

4. Рекомендации по расчету минимально допустимых расходов воды, не подлежащих изъятию из рек в условиях Республики Беларусь: Приказ Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды – №3 от 8.01.2003 г.
5. Фащевский, Б.В. Экологическое обоснование допустимой степени регулирования речного стока / Б.В. Фащевский. – Минск, 1989. – 22 с.
6. Маркин, В.Н. Внутригодовое распределение экологического стока малых рек / В.Н. Маркин // Природообустройство и рациональное природопользование – необходимые условия социально-экономического развития России – М.: МГУП, 2005.
7. Мезенцев, В.С. Гидролого-климатическая гипотеза и примеры ее использования / В.С. Мезенцев // Водные ресурсы, 1995. – Том 22, №3. – С. 299 – 301.
8. Волчек, А.А. Методика определения максимально возможного испарения по массовым метеоданным (на примере Белоруссии) / А.А. Волчек // Научно-техническая информация по мелиорации и водному хозяйству (Минводхоз БССР), 1986. – №12. – С. 17–21.
9. Волчек, А.А. Оценка трансформации водного режима малых рек Белорусского Полесья под воздействием природных и антропогенных факторов (на примере р. Ясельда) / А.А. Волчек, С.И. Парфомук // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – Екатеринбург, 2007. – №1. – С. 50–62.
10. Валуев, В.Е. К вопросу интерполяции, осреднения и инженерных расчетов воднобалансовых характеристик / В.Е. Валуев, А.А. Волчек, Н.Т. Юрченко // Воспроизводство плодородия мелиорируемых земель Сибири: Тр. / СибНИИГиМ. – Красноярск, 1991. – С. 21 – 39.
11. Инженерные расчеты воднобалансовых характеристик / В.Е. Валуев, А.А. Волчек, О.П. Мешик, В.Ю. Цилиндь: сб. тез. докл. XXI научно-технической конференции в рамках проблемы «Наука и мир» // Брест. политехн. институт. – Брест, 1994. – Ч. II. – С. 89 – 90.
12. Логинов, В.Ф. Колебания годового стока воды р. Неман у г. Гродно / В.Ф. Логинов, А.А. Волчек // Водные ресурсы, 2006. – Т. 33, №6. С. 635–663.
13. Логинов, В.Ф. Водный баланс речных водосборов Беларуси / В.Ф. Логинов, А.А. Волчек. – Минск: Тоншик, 2006 – 160 с.
14. Волчек, А.А. Половодья на реках Беларуси: закономерности формирования и прогноз / А.А. Волчек, Ан. А. Волчек // Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 216 с.
15. Волчек, А.А. Минимальный сток рек Беларуси / А.А. Волчек, О.И. Грядунова // Брест. гос. ун-т имени А.С. Пушкина. – Брест: БрГУ, 2010. – 169 с.
16. The Strategic Framework for Adaptation to Climate Change in the Neman River Basin / United Nations Development Programme in Belarus and United Nations Economic Commission for Europe // V.N. Korneev, A.A. Volchak, L.N. Hertman et al. - Brest, 2015. – p. 64.

Материал поступил в редакцию 04.05.17

VOLCHAK A.A. Water resources of the Viliya River on Belarussian territory: curent status and prognosis

Generalized research results of the Viliya river runoff fluctuation (at vilage Steshicy, Vilejka town and vilage Mihalishki) for the whole period of instrumental observation (1946-2014) for annual, minimum summer and winter flow rates are presented. Forcast estimation of the changes of the runoff according to climate change scenario A1B are given. Compensation measures for possible water deficiancy are shown.

УДК 556.048(574)

А.А. Волчек

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЕЙ ВОДЫ КРУПНЫХ ОЗЁР НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА БАЛХАШ

Введение. Озёра являются уникальными водными объектами и имеют важное экономическое и экологическое значение. Они служат накопителями чистой пресной воды, а также выполняют функцию регулирования поверхностных и подземных вод. В связи с тем, что водообмен в озёрах 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 озёр 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 озёрных экосистем, разработке количественных, качественных диагностических, имитационных и прогностических моделей.

Существенной трудностью при моделировании гидрологического режима озёр 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 озёр 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

режиме требуются при решении ряда гидрологических и водохозяйственных задач.

Целью настоящей работы является анализ временного ряда уровней воды крупных озёр на примере озера Балхаш для выявления закономерностей в их колебании, количественной оценки трансформации гидрологического режима озёрной экосистемы и построении прогнозных моделей.

Исходные материалы и методы исследования.

Материалом для исследования послужили данные многолетних инструментальных наблюдений за уровнем воды озера Балхаш, выполненные Гидрометеослужбой Республики Казахстан.

Объектом изучения является озеро Балхаш, имеющее большое народнохозяйственное и природоохранное значение. Балхаш — бессточное полупресноводное озеро в Балхаш-Алакольской котловине на юго-востоке Казахстана, второе по величине непересыхающее солёное озеро (после Каспийского моря) и 14-е в списке крупнейших озёр мира. Уникальность озера состоит в том, что оно разделено узким проливом на две части с различными химическими характеристиками воды — в западной части она практически пресная, а в восточной — солоноватая. Озеро относится к Балхаш-Алакольскому водохозяйственному бассейну и расположено сразу в трёх областях Казахстана: Алматинской, Жамбылской и Карагандинской.

Площадь озера Балхаш составляет примерно 16,4 тыс. км² (2000 г.), что делает его самым крупным из озёр, целиком расположенных на территории Казахстана. Балхаш лежит на высоте примерно 340 м над уровнем моря и имеет форму полумесяца. Его длина составляет примерно 600 км, ширина изменяется от 9–19 км в восточной части до 74 км в западной. Длина береговой линии составляет 2385 км. Полуостров Сарыесик, расположенный примерно посередине озера, гидрографически делит его на две сильно отличающиеся части. Западная часть относительно мелководная и почти пресная, а восточная имеет большую глубину и солёную воду. Через формируемый полуостровом пролив Узынарал шириной 3,5 км вода из западной части пополняет восточную. Глубина пролива составляет около 6 м. На рис. 1 представлен космический снимок озера.



Цифрами обозначены крупнейшие полуострова, острова и заливы: 1 – полуостров Сарыесик, разделяющий озеро на две части, и пролив Узынарал; 2 – полуостров Байгабыл; 3 – полуостров Балай; 4 – полуостров Шаукар; 5 – полуостров Кентубек; 6 – острова Басарал и Ортаарал; 7 – остров Тасарал; 8 – залив Шемпек; 9 – залив Сарышаган

Рисунок 1. Вид на озеро Балхаш. Снимок NASA, август 2002 г.

Котловина озера состоит из нескольких маленьких впадин. В западной части Балхаша имеются две впадины глубиной до 7–11 м — одна из них протянулась с западного побережья от острова Тасарал до мыса Коржынтубек, вторая тянется на юге от залива Бертыс, который является самым глубоким местом западного Балхаша. Глубина впадины восточного Балхаша достигает 16 м, наибольшая глубина всей восточной части — 27 м. Средняя глубина всего озера составляет 5,8 м, общий объём воды — около 112 км³. Береговая линия очень извилиста и расчленена многочисленными заливами и бухтами.

Балхаш-Алакольский бассейн имеет площадь 512 тыс. км², а его суммарный поверхностный сток в средний по водности год составляет 27,76 км³, включая 11,5 км³, поступающие с территории КНР. Площадь водосборного бассейна только озера Балхаш составляет около 413 тыс. км², причём 15% его территории лежит на северо-западе Синьцзян-Уйгурского автономного района Китая и небольшая часть – в Киргизии. Из суммарного стока Балхаш-Алакольского бассейна 86% приходится на озеро Балхаш, сток р. Или составляет до 12,3 км³/год. Или, впадающая в западную часть озера, даёт 73–80% всего притока воды в озеро. Другие реки — Каратал, Лепсы, Аягуз, Тентек, Коксу и Аксу привносят небольшой вклад в пополнение озера водой, потому что используются для орошаемого земледелия и хозяйственных нужд. Год от года сток пресных вод из маленьких рек сокращается и увеличивается процент ядохимикатов и вредных веществ. Годовая разница в притоках западной и восточной частей озера составляет 1,15 км³.

Климат окрестностей Балхаша является пустынным. Средняя температура июля составляет +30 °С, января — около -14 °С. Осадков в среднем выпадает 131 мм в год. Относительная влажность воздуха составляет 55–60%. Средняя годовая скорость ветра около 4,5–4,8 м/с, причём в западной части озера преобладают северные ветры, а в восточной части – северо-восточные. Ветер вызывает на озере сильное волнение (высота волны может достигать 2–3,5 м), в западной части наблюдается постоянное круговое течение. Число солнечных дней составляет 110–130 в год, энергетическая освещённость — 15,9 МДж/м² в день. Сухой климат, ветра и температура приводят к большой скорости испарения воды — в прохладные годы норма равняется от 950 мм, а в засушливые достигает до 1200 мм. Балхаш является тёплым, хорошо прогреваемым озером. Температура воды на его поверхности колеблется от 0 °С в декабря до +28 °С в июле. Среднегодовая температура западной части озера равняется +10 °С, восточной — +9 °С. Каждый год озеро замерзает, и лед тут обычно есть с ноября до начала апреля, к тому же сход оледенения на востоке осуществляется с задержкой на 10–15 дней.

Факторы, влияющие на формирование уровня озера можно условно разделить на две группы. К первой группе относятся глобальные факторы, которые касаются больших территорий, а ко второй — локальные факторы. Тогда уровень воды в озере можно представить как [3, 4, 5]:

$$H(t) = H_{\phi}(t) \pm \Delta H_n(t), \quad (1)$$

где $H(t)$ — уровень воды в озере в расчётном календарном году, см; $H_{\phi}(t)$ — фоновая составляющая в фор-

мировании уровня режима озера в том же году, м; $\pm \Delta H_n(t)$ — вклад в формирование уровня режима озера локальных факторов, м.

Влияние глобальных факторов на формирование уровня режима озера можно оценить с помощью различных моделей. В ряде случаев, с достаточной для практических расчетов точностью, можно описать с помощью линейных трендов:

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

где $H_{\phi}(0)$ — уровень воды в озере на начало расчетного периода, см; ΔH — скорость изменения уровня воды, см/год; t — календарный год.

Однако с увеличением временного ряда использование линейных моделей не всегда корректно. Кроме того, многие процессы, происходящие в природе, обладают свойствами повторяться через определенные промежутки времени, т. е. являются периодическими. Периодические процессы описываются функциями, составленными либо из конечного, либо из бесконечного числа слагаемых такого вида. Математическим аппаратом для исследования таких задач и служат ряды Фурье, для которых тригонометрические функции взяты в качестве базовых. В общем виде колебания фоновая составляющая уровней озера может быть представлена в виде [5]:

$$H_{\phi}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_n (a_n \cdot \cos(n \cdot t) + b_n \cdot \sin(n \cdot t)), \quad (3)$$

$$\text{где } a_0 = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(t) dx; \quad a_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cdot \cos(n \cdot t) dx;$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cdot \sin(n \cdot t) dx; \quad n = 1, 2, 3, \dots - \text{коэффициенты ряда (коэффициенты Фурье).}$$

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

Разность между фактическим уровнем воды и модельной фоновой составляющей определяются, в основном, колебаниями погодных условий и влиянием локальных факторов.

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

$$\Delta H_n(t) = H_u(t) \pm H_{\eta}(t), \quad (4)$$

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

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

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

$$H_u(t) = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i \cdot \varphi_i(t), \quad (5)$$

где $\varphi_1(t) \dots \varphi_k(t)$ — 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 уровней воды озера. При этом используются следующие критерии оценки степени нестационарности процесса и выбора модели [1, 2] приведенные в табл. 1.

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

$$H_{\eta}(P_{\%}) = \bar{H}_{\eta} (\Phi_{P_{\%}} \cdot C_v + 1), \quad (6)$$

где \bar{H}_{η} — среднее значение случайной составляющей испарения с водной поверхности, мм; $\Phi_{P_{\%}}$ — число Фостера расчетной обеспеченности $P_{\%}$; C_v — коэффициент вариации.

Используя статистические методы, находят значения средней величины случайной составляющей (\bar{H}_{η}), 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_i). Таким образом, имея некоторый ограниченный объем информации, можно получить, при принятом законе распределения, временной ряд уровней озера практически неограниченной длины.

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

При статистическом анализе временных рядов использованы следующие методики:

— для выявления тенденций изменений использовались хронологические графики колебаний и разностные интегральные кривые;

— для оценки различий в статистических параметрах использовался критерий Стьюдента и критерий Фишера:

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{n_x \cdot \hat{\sigma}_x^2 + n_y \cdot \hat{\sigma}_y^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_x \cdot n_y \cdot (n_x + n_y - 2)}{n_x + n_y}}, \quad (7)$$

$$F = \frac{\hat{\sigma}_x^2}{\hat{\sigma}_y^2}, \quad (8)$$

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, 22, 33 и 44 года.

Анализ результатов исследований. Годовой ход колебаний уровня воды озера Балхаш за время инструментальных наблюдений представлен на рис. 2, который охватывает период 1879–2010 годы, продолжительностью 132 года. Временной ход колебаний уровня воды носит циклический характер. Среднее значение уровня воды в озере Балхаш за период инструментальных наблюдений составляет $H_{cp} = 341,82$ м, минимальное значение наблюдалось в 1884 и 1885 гг. и составило $H_{min} = 340,52$ м, максимальное значение наблюдалось в 1908 г. и составило $H_{max} = 343,71$ м, размах колебаний составил $\Delta H = 3,19$ м.

Площадь и объём озера сильно изменяются в соответствии с долгосрочными колебаниями и краткосрочными флуктуациями уровня воды. Долговременные колебания имеют амплитуду 12–14 м, минимальные значения пришлись на период с V по X век, а максимум уровня воды наблюдался с XIII по XVII век. В начале

XX века и в период с 1958 по 1969 год площадь озера увеличивалась до 18–19 тыс. км², а во время засух, например, в конце XIX века, а также в 1930-х и 1940-х годах, озеро сжималось до 15,5–16,3 тыс. км². Амплитуда колебаний уровня воды в озере при этом составляла около 3 м. В 1946 году площадь поверхности озера составляла 15 730 км², а объём — 82,7 км³. На начало 2000-х годов озеро находилось в стадии уменьшения из-за отвода впадающих в него рек в хозяйственных целях. Так, на р. Или в 1970 г. была построена плотина Капчагайской ГЭС, образовавшая Капчагайское водохранилище. При заполнении этого резервуара водный баланс Балхаша был нарушен, что вызвало ухудшение качества воды, особенно в восточной части озера. С 1970 по 1987 год уровень воды снизился на 2,2 м, а объём — на 30 км³. Проведённые исследования показали, что если бы естественный режим питания сохранился, то с 1975 по 1986 год наступила бы фаза сокращения озера, то есть антропогенные и природные факторы воздействовали на экосистему озера в одном направлении. Предлагались варианты решения проблемы увеличения засоленности западной части, основывавшиеся на разделении озера плотиной, однако реализация подобных планов была невозможной из-за экономической ситуации в стране.

Локальный минимум уровня воды в озере (340,65 метра над уровнем моря) был зафиксирован в 1987 г. после окончания заполнения Капчагайского водохранилища, а в январе 2005 г. наблюдалось повышение уровня до 342,5 м, которое некоторые специалисты связали с большим количеством осадков, выпавших за последние годы.

Для удобства анализа колебания уровней воды озера введены новые координаты, т. е. за нуль графика принята отметка 340 м. Пересчет отметок выполнен по зависимости $h_i = H_i - 340$, где h_i — уровень воды озера в новых координатах.

Временной ход колебаний уровней воды озера Балхаш отслеживался с помощью хронологических графиков. Анализ среднегодовых уровней воды озера свидетельствует о наличии в многолетнем ходе этих значений статистически значимых на 95%-ном уровне локальных трендов. Исходя из характера колебаний уровней воды озера выделено 5 интервалов, а именно: 1879–1908 гг., 1909–1946 гг., 1947–1961 гг., 1962–1987 гг., 1988–2010 гг., а также период инструментальных 1879–2010 гг. На рис. 3 приведен хронологический ход, а также линейные тренды уровней воды для выделенных интервалов. Как видно из рисунка, динамика уровней воды в озере носит сложный и неоднозначный характер. Для выделенных интервалов и периода наблюдений в целом построены линейные тренды и определены основные статистические характеристики: относительный средний уровень, коэффициенты вариации, асимметрии, автокорреляции, корреляции линейных трендов и средний градиент (изменения) уровней воды (табл. 2).

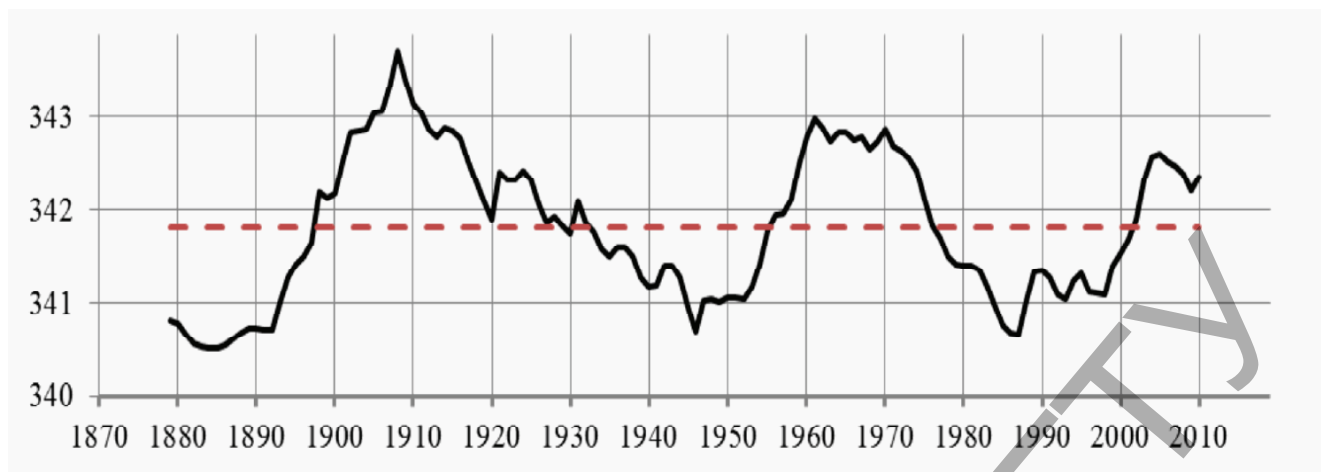
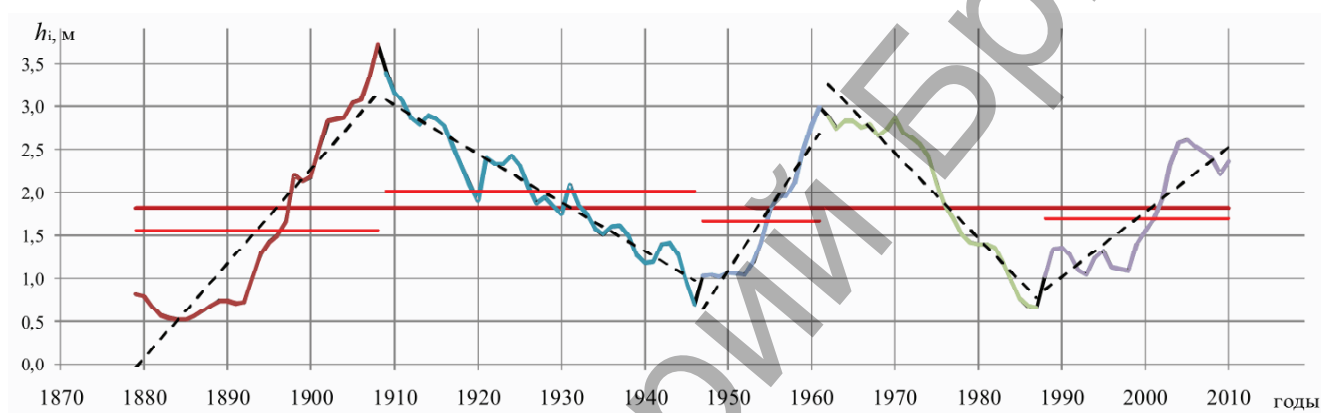


Рисунок 2. Годовой ход колебаний уровня воды озера Балхаш



Сплошные линии — средние значения уровней воды на интервале; пунктирные линии — тренды на выделенных интервалах

Рисунок 3. Годовой ход колебаний уровня воды озера Балхаш

Таблица 2. Основные статистические параметры среднегодовых уровней воды озера Балхаш и за различные периоды осреднения

Период осреднения, годы	$h_{cp}, \text{ м}$	Коэффициенты				
		C_v	C_s	$r(1)$	r	$\Delta h \cdot \text{ м/10 лет}$
1879–2010	1,82	0,44	0,15	0,97	0,05	0,01
1879–1908	1,56	0,67	0,64	0,99	0,93	1,10
1909–1946	2,02	0,32	0,17	0,96	-0,96	-0,57
1962–1987	2,01	0,39	-0,41	0,99	-0,96	-0,99
1988–2010	1,70	0,35	0,43	0,96	0,87	0,75

Примечание. Выделены статистически значимые коэффициенты корреляции.

Таблица 3. Эмпирические значения t -критериев Стьюдента и F -критериев Фишера для различных интервалов осреднения

	Интервалы осреднения				
	1879 – 1908	1909 – 1946	1947 – 1961	1962 – 1987	1988 – 2010
1879–2010	$t=1,27, F=1,71$	$t=1,60, F=1,46$	$t=0,81, F=1,32$	$t=1,16, F=1,01$	$t=0,85, F=1,80$
1879–1908		$t=2,12, F=2,50$	$t=0,39, F=2,26$	$t=1,85, F=1,72$	$t=0,60, F=3,09$
1909–1946			$t=1,73, F=1,11$	$t=0,03, F=1,45$	$t=2,00, F=1,23$
1947–1961				$t=1,49, F=1,31$	$t=0,16, F=1,37$
1962–1987					$t=1,60, F=1,79$

Примечание. Выделены эмпирические критерии выше пороговых.

Анализ однородности уровней воды за различные интервалы. Рассмотрим устойчивость выборочных статистик (средних, коэффициентов вариации) при изменении интервалов осреднения применительно к среднегодовым уровням воды озера Балхаш за период инструментальных наблюдений. Для оценки различий в режиме уровней воды озера использованы статистические критерии Стьюдента (оценка выборочных средних, формула (8)) и Фишера (оценка выборочных дисперсий, формула (9)). В табл. 3 приведены результаты сравнительного анализа основных выборочных статистик на однородность для рассматриваемых интервалов осреднения.

В результате анализа выборочных средних среднегодовых уровней воды за рассматриваемые интервалы статистически значимые различия при уровне значимости $\alpha = 5\%$ были установлены только для интервалов — 1879–1908 и 1909–1946 гг., статистически значимые различия коэффициентов вариации выявлены для следующих интервалов: 1879–2010 и 1879–1908; 1879–1908 и 1909–1946; 1879–1908 и 1988–2010 гг. Что касается коэффициентов автокорреляции, то статистически значимых различий не установлено.

Анализ цикличности в колебаниях среднегодовых уровней воды за период инструментальных наблюдений. Параллельно с концепцией случайности многолетних колебаний уровня воды озёр необходимо рассматривать концепцию цикличности. Сложность в использовании циклов для прогноза уровня озёр заключается в их апериодичности, так как фаза, амплитуда и дли-

тельность цикла меняются без видимых закономерностей. Кроме того, пока нет единого мнения о природе этих циклов: отсутствует объективная методика выделения и анализа циклов уровней воды озёр. Считается, что циклы обусловлены либо влиянием внешних (космофизических факторов), либо автоколебательными процессами в системе атмосфера-гидросфера Земли, либо естественными свойствами любой случайной последовательности.

Анализ колебаний уровней воды озера Балхаш начнем с использованием разностных интегральных кривых, так как они дают наглядное представление о характере колебаний (рис. 4). Как видно из рисунка, в колебаниях средне-многолетних уровней воды озера Балхаш прослеживается определенная цикличность с затуханием размаха колебаний, которые вызваны антропогенными воздействиями.

Далее используем прием скользящих средних с различными периодами осреднения: 11, 22 и 33 летних периода (рис. 5). Как видно из рисунка, длина первой гармоники по максимальным величинам составляет 54 года, а по минимальным — 64 года, а для второй гармоники эти длины равны 42 и 40 лет соответственно. Для модельных рядов с периодом осреднения 11 лет длина первой гармоники по максимальным величинам составляет 58 лет, по минимальным — 63 года; при 22 летнем осреднении 58 и 56 лет соответственно; при 33 летнем осреднении 54 и 44 года соответственно. При этом как для реальных уровней воды, так и модельных уровней наблюдается уменьшение амплитуды колебаний уровней и сокращается длина гармоники.



Рисунок 4. Разностная интегральная кривая среднегодовых уровней воды озера Балхаш

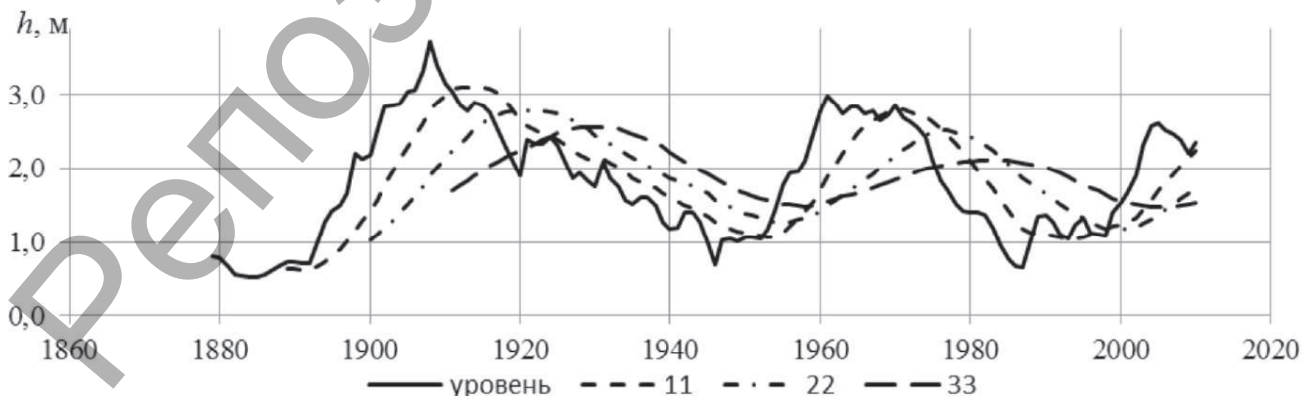


Рисунок 5. Хронологический ход среднегодовых уровней воды озера Балхаш и скользящие средние с различными периодами осреднения

На следующем этапе исследования периодичности в колебаниях среднегодовых уровней воды озера Балхаш использованы более сложные модели. Была испытана полиномиальная модель 6-го порядка. Модель удовлетворительно описывает наблюдаемые уровни (коэффициент

корреляции $r = 0,80$), учитывает неравномерность амплитуды колебания и длины лага. Главным недостатком данной модели является заниженная амплитуда колебания и большая сглаженность отдельных колебаний, что в значительной степени упрощает реальную картину колебаний

уровня воды (рис. 6). Модель колебания уровней воды с использованием преобразования Фурье (рис. 6) в значительной степени приблизилась к реальному ходу, коэффициент корреляции $r = 0,87$. Главным недостатком данной модели является постоянность амплитуды колебаний и длины лага. В действительности, в силу антропогенных воздействий, амплитуда и длина лага уменьшаются. Поэтому в модель разложения в ряды Фурье введены соответствующие коэффициенты. Это позволило несколько улучшить представление хода уровней воды с помощью модели ($r = 0,89$). В табл. 4 приведены статистические параметры исходного ряда и полученных моделей.

Главный недостаток полученных моделей заключается в том, что они сужают диапазон возможных колебаний

и сглаживают колебания с короткими периодами. Модель Фурье (уточненная) в большей степени отражает реальную картину колебаний уровней воды.

Анализ выборочной АКФ колебаний уровней воды озера показал наличие устойчивых циклов (рис. 7). Коэффициенты автокорреляции носят синусоидальный характер. Статистически значимые положительные значения коэффициентов корреляции имеют место при $\tau = 1 - 7$; 28–40 и отрицательные — при $\tau = 11-23$; 44–58. ЧАКФ имеет значимые коэффициенты корреляции при $\tau = 1$ и $\tau = 2$, причём они имеют разные знаки, т. е. находятся в антифазе колебаний. Можно отметить, что и при $\tau = 11$ коэффициент корреляции также значим и имеет отрицательное значение.

Таблица 4. Статистические параметры наблюдаемых и смоделированных временных рядов уровней воды озера Балхаш

Параметры	Ряды		
	Исходный ряд	Модель Фурье	Модель Фурье (уточненная)
h_{cp} , м	1,82	1,82	1,82
C_v	0,44	0,38	0,39
C_s	0,15	0,19	0,08
h_{max} , м	3,71	2,93	3,07
h_{min} , м	0,52	0,86	0,56
Размах, м	3,19	2,07	2,51

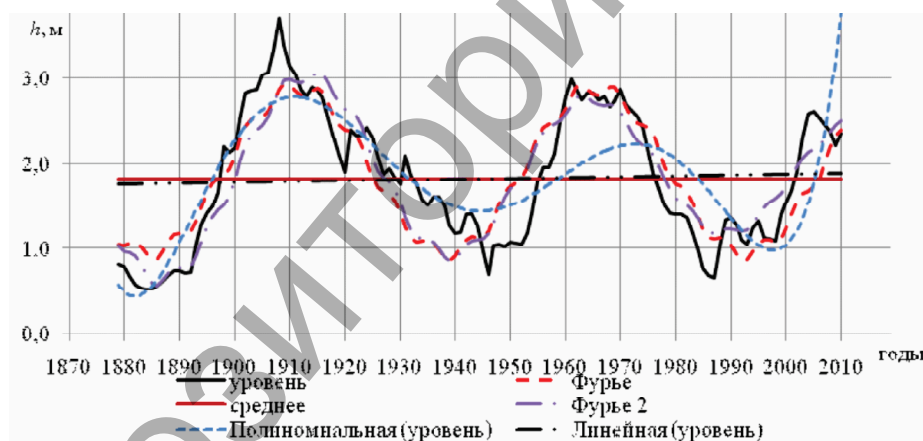


Рисунок 6. Хронологический ход среднегодовых уровней воды озера Балхаш и их модельное представление

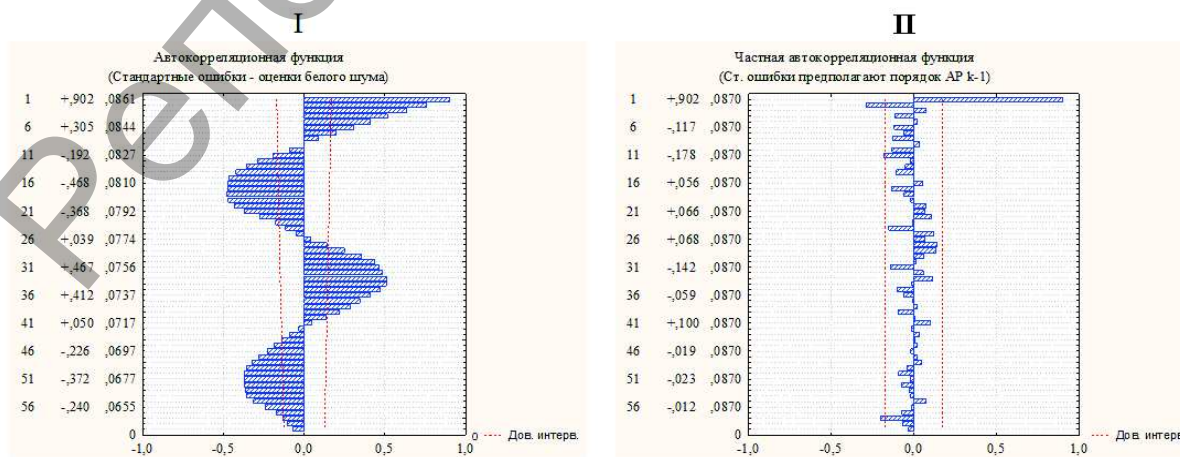


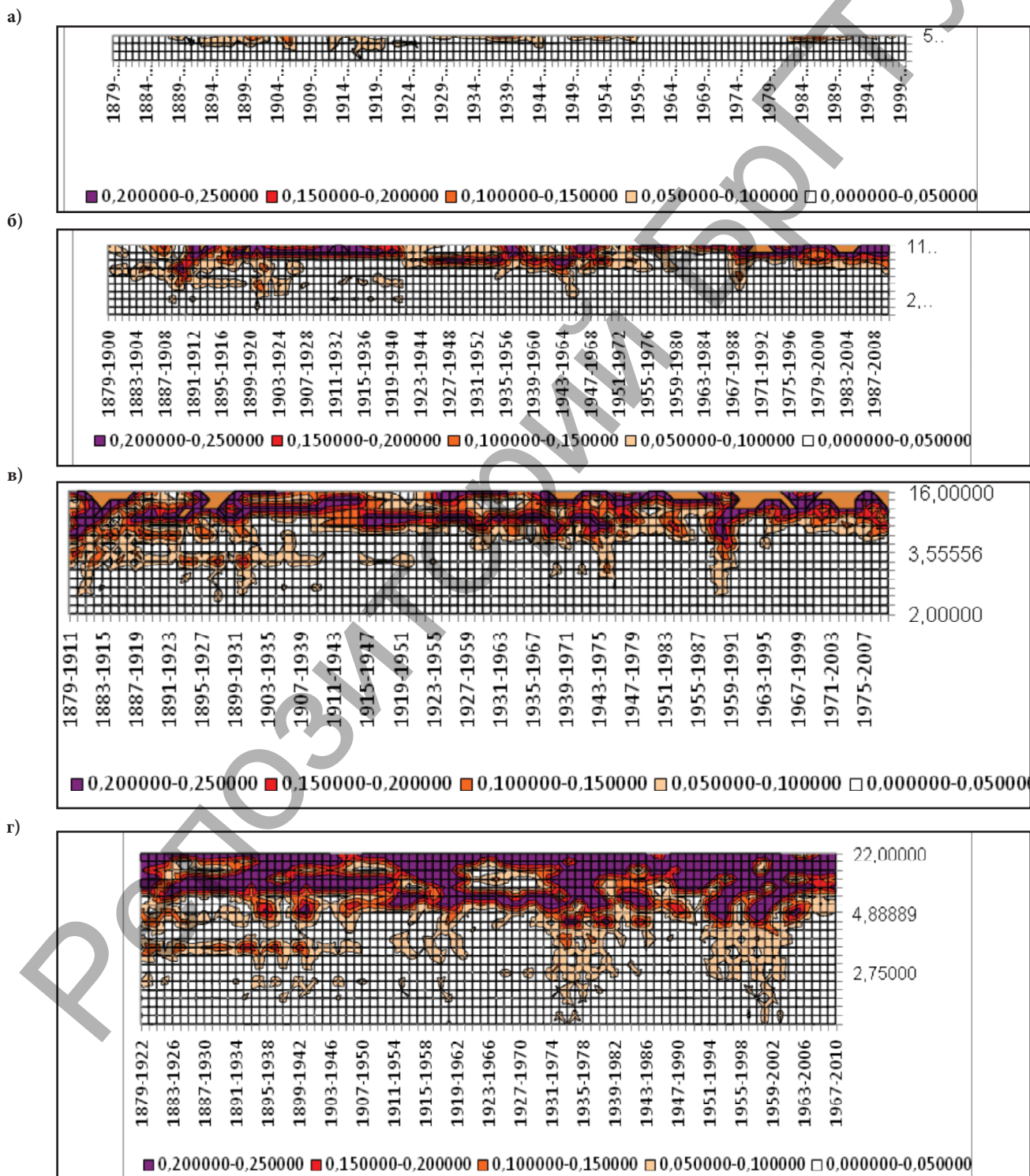
Рисунок 7. Автокорреляционная функция (I) и частная автокорреляционная функция (II) среднегодовых уровней воды озера Балхаш

СВАН-анализ временного ряда среднегодовых уровней воды озера Балхаш выполнен с длиной временного окна 11, 22, 33 и 44 года. С помощью данного анализа удалось выделить и дать количественную оценку длинно-периодических колебаний уровней воды озера Балхаш, в частности обосновать 54-летний сдвиг, который использован при построении модели Фурье (рис. 8).

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 рассматриваемые методы дают сравнимые результаты, использование принципа цикличности (квазипериодичности) при анализе и прогнозе многолетних колебаний среднегодовых уровней воды озера Балхаш допустимо.



а) 11 лет; б) 22 года; в) 33 года; г) 44 лет

Рисунок 8. СВАН-диаграммы временных рядов среднегодовых уровней воды озера Балхаш с временными окнами

Исходя из вышесказанного, фоновую составляющую ($H_{\phi}(t)$) в формировании среднегодовых уровней воды озера Балхаш удалось установить, с достаточной для практики точностью, с помощью модели разложения в ряд Фурье с переменной амплитудой колебания, которая имеет вид:

$$H_{\phi}(t) = 1,90767 + 1,11841 \cdot \cos(0,938522 \cdot (t - 1878)) - 1,18471 \cdot \cos(0,938706 \cdot (t - 1878)) + (0,004 \cdot (t - 1878) - 0,666009) \cdot \cos(2\pi \cdot (t - 1878) / 54 - 0,03 \cdot (t - 1878)) - 2,00086 \cdot \sin(0,938522 \cdot (t - 1878)) + 1,93561 \cdot \sin(0,938706 \cdot (t - 1878)) + (0,004 \cdot (t - 1878) - 1,1366) \cdot \sin(2\pi \cdot (t - 1878) / 54 - 0,03 \cdot (t - 1878)).$$

Хронологический ход $\pm\Delta H_{\Delta}(t)$, определенной как разница между наблюдаемыми и смоделированными уровнями воды озера по модели (10), представлена на рис. 9.

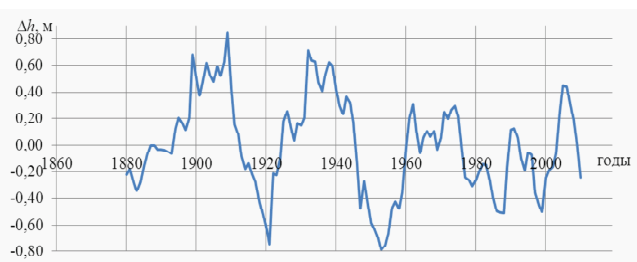


Рисунок 9. Хронологический ход $\pm\Delta H_{\Delta}(t)$

В связи с тем, что тренд явно не выражен, воспользуемся совместным анализом выборочных АКФ и ЧАКФ данного процесса (рис. 7), с помощью которых определяем характер изменения среднегодовых уровней воды. При этом используем рекомендации, приведенные в табл. 1. В нашем случае АКФ синусоидально затухает, а ЧАКФ имеют значительную величину при $\tau = 1, 2$ и 11 , тогда как все остальные значения их ординат статистически незначимы и характеризуются чередованием положительных и отрицательных значений (рис. 7). Следовательно, рассматриваемый процесс колебаний уровней воды озера может быть идентифицирован авторегрессионной моделью третьего порядка. Статистически значимыми и включенными в модель являются $\tau = 1, 2$ и 11 . Это служит основанием для описания среднегодовых уровней воды озера в виде сложной цепи Маркова сдвигом до 11 лет. На основании анализа цикличности во временных рядах с помощью АКФ и ЧАКФ удалось построить прогнозную модель, позволяющую дать оценку динамики процесса с заблаговременностью в 1 год, т. е.

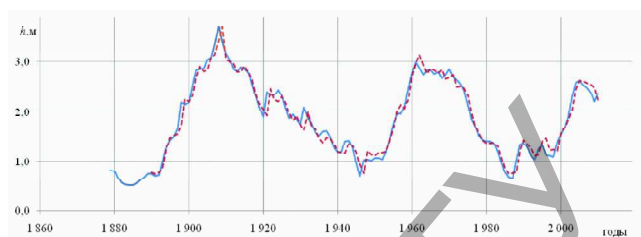
$$h(t + 1) = 0,000652 + 1,114119 \cdot h(t) - 0,243828 \cdot h(t - 1) - 0,098143 \cdot h(t - 10),$$

где $h(t + 1)$ – прогнозируемый уровень воды в последующем году, м; $h(t), h(t - 10)$ – уровни воды в озере за предшествующий год и уровень воды в $(t - 10)$ -й год.

Коэффициент корреляции модели $R = 0,92$.

При прогнозировании уровней воды озера нами дополнительно учитывались два фактора: прогнозное значение не должно быть больше (меньше) соответствующего максимального (минимального) значения; изменение прогнозируемых величин ($h(t + 1) - h(t)$) не должно быть больше наблюдаемых. Результаты пошагового моделирования представлены на рис. 10. Хорошее совпадение наблюдаемых и смоделированных значений уровней воды озера Балхаш свидетельствуют о корректности используемой модели. Графическая интерпретация результатов моделирования представлена на рис. 11. Так, в диапазон $\pm 5\%$ попало 49,6% всех точек, в 10% – 80,2%, в 15% – 91%, в 20% – 93,4%, в 25% – 97,5%, в 30% – 99,2%.

терпретация результатов моделирования представлена на рис. 11. Так, в диапазон $\pm 5\%$ попало 49,6% всех точек, в 10% – 80,2%, в 15% – 91%, в 20% – 93,4%, в 25% – 97,5%, в 30% – 99,2%.



Сплошная линия – наблюдаемые средние значения уровней воды; пунктирная линия – модельные значения

Рисунок 10. Годовой ход колебаний уровня воды озера Балхаш

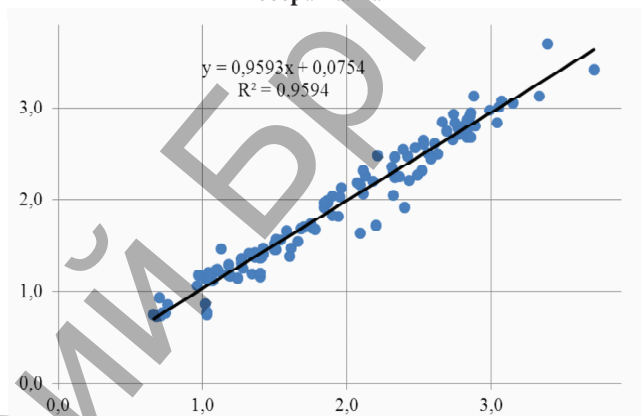


Рисунок 11. Фактические и прогнозные уровни воды озера Балхаш

Значение основных статистических характеристик временных рядов наблюдаемых и смоделированных годовых уровней воды Балхаш представлен в табл. 5. Незначительное расхождение статистических параметров свидетельствует о корректности и практической значимости предлагаемой методики моделирования годовых уровней воды озера Балхаш.

В заключение проведено тестирование предлагаемой методики на независимом материале, т. е. уровнях воды озера за период с 2011 по 2015 гг., которые не использовались в анализе и построении прогнозных моделей.

Алгоритм прогнозирования уровней воды озера с дискретностью в один год состоит из следующих шагов:

- принимаем за ноль-графика отметку 340 м и переходим к условным уровням по зависимости $h_i = H_i - 340$;
- используя данные наблюдений за период наблюдений с 1879 по 2010 гг., моделируем фоновую составляющую ($h_{\phi}(t)$) с помощью разложения в ряд Фурье с переменной амплитудой колебания (по формуле (3)), которая имеет вид уравнения (10);
- определяем разницу между наблюдаемыми уровнями воды озера и фоновыми значениями $\pm\Delta h_{\Delta}(t)$;
- по результатам анализа цикличности с помощью АКФ и ЧАКФ подбираем прогнозную модель уравнения (11);
- используем формулу (1), получаем прогнозное значение уровня воды в озере для будущего года;
- вычисляем величину изменения уровня и сравниваем с наблюдаемыми. Если эти изменения превышают

абсолютные значения исследуемого ряда, принимаем максимальные значения;

— включаем полученное значение в исследуемый ряд и повторяем процедуру, начиная со второго пункта.

Используя приведенную методику и алгоритм расчета, получили прогнозные значения уровней воды озера Балхаш за период с 2011 по 2015 гг., которые представлены в табл. 6.

Таблица 5. Статистические параметры наблюдаемых и смоделированных временных рядов уровней воды озера Балхаш за период с 1890 по 2010 гг.

Параметры	Ряды		
	наблюдённый	смоделированный	расхождение
h_{cp} , м	1,92	1,92	0
C_v	0,38	0,38	0
C_s	0,15	0,20	0,05
$r(1)$	0,97	0,96	-0,01
$r(t)$	-0,21	-0,17	0,04
h_{max} , м	3,71	3,69	-0,02
h_{min} , м	0,66	0,74	0,08
Размах, м	3,05	2,96	-0,09

Таблица 6. Измеренные и прогнозные значения среднегодовых уровней воды озера Балхаш за период с 2011 по 2015 гг.

Годы	Абсолютные уровни, м		Уровни относительно ноль-графика, м				
	измеренные	прогнозные	прогнозные	фоновые	локальные	Ошибка прогноза	
						абсолютная, м	относительная, %
2011	342,74	342,42	2,42	2,50	-0,08	-0,32	-11,5
2012	342,79	342,80	2,80	2,49	0,31	0,01	0,28
2013	342,50	342,76	2,76	2,47	0,29	0,26	10,5
2014	342,27	342,42	2,42	2,49	-0,07	0,15	6,41
2015	342,15	342,22	2,22	2,51	-0,29	0,07	3,14

Полученные результаты показывают приемлемые для практики результаты, а методика исследования и алгоритм прогнозирования могут использоваться для анализа динамики уровней воды других озер.

Выводы. Проведенная оценка степени однородности основных статистических характеристик временных рядов уровней воды озера Балхаш за период инструментальных наблюдений позволяет сделать вывод о наличии статистически значимых изменений в динамике среднегодовых уровней воды, обусловленных как естественно-климатическими, так и антропогенными изменениями гидрологического цикла. 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 озера с заблаговременностью в один год. Вся сложность построения прогнозных моделей заключается в их индивидуальности, наличия боль-

шого объема исходной информации и невозможности оперативной оценки полученных результатов. Кроме того, неоднородность временных рядов уровней воды в озере создает дополнительные трудности.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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

Материал поступил в редакцию 05.05.17

VOLCHAK A.A. Modeling of big lakes water level fluctuation. The case study of Balhash lake

Results of Balhash lake annual water levels analysis for the period of instrumental observation (1879-2010) are presented. Algorithm and method of water level forecast with one year advancement was developed. Method testing on the independent data showed good correlation between calculated and observed levels.