

УДК 556.048(574)

Доктор техн. наук	М.Ж. Бурлибаев ¹
Доктор геогр. наук	А.А. Волчек ²
PhD	Д.М. Бурлибаева ³

КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ ОЗЕРА БАЛКАШ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

Ключевые слова: прогнозная модель, тренд, ряд Фурье, статистические параметры, независимый материал

Проведенная оценка степени однородности основных статистических характеристик временных рядов уровней воды оз. Балкаш за период инструментальных наблюдений, позволяет сделать вывод о наличии статистически значимых изменений в динамике среднегодовых уровней воды обусловленных как естественно-климатическими, так и антропогенными факторами гидрологического цикла. Показана возможность построения прогнозных моделей уровня воды озера с заблаговременностью в один год.

Введение. Озера являются уникальными водными объектами и имеют важное экономическое и экологическое значение. В Республике Казахстан имеется 48 262 озера, из которых 45 248 имеют площадь менее 1 км². Крупных озёр с площадью более 100 км² – 21. По территории Казахстана озёра расположены неравномерно. На северный Казахстан приходится 45 % всех озёр, на центральный вместе с южным – 36 %, в остальных регионах находится только 19 %. Общая поверхность озёр Казахстана достигает – 45 тыс. км². Общий объём воды – 190 км³. Они служат накопителями 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 озёр Казахстана и в ряде случаев существенную. Поэтому появи-

¹ Казахское агентство прикладной экологии, г. Алматы, Казахстан;

² Брестский государственный технический университет, Беларусь;

³ Институт географии МОН РК, г. Алматы, Казахстан

лась 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 озера требуются при решении ряда гидрологических и водохозяйственных задач [5, 7].

Целью настоящей работы является анализ временного ряда уровней воды оз. Балкаш (Балхаш) для выявления закономерностей в их колебании, количественной оценки трансформации гидрологического режима озерной экосистемы и построении прогнозных моделей.

Исходные материалы и методы исследования. Материалом для исследования послужили данные многолетних инструментальных наблюдений за уровнем воды оз. Балкаш, выполненные РГП «Казгидромет» Министерства энергетики Республики Казахстан.

Объектом изучения является оз. Балкаш, имеющее большое хозяйственное и природоохранное значение. Балкаш – бессточное полупресноводное озеро в Балкаш-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 Балкаш-

Алакольскому водохозяйственному бассейну и расположено сразу в трёх областях Казахстана: Алматинской, Жамбылской и Карагандинской.

Площадь озера составляет примерно 16,4 тыс. км² (2000 г.), что делает его самым крупным из озёр, целиком расположенных на территории Казахстана. Балкаш лежит на высоте примерно 340 м над уровнем моря и имеет форму полумесяца. Его длина составляет примерно 600 км, ширина изменяется от 9 до 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.



Рис. 1. Вид на озеро Балкаш. Снимок NASA, август 2002 г. 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 Бесарал и Ортаарал; 7 – остров Тасарал; 8 – залив Шемпек; 9 – залив Сарышаган.

Котловина озера состоит из нескольких маленьких впадин. В западной части Балкаша 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 Балкаша. Глубина впадины восточного Балкаша 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.

Балкаш-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, поступающих с территории КНР. Площадь водосборного бассейна только озера Балкаш 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 Балкаш-Алакольского бассейна 86 % приходится на оз. Балкаш, сток р. Иле (Или) составляет до 12,3 км³/год. Иле, впадающая в западную часть озера, даёт 73...80 % всего притока воды. Другие реки, Каратал, Лепсы, Аягуз, Тентек, Коксу и Аксу приносят 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 [5, 7].

Климат окрестностей Балкаша 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 составляет от 950 мм, а в засушливые достигает 1200 мм. Балкаш является теплым, хорошо прогреваемым озером. Температура воды на его поверхности колеблется от 0 °С в декабре 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 суток [5, 7].

Факторы, влияющие на формирование уровневого режима воды озер 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 [1-4, 6]:

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

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, м;
 $\pm \Delta H_{\lambda}(t)$ – вклад в формирование уровня озера локальных факторов, м.

Влияние глобальных факторов на формирование уровня 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. 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 уровня озера может быть представлена в виде [4]:

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

где $a_0 = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(t) dx$, $a_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cdot \cos(n \cdot t) dx$, $b_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cdot \sin(n \cdot t) dx$,
 $n = 1, 2, 3, \dots$ – коэффициенты ряда (коэффициенты Фурье).

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.

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

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

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

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 $\Delta H_{\lambda}(t)$, 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). Все 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 $\varphi_i(t) \dots \varphi_k(t)$ – 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 озер. При этом используются следующие критерии оценки степени нестационарности процесса и выбора модели [1, 2] приведенные в табл. 1.

Таблица 1
Критерии нестационарности процесса и выбора модели [1, 2]

АКФ	ЧАКФ	Вид модели
Экспоненциально затухает	Высокое значение лишь при $\tau = 1$	(АР(1)) авторегрессия первого порядка

АКФ	ЧАКФ	Вид модели
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 осциллирующие	(АР СС(1)) авторегрессия и скользящее среднее первого порядка

Вклад случайной составляющей в динамику формирования уровня 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 стандартные 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 воды озера практически неограниченной длины.

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:

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

$$F = \frac{\hat{\sigma}_x^2}{\hat{\sigma}_y^2}; \quad (9)$$

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.

Полученные значения критерия Стьюдента (t) и критерия Фишера (F) сравнивались 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 АКФ и 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 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 оз. Балкаш за время инструментальных наблюдений охватывает период продолжительностью 132 года, с 1879 по 2010 гг. (рис. 2). Временной ход колебаний уровня воды носит циклический характер. Среднее значение уровня воды за период наблюдений составило $H_{cp.} = 341,8$ 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.

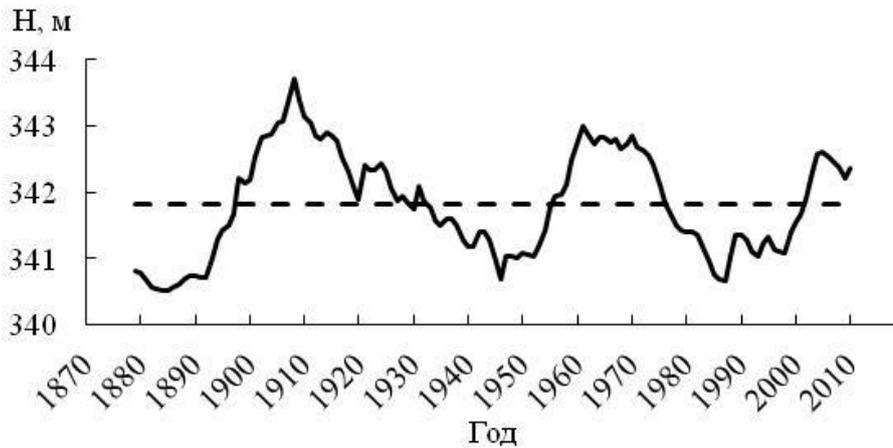


Рис. 2. Многолетний ход колебаний уровня вод оз. Балкаш. Пунктиром показано среднее многолетнее значение.

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 5 по 10 век, а максимум уровня воды наблюдался с 13 по 17 век. В начале 20 века и в период с 1958 по 1969 год площадь озера увеличивалась до 18...19 тыс. км², а во время засух, например, в конце 19 века, а также в 30-х и 40-х годах 20 века, озеро сокращалось 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. Иле в 1970 г. была построена плотина Капшагайской ГЭС, образовавшая Капшагайское водохранилище. При заполнении этого резервуара водный баланс Балкаша 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, т.е. 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 м) был зафиксирован в 1987 г. после окончания заполнения Капшагайского 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 ноль-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 уровня воды оз. Балкаш 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 уровня, выделено 5 интервалов, а именно: 1879...1908 гг., 1909...1946 гг., 1947...1961 гг., 1962...1987 гг., 1988...2010 гг., а также период инструментальных наблюдений 1879...2010 гг. Динамика уровня 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) уровня воды (табл. 2).

Таблица 2

Основные статистические параметры среднегодовых уровней воды оз. Балкаш за различные периоды осреднения

Период осреднения, год	$h_{cp.}$, м	Коэффициент				
		C_v	C_s	$r(1)$	r	$\Delta h \cdot м/10 лет$
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: Жирным выделены статистически значимые коэффициенты корреляции.

Анализ однородности уровней воды за различные интервалы. Рассмотрим устойчивость выборочных статистик (средних, коэффициентов вариации) при изменении интервалов осреднения применительно к среднегодовым уровням воды оз. Балкаш за период инструментальных наблюдений

ний. 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.

Таблица 3

Эмпирические значения критерия Стьюдента (t) и критерия Фишера (F) для различных интервалов осреднения

	Интервал 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: Жирным выделены эмпирические критерии выше пороговых.

В результате анализа 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. 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 необходимо рассматривать концепцию цикличности. Сложность в использовании циклов для прогноза уровня режима озер заключается в их апериодичности, 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.

Анализ колебаний уровня воды оз. Балкаш начнем с использованием разностных интегральных кривых, так как они дают наглядное представление о характере колебаний (рис. 3). На рис. 3 в колебаниях среднегодовых уровней воды Балкаша прослеживается определенная цикличность с затуханием размаха колебаний, которые вызваны антропогенными воздействиями.

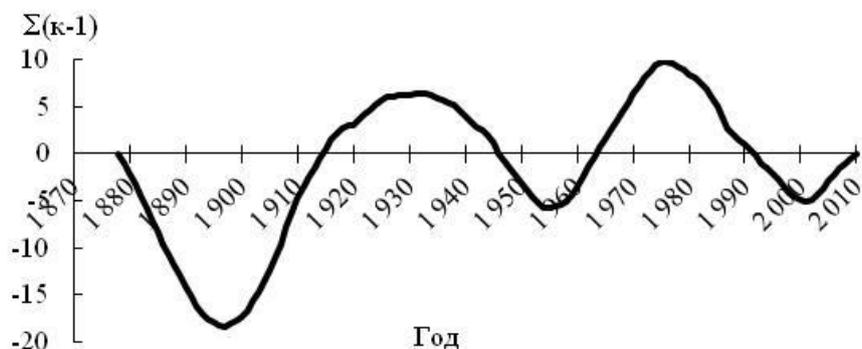


Рис. 3. Разностная интегральная кривая среднегодовых уровней воды озера Балкаш.

Далее используем прием скользящих средних с различными периодами осреднения: 11, 22 и 33 года (рис. 4). Как видно 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 сокращение длины гармоник.

На следующем этапе исследования периодичности в колебаниях среднегодовых уровней воды оз. Балкаш использованы более сложные модели. Была испытана полиномиальная модель 6 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. Модель колебания уровней

воды с использованием преобразования Фурье 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 ($r = 0,89$). В табл. 4 приведены статистические параметры исходного ряда и полученных моделей.

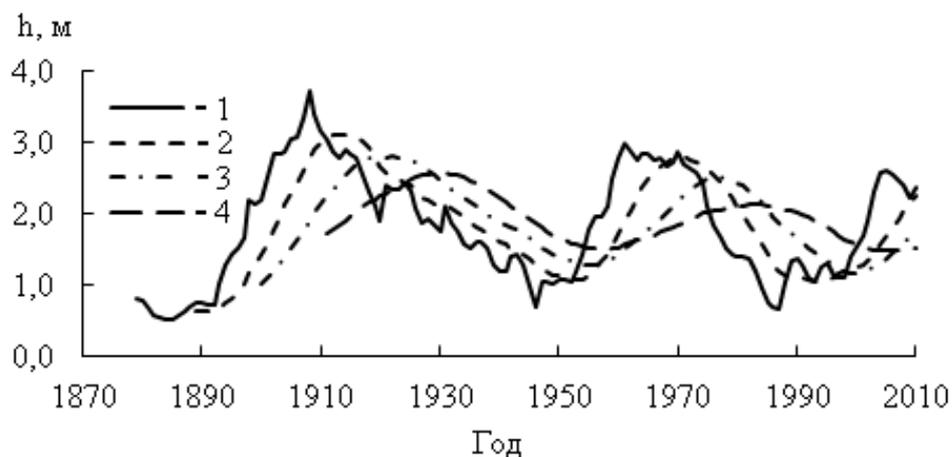


Рис. 4. Хронологический ход среднегодовых уровней воды оз. Балкаш и скользящие средние с различными периодами осреднения. 1 – уровень озера, 2 – 11-летний период осреднения, 3 – 22-летний период осреднения, 4 – 33-летний период осреднения.

Таблица 4

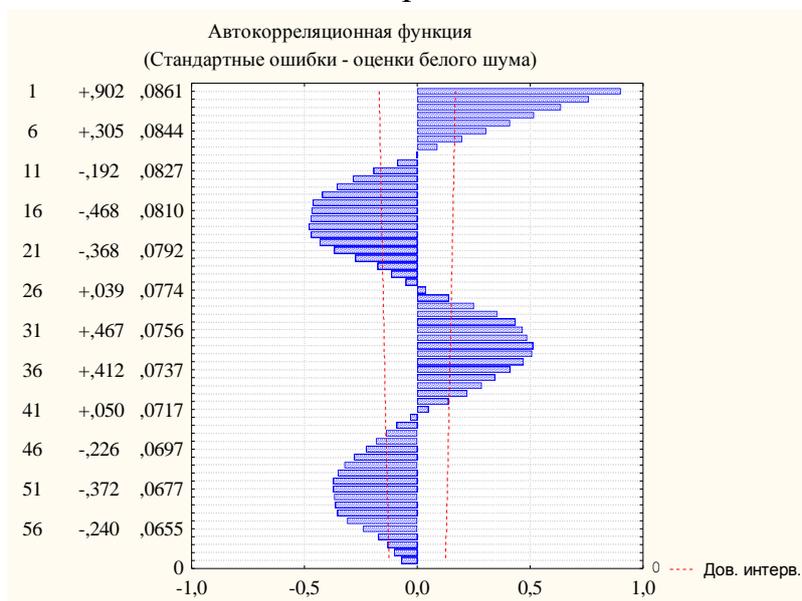
Статистические параметры наблюдаемых и смоделированных временных рядов уровней воды озера Балкаш

Параметр	Ряд		
	исходный	модель Фурье	модель Фурье (уточненная)
$h_{ср.}$, 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

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 уровня воды.

Анализ выборочных АКФ показал наличие устойчивых циклов (рис. 5). Коэффициенты автокорреляции носят синусоидальный характер.

I



II

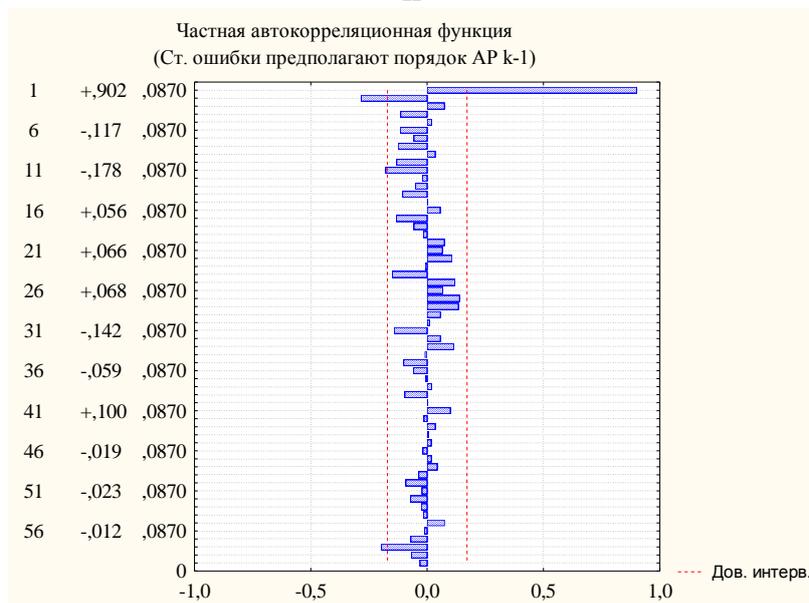


Рис. 5. Автокорреляционная функция (I) и частная автокорреляционная функция (II) среднегодовых уровней воды оз. Балкаш.

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 $\tau = 2$, причем 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.

СВАН-анализ временного ряда среднегодовых уровней воды оз. Балкаш выполнен с длиной временного окна 11, 22, 33 и 44 года. С помощью данного анализа удалось выделить и дать количественную оценку длиннопериодических колебаний уровня, в частности обосновать 54 летний сдвиг, который использован при построении модели Фурье.

Как показала практика применение спектрального анализа 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 оз. Балкаш допустимо.

Построение прогнозных моделей. Исходя из вышесказанного, фоновую составляющую ($H_{\phi}(t)$) в формировании среднегодовых уровней воды оз. Балкаш удалось представить, с достаточной для практики точностью, с помощью модели разложения в ряд Фурье с переменной амплитудой колебания:

$$\begin{aligned}
 h_{\phi}(t) = & 1,90767 + 1,11841 \cdot \cos(0,938522 \cdot (t-1878)) - 1,18471 \cdot \cos(0,938706 \cdot (t-1878)) + \\
 & + (0,004 \cdot (t-1878) - 0,666009) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (t-1878)}{54 - 0,03 \cdot (t-1878)}\right) - 2,00086 \cdot \sin(0,938522 \cdot (t-1878)) + \\
 & + 1,93561 \cdot \sin(0,938706 \cdot (t-1878)) + (0,004 \cdot (t-1878) - 1,1366) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (t-1878)}{54 - 0,03 \cdot (t-1878)}\right).
 \end{aligned} \tag{10}$$

Хронологический ход $\pm \Delta H_{\phi}(t)$ определенной как разница между наблюдаемыми и смоделированными уровнями воды по формуле (10), представлен на рис. 6.

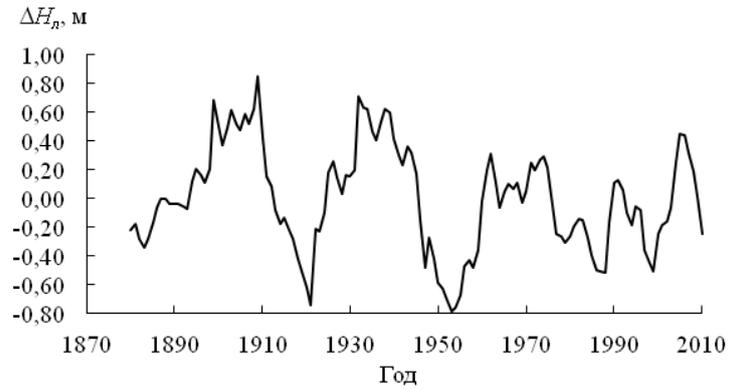


Рис. 6. Хронологический ход $\pm\Delta H_n(t)$.

В связи с тем, что тренд явно не выражен, воспользуемся совместным анализом выборочных АКФ и ЧАКФ данного процесса (рис. 5), 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. 5). Следовательно, рассматриваемый процесс колебания 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 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.:

$$h(t+1) = 0,000652 + 1,114119 \cdot h(t) - 0,243828 \cdot h(t-1) - 0,098143 \cdot h(t-10), \quad (11)$$

где $h(t+1)$ – прогнозируемый уровень воды в последующем году, м; $h(t)$, $h(t-10)$ – уровни воды в предшествующем году и уровень воды в $(t-10)$ -ом году.

Коэффициент корреляции модели $r = 0,92$.

При прогнозировании уровня воды авторами 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. Хорошее совпадение наблюдаемых и смоделиро-

ванных значений уровня свидетельствуют о корректности используемой модели. Графическая интерпретация результатов моделирования представлена на рис. 7. Так в диапазон $\pm 5\%$ попало 49,6 % всех точек, в 10 % – 80,2 %, в 15 % – 91,0 %, в 20 % – 93,4 %, в 25 % – 97,5 %, в 30 % – 99,2 %.

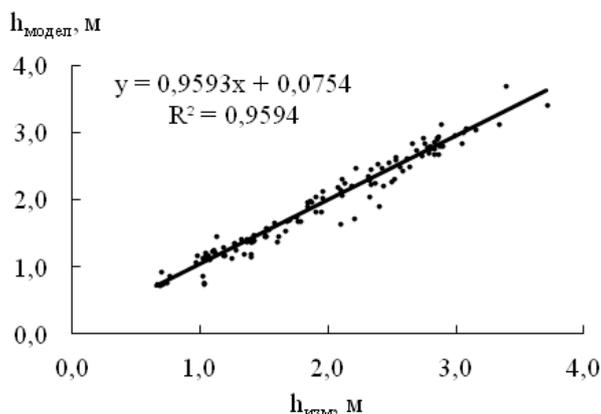


Рис. 7. Фактические и прогнозные уровни воды оз. Балкаш.

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

Таблица 5

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

Параметр	Ряд		
	наблюденный	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

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 уровня воды 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 1879...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 и фоновыми значениями $\pm \Delta H_d(t)$;
- по результатам анализа цикличности с помощью АКФ и ЧАКФ подбираем прогнозную модель уравнение (11);
- используем формулу (1), получаем прогнозное значение уровня воды в озере для будущего года;
- вычисляем величину изменения уровня и сравниваем с наблюдаемым. 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, получены прогнозные значения уровня воды озера Балхаш за период с 2011 по 2015 гг., которые представлены в табл. 6.

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

Год	Абсолютные уровни, м		Уровни относительно ноль-графика, м			Ошибка прогноза	
	измеренные	прогнозные	прогнозные	фоновые	локальные	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

Год	Абсолютные уровни, м		Уровни относительно ноль-графика, м			Ошибка прогноза	
	измеренные	прогнозные	прогнозные	фоновые	локальные	абсолютная, м	относительная, %
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 оз. Балкаш 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 уровня воды 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 уровня воды озера с заблаговременностью в один год. Вся сложность построения прогнозных моделей заключается в их индивидуальности, наличии большого объема исходной информации и невозможности оперативной оценки полученных результатов. Кроме того, неоднородность временных рядов уровня воды в озере создает дополнительные трудности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление – М.: Мир, 1974. Вып. 1. – 406 с.
2. Исмайылов Г.Х., Федоров В.М. Анализ многолетних колебаний годового стока Волги // Водные ресурсы. – 2001. – Т. 28. – №5. – С. 517-525.
3. Логинов В.Ф., Волчек А.А. Изменение испарения с водной поверхности на территории Белоруссии // География и природные ресурсы. – 2005. – №2. – С. 137-144.

4. Логинов В.Ф., Волчек А.А., Волобуева Г.В. Изменение ветрового режима на территории Беларуси в 20 в. // Природные ресурсы. – 2005. – №4. – С. 5-12.
5. Проблемы гидроэкологической устойчивости в бассейне озера Балхаш. / Под ред. Самаковой А.Б. – Алматы, «Каганат», 2003. – 584 с.
6. Раткович Д.Я. Многолетние колебания речного стока – Л.: Гидрометеоздат, 1976. – 255 с.
7. Современное экологическое состояние бассейна озера Балхаш. / Под ред. Кудекова Т.К. – Алматы: «Каганат», 2002. – 388 с.

Поступила 27.04.2017

Техн. ғылымд. докторы	М.Ж. Бурлибаев
Геогр. ғылымд. докторы	А.А. Волчек
PhD	Д.М. Бурлибаева

КЛИМАТТЫҢ ӨЗГЕРУ ЖАҒДАЙЫНДА ДЕҢГЕЙІНІҢ АУЫТҚУЫ БАЛҚАШ КӨЛІ

Түйінді сөздер: болжалды моделі, Фурье қатарына тренд, статистикалық параметрлері, тәуелсіз материалдық

Уақыт сериясы көл су деңгейінің негізгі статистикалық сипаттамаларын біртектілігі дәрежесін бағалау. Аспаптық жазба Балқаш, гидрологиялық цикл екі табиғи-климаттық және антропогендік факторларға байланысты орташа жылдық су деңгейінің динамикасы статистикалық маңызды өзгерістер болуын ұсынады. Бір жыл қорғасын уақыт көл су деңгейінің болжамды модельдерін құру мүмкіндігі.

Burlibayev M.ZH., Volchek A.A., Burlibayeva D.M.

FLOWING OF THE WATER LEVEL OF LAKE BALKHASH IN THE CONDITIONS OF A CHANGING CLIMATE

Keywords: forecast model, trend, Fourier series, statistical parameters, independent material

The evaluation of the degree of homogeneity of the basic statistical characteristics of the time series of water levels in Lake Baikal. Balkash during the period of instrumental observations allows us to conclude that there are statistically significant changes in the dynamics of average annual water levels caused by both natural climatic and anthropogenic factors of the hydrological cycle. The possibility of constructing predicted models of the lake water level with a lead time of one year is shown.