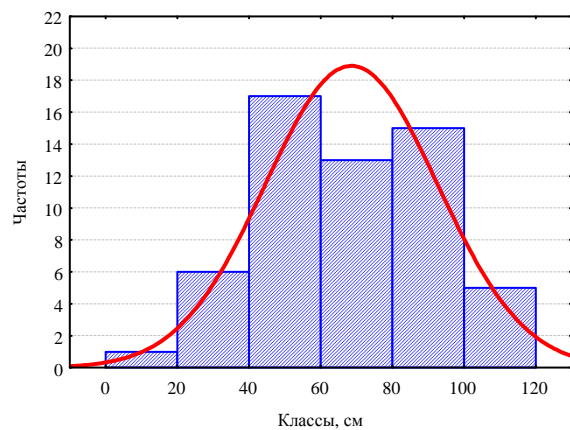
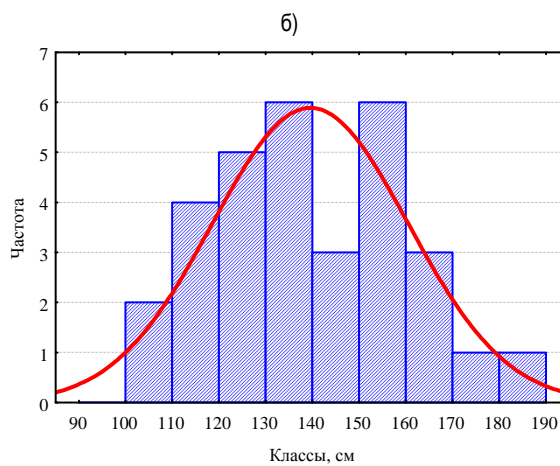
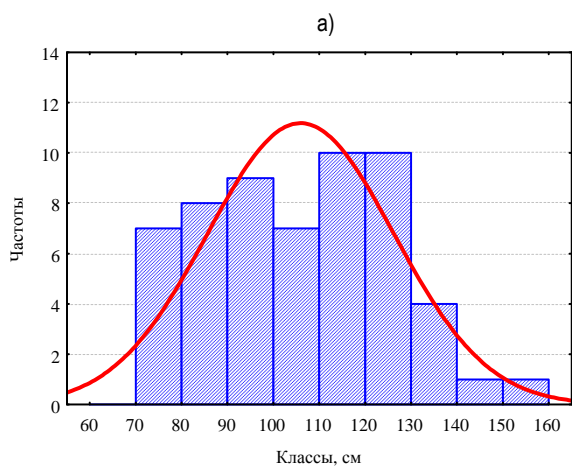
где  $H(t)$  и  $H(t-1)$ , м3/с – уровни воды в озере в  $t+1$ -й и предшествующий ему ( $t$ -й) годы;  $\xi(t)$  – гауссовский «белый шум» с

нулевым средним и  $\sigma_{\xi} = \sigma_H \cdot \sqrt{1-r(1)^2}$ .

Таблица 2. Параметры моделей скорости изменения уровней воды озер Беларуси

Озеро	Период	Модели				
		линейная (2)		полиномиальная (3)		
		коэффициенты		коэффициенты		
		$\alpha$ , см/10 лет	$r$	$\alpha$ , см/10 лет	$\beta$	$R$
Сенно	1949-2005	-4,8	<b>-0,39</b>	1,10	-2179	<b>0,77</b>
Лукомское	1975-2005	8,4	<b>0,36</b>	-1,61	3216	<b>0,46</b>
<b>Нещердо</b>	<b>1949-2005</b>	<b>9,7</b>	<b>0,67</b>	<b>-0,28</b>	<b>553</b>	0,69
Освейское	1951-2005	15,9	<b>0,81</b>	0,30	-575	<b>0,81</b>
Дривяты	1957-2005	8,1	<b>0,53</b>	0,42	-832	<b>0,55</b>
Мястро	1962-2005	0,85	0,12	-0,65	1307	<b>0,54</b>
Нарочь	1945-2005	-0,15	0,00	-0,17	339	0,22
Выгонощанское	1965-2005	3,7	<b>0,32</b>	0,04	-82	<b>0,32</b>
Червоное	1958-2005	-4,2	-0,24	0,938	-1861	<b>0,41</b>

Примечание. Выделены статистически значимые различия между величинами



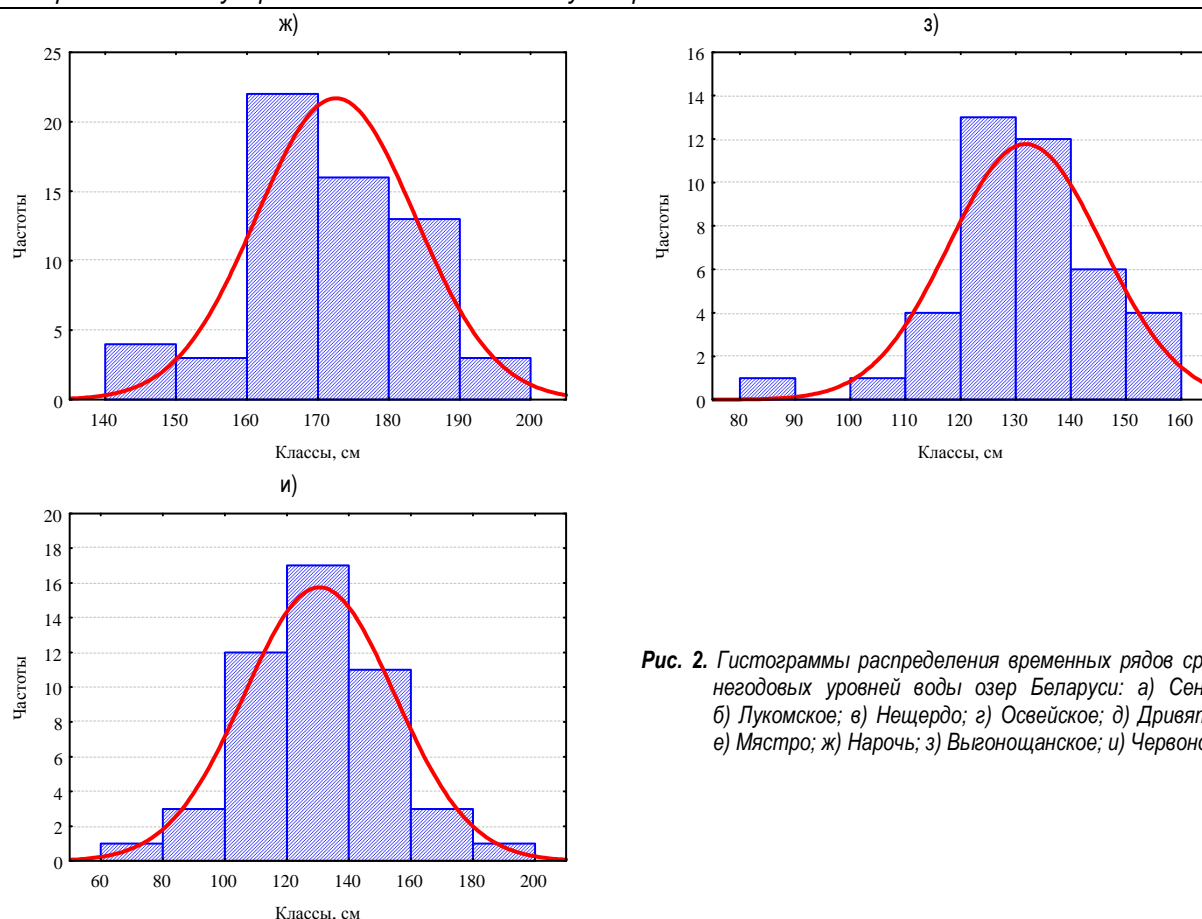


Рис. 2. Гистограммы распределения временных рядов среднегодовых уровней воды озер Беларуси: а) Сенно; б) Лукомское; в) Нещердо; г) Освейское; д) Дривяты; е) Мястро; ж) Нарочь; з) Выгоноцанское; и) Червоное

Таблица 3. Основные статистические параметры среднегодовых уровней воды озер Беларуси за период инструментальных наблюдений

Озеро	Период	Средние уровни воды, см	Коэффициенты		
			вариации	асимметрии	автокорреляции
Сенно	1949-2005	106	0,19	0,13	0,71
Лукомское	1975-2005	140	0,15	0,21	0,50
<b>Нещердо</b>	<b>1949-2005</b>	<b>69</b>	<b>0,35</b>	<b>-0,09</b>	<b>0,69</b>
Освейское	1951-2005	165	0,19	-0,64	0,88
Дривяты	1957-2005	114	0,19	-0,91	0,45
Мястро	1962-2005	186	0,05	-0,13	0,55
Нарочь	1945-2005	173	0,06	-0,26	0,52
Выгоноцанское	1965-2005	132	0,10	-0,45	0,55
Червоное	1958-2005	131	0,18	0,13	0,53

Результаты проведенных исследований закономерностей многолетних колебаний среднегодовых уровней воды озер Беларуси позволяют считать надежно установленным наличием определенной связи уровней смежных лет. Это служит основанием для описания среднегодовых уровней воды озера в виде простой цепи Маркова, т.е.

$$H(t + 1) = r(1) \cdot H(t) + \xi(t + 1), \quad (11)$$

где  $H(t + 1)$  – уровень воды прогнозируемого года;  $H(t)$  – уровень воды в предшествующий год;  $\xi(t)$  – независимая от  $H_{ср}$  случайная величина.

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 табл. 5. В таблице приведены статистически значимые модели. Проверка их на независимом материале показала их удовлетворительную сходимость (рис. 5). Полученные модели отражают закономерности колебаний уровней воды озер и могут использоваться для краткосрочного прогноза.

### ВЫВОДЫ

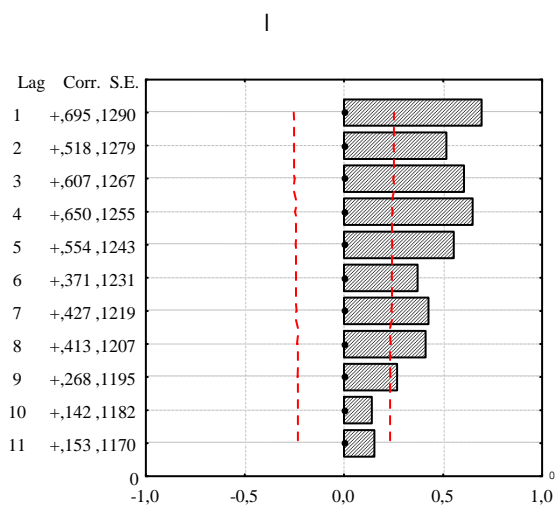
Проведенная оценка степени однородности основных статистических характеристик временных рядов уровней воды озер Беларуси за период инструментальных наблюдений позволяет сделать вывод о наличии статистически значимых изменений в динамике среднегодовых уровней воды отдельных озер Беларуси обусловленных как естественно-климатическими, так и антропогенными изменениями гидрологического цикла. 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.

Показана возможность построения прогнозных моделей уровней воды озер с заблаговременностью в один год. Вся сложность построения прогнозных моделей заключается в их индивидуальности, наличия большого объема исходной информации и невозможности оперативной оценки полученных результатов. Кроме того, неоднородность временных рядов уровней воды в озерах создает дополнительные трудности.

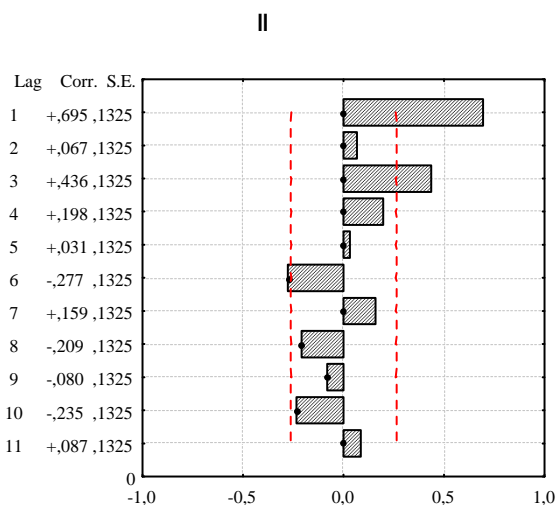
Таблица 4. Основные статистические параметры временных рядов уровней воды озер Беларуси для различных интервалов осреднения

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	<b>0,35</b>	<b>0,05</b>	<b>0,49</b>
	1986-2005	89	0,18	-0,09	0,48
	1949-2005	69	0,35	-0,09	0,69
Освейское	1951-1985	148	<b>0,18</b>	-0,57	0,76
	1986-2005	196	<b>0,04</b>	0,15	0,41
	1951-2005	165	0,19	-0,64	0,88
Дривяты	1957-1985	103	<b>0,20</b>	-0,97	0,08
	1986-2005	131	<b>0,09</b>	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	<b>0,21</b>
	1986-2005	173	0,09	-0,60	<b>0,74</b>
	1945-2005	173	0,06	-0,26	0,52
Выгощанское	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

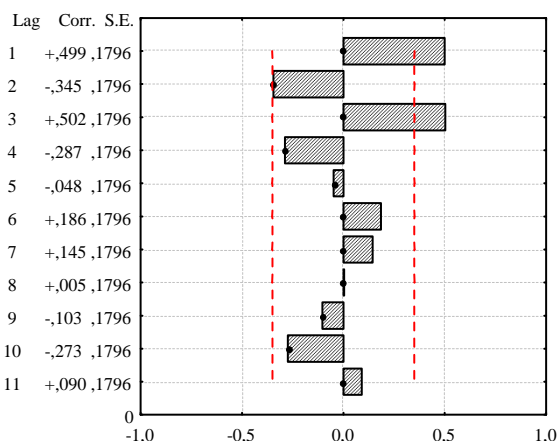
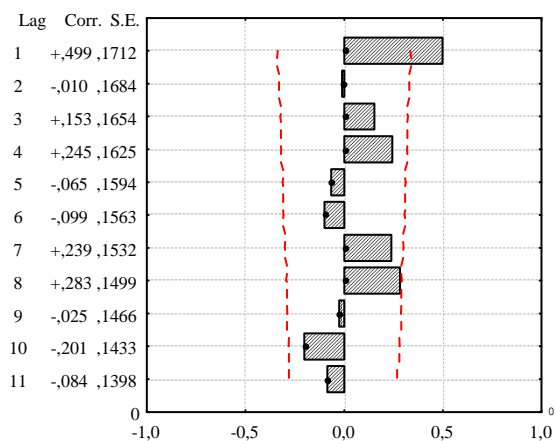
Примечание. Выделены статистически значимые различия между величинами.

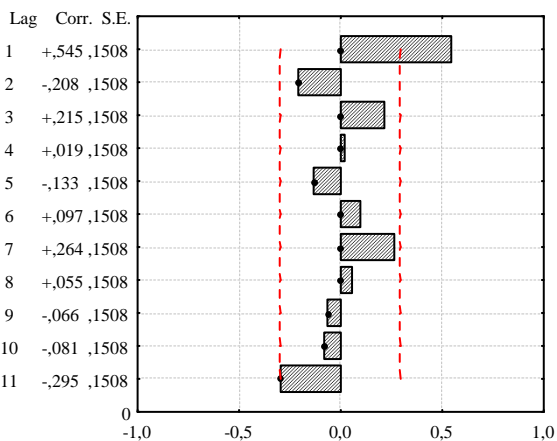
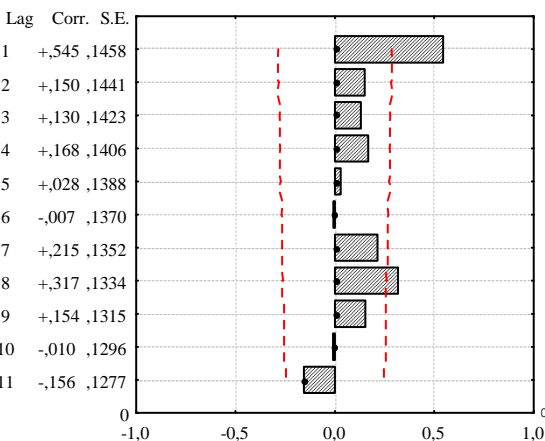
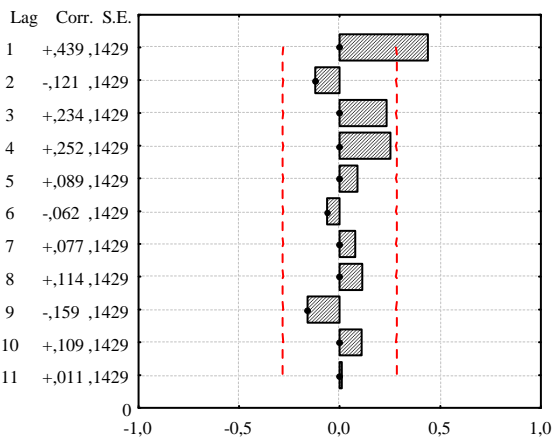
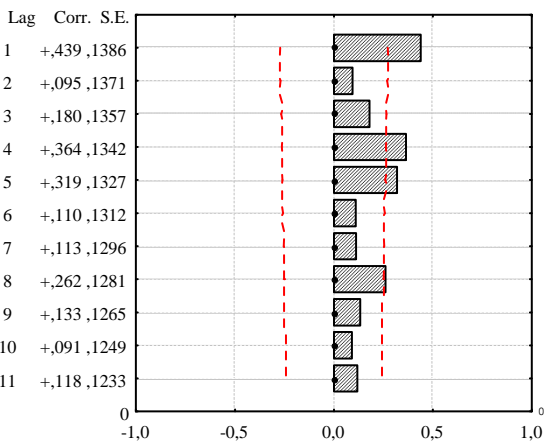
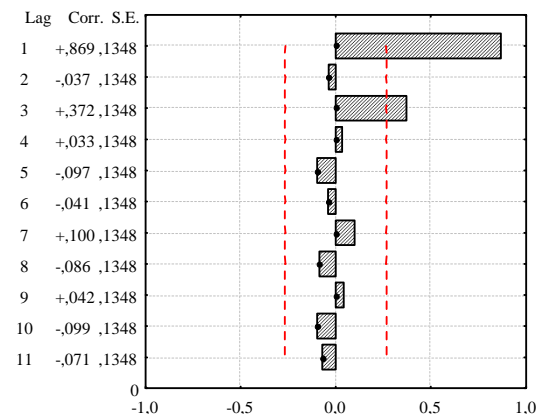
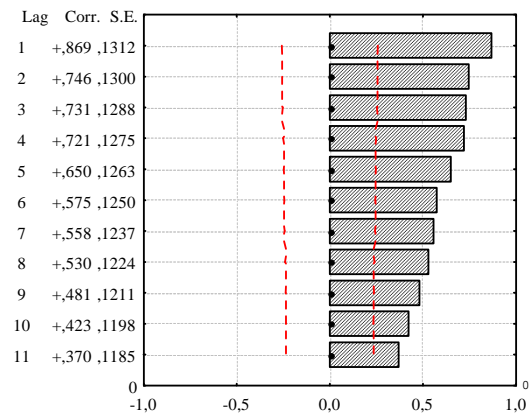
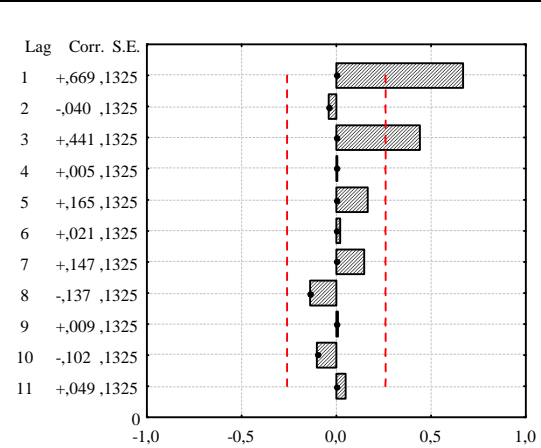
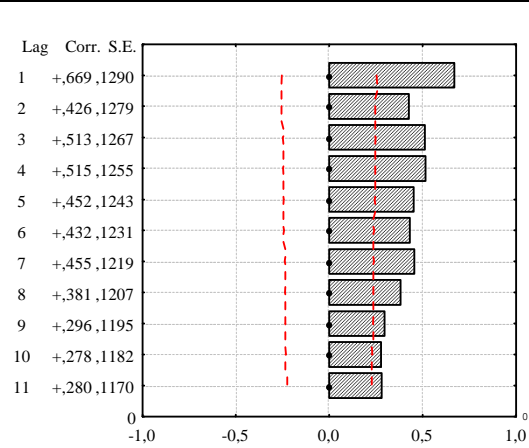


a)



б)







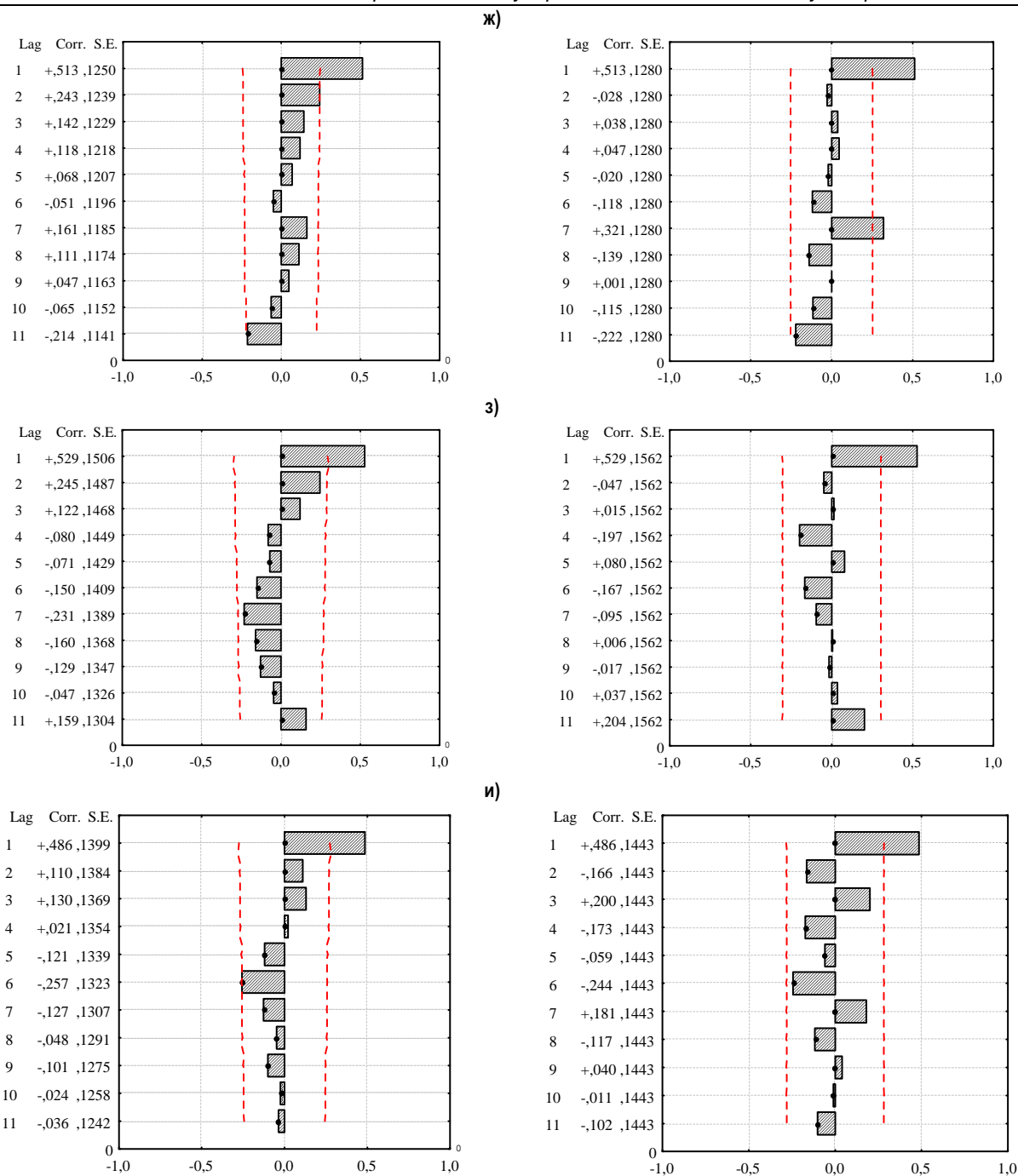


Рис. 3. Автокорреляционная функция (I) и частная автокорреляционная функция (II) среднегодовых уровней воды озера Беларуси: а) Сенно; б) Лукотское; в) Нещердо; г) Освейское; д) Дривяты; е) Мястро; ж) Нарочь; з) Выгонощанское; и) Червоное

Таблица 5. Прогнозные модели уровней воды озера Беларуси

Озеро	Вид модели	R
Сенно	$H(t+1) = 20,2 + 0,475 \cdot H(t) + 0,322 \cdot H(t-3)$	0,70
Нещердо	$H(t+1) = 12,8 + 0,850 \cdot H(t) - 0,585 \cdot H(t-1) + 0,567 \cdot H(t-2)$	0,80
Освейское	$H(t+1) = 19,5 + 0,831 \cdot H(t) - 0,369 \cdot H(t-1) + 0,441 \cdot H(t-2)$	0,93
Дривяты	$H(t+1) = 30,9 + 0,484 \cdot H(t) + 0,306 \cdot H(t-7)$	0,60
Мястро	$H(t+1) = 45,7 + 0,462 \cdot H(t) + 0,295 \cdot H(t-7)$	0,59
Нарочь	$H(t+1) = 53,8 + 0,634 \cdot H(t) - 0,321 \cdot H(t-5) + 0,441 \cdot H(t-6)$	0,67
Выгонощанское	$H(t+1) = 54,5 + 0,601 \cdot H(t)$	0,59
Червоное	$H(t+1) = 115,5 + 0,383 \cdot H(t) - 0,298 \cdot H(t-5)$	0,55

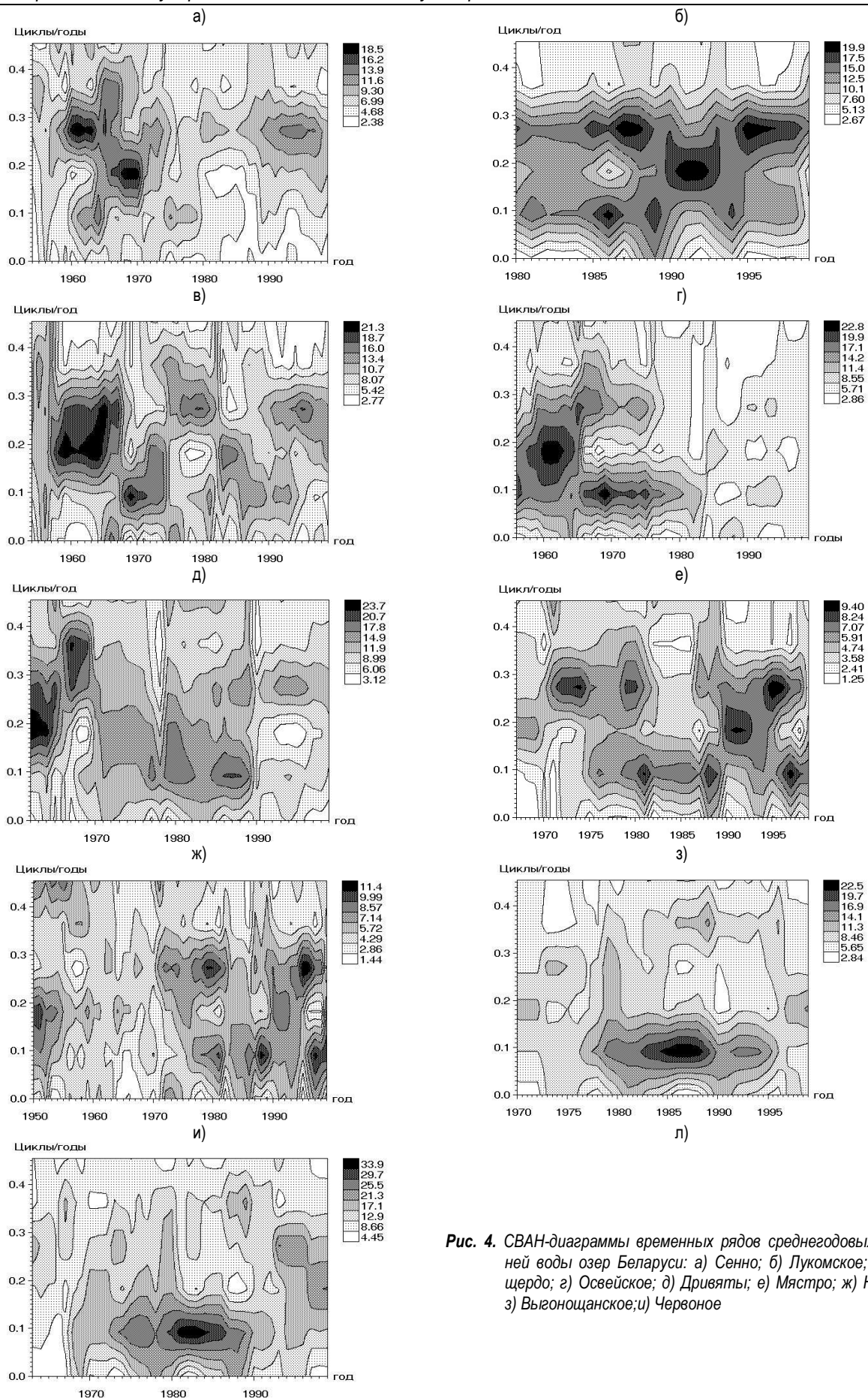


Рис. 4. СВД-диаграммы временных рядов среднегодовых уровней воды озер Беларуси: а) Сенно; б) Лукомское; в) Нещердо; г) Освейское; д) Дривяты; е) Мясстро; ж) Нарочь; з) Выгонощанское; и) Червоное

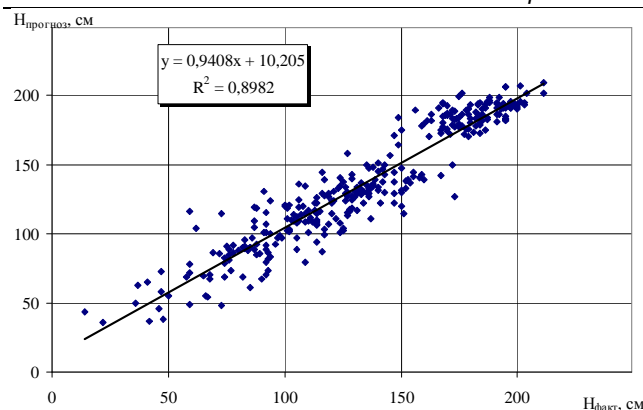


Рис. 5. Фактические и прогнозные уровни воды озер

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Исмайылов, Г.Х., Анализ многолетних колебаний годового стока Волги/ Г.Х. Исмайылов, В.М. Федоров // *Вод. Ресурсы*, 2001. - Т. 28. - №5. - С. 517–525.
2. Раткович, Д. Я. Многолетние колебания речного стока/ Д.Я. Раткович// Л.: Гидрометеиздат, 1976. - 255 с.
3. Логинов, В.Ф. Изменение испарения с водной поверхности на территории Белоруссии/ В.Ф. Логинов, А.А. Волчек// *География и природные ресурсы*. - №2, 2005. - С. 137-144.
4. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление. - М.: Мир, 1974. - Вып. 1. - 406 с.
5. Логинов, В.Ф. Изменение ветрового режима на территории Беларуси в XX в./ В.Ф. Логинов, А.А. Волчек, Г.В. Волобуева// *Природные ресурсы*, 2005. - №4. - С. 5-12.

Материал поступил в редакцию 23.04.08

#### VOLCHECK A.A., VLASOV B.P. Existential fluctuations of water levels for the lakes of belarus in conditions of the changing climate

The generalized researches of fluctuations of levels for the lakes of Belarus are stated. It is drawn a conclusion on presence of statistically significant changes in dynamics of mid-annual water levels for separate lakes of Belarus caused both by natural-climatic, and by anthropogenous changes of the hydrological cycle.

УДК 628.337

Яловая Н.П.

## УЛУЧШЕНИЕ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИРОДНОЙ ВОДЫ ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯЦИЕЙ

### ВВЕДЕНИЕ

При водоподготовке особое внимание отводится процессам обеззараживания. По данным эпидемиологических и вирусологических наблюдений, кишечные вирусы, в особенности энтеровирусы, могут содержаться даже в питьевой воде систем централизованного водоснабжения.

Вода, загрязненная кишечными вирусами, является причиной распространения таких заболеваний, как полиомиелит, серозный менингит, гепатиты, гастроэнтериты, кератоконъюнктивитная лихорадка и др.

Поэтому заключительным этапом улучшения качества воды для хозяйственно-питьевых нужд является ее обеззараживание. Постоянно обеззараживают воду из поверхностных водных объектов, подземные воды в большинстве случаев подают без обеззараживания.

Процесс обеззараживания воды контролируют, определяя общее число бактерий и количество бактерий группы кишечной палочки в 1 дм<sup>3</sup> воды после ее обеззараживания.

Согласно требованиям СанПиНа 10-124 РБ 99 [1] безопасность питьевой воды в эпидемиологическом отношении определяется отсутствием в ней болезнетворных бактерий, вирусов и простейших микроорганизмов, ее соответствием нормативам по микробиологическим и паразитологическим показателям.

Метод обеззараживания воды следует выбирать с учетом расхода и качества воды, эффективности ее очистки, надежности обеззараживания, технико-экономических соображений, возможности автоматизации процесса, механизации трудоемких работ, условий поставки и хранения реагентов.

Обеззараживание воды на коммунальных и промышленных водопроводах может быть достигнуто применением ряда окислителей: хлора, гипохлорита натрия, хлораминов, хлорной извести, озона, перманганата калия, йода и др., действию ультрафиолетового и ионизирующего излучения, ультразвуковых колебаний, кипячении, фильтровании и т. д. [2].

### АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ

Существующая практика дезинфекции питьевой воды в большинстве развитых стран, например, в США, распределяется следующим образом: 98,6% питьевой воды подвергается хлорированию, озонированию

вание составляет только 0,37%, остальные методы - 0,75%. Причина состоит в том, что хлорирование – наиболее экономичный и эффективный метод обеззараживания питьевой воды в сравнении с любыми другими известными методами. Одним из недостатков хлорирования воды является образование токсичных и опасных побочных продуктов – галогенсодержащих соединений (ГСС).

В работах [3,4] отмечается, что электрохимическим методом вода эффективно обеззараживается, а образующийся в процессе электролиза коагулянт гидроксид железа сорбировал не только взвешенные вещества, но и бактерии.

Применение электрокоагуляционного метода обеспечило высокий эффект удаления из воды практически всех ГСС, при этом концентрация хлороформа снизилась в 6 раз при содержании в исходной воде 5 ПДК, хлорпикрина – в 7 раз даже при низком уровне загрязнения (5 мкг/дм<sup>3</sup>), а другие ГСС были полностью удалены из воды.

Электрохимическому обеззараживанию природной воды уделено внимание в работе [5]. При пропускании исходной воды через электролизер с алюминиевым анодом микробное число снижалось на 40-45 %, а при повышенных затратах электроэнергии вода обеззараживалась полностью. Достигнуть эффективного удаления из поверхностных вод водорослей также возможно применением электрохимических методов. Так, при обработке воды, содержащей 1 610 клеток водорослей в 1 мл воды, электрокоагуляционно полученным коагулянтном гидроксидом железа их количество уменьшается на 95 %.

Исследования по получению и использованию анодных растворов серебра для обеззараживания и консервирования воды проведены В.А. Слипченко, А.П. Мажаревским, Л.А. Кульским [6]. Эта технология используется на морском и речном транспорте, в пищевой промышленности на Украине.

Широкое применение в последние годы получил электрохимический метод обеззараживания воды с применением графитовых, медных, угольных, платиновых и др. электродов [7-11]. Например, для улучшения микробиологических и паразитологических показателей качества питьевой воды в ряде домов отдыха России внедрены установки для электрохимического обеззараживания природных вод [12]. После электрокоагуляционной обработки в электролизерах с угольными электродами вода характеризовалась высокими физико-химическими и бактериологическими показателями.

Яловая Наталья Петровна – доцент кафедры инженерной экологии и химии УО «Брестский государственный технический университет», ул. Московская, 267, УО БрГТУ, 224017, г. Брест, Беларусь.