

УДК 556.048

О МОДЕЛИРОВАНИИ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ ОЗЕРА ЧАНЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЕГО ГИДРОЛОГИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ

© 2012 г. М.В. Болгов¹, Е.А. Коробкина²

¹Институт водных проблем Российской академии наук, Москва

²Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Ключевые слова: бессточное озеро, уровень воды, стохастическое моделирование, водный баланс, Марковские процессы.

Рассмотрена возможность вероятностного прогнозирования уровня режима озера Чаны на основе стохастических моделей колебаний основных компонент его водного баланса (осадки, сток, испарение). Методом имитационных экспериментов получены оценки параметров распределений уровня воды в озере в естественных условиях и после отделения части акватории системой дамб.



М.В. Болгов



Е.А. Коробкина

Введение

В пределах замкнутой области Обь-Иртышского междуречья располагается группа бессточных озер, среди которых наибольший интерес представляет оз. Чаны со своим своеобразным характером водного режима, выражающимся во внутривековых квазициклических колебаниях с периодами различной продолжительности. В отличие от других крупных систем внутреннего стока в пределах Центральной Азии, которые находятся в степной, полупустынной и пустынной зонах (оз. Убсу-Нур на границе Монголии с Тывой, Торейские озера на юге Забайкалья), оз. Чаны расположено на

Водное хозяйство России № 1, 2012

Водное хозяйство России

границе степной и лесостепной зон. Многолетние колебания его уровня отражают смены фаз повышенной и пониженной увлажненности значительной по площади территории Барабинской низменности, что позволяет рассматривать изменение уровней озера в качестве естественного индикатора увлажненности региона.

Проблема прогнозирования колебаний уровня режима «пульсирующего» оз. Чаны привлекает внимание исследователей в течение многих десятилетий. Проблема имеет и чисто научное и прикладное значение, поскольку водоем обладает огромным значением как источник биоресурсов и как важнейший элемент экологического каркаса обширной территории. Озеро имеет большое значение для региона как основа рыбного хозяйства и связанных с ним отраслей, а также природоохранное значение как место гнездования и остановки перелетных птиц. В 1995 г. озеро и прилегающая территория были внесены в список охраняемых водно-болотных угодий международного значения (Рамсарские угодья). Снижение уровня воды в озере и, как следствие, повышение его минерализации, неблагоприятно сказываются на воспроизводстве рыбных запасов – сокращаются нерестилища, усиливаются заморные явления.

Главным условием решения водохозяйственной проблемы оз. Чаны является поддержание оптимального с точки зрения рыбного, сельского и охотничье-промыслового хозяйства уровня солевого режима отдельных частей озерной системы. В предшествующие годы обсуждались различные варианты водохозяйственных мероприятий, направленных на стабилизацию уровня воды в озере, и был реализован проект, согласно которому от основной части озера системой дамб был отделен Юдинский плес в целях сокращения испарения за счет уменьшения площади водной поверхности озера и, тем самым, создания условий для повышения уровня воды.

Осуществление крупных водохозяйственных мероприятий на озере и его водосборе в целях управления его уровнем режимом требует знания закономерностей формирования водного баланса водоема для обоснования инженерных (управленческих) решений, основывающихся на прогнозах в вероятностной форме. Эффективным методом получения вероятностного прогноза является стохастическое моделирование уровня замкнутых водоемов на основе уравнения водного баланса и вероятностных моделей колебаний его составляющих.

Для разработки стохастической модели колебаний уровня озера выполнена оценка параметров, распределений, так называемых «побуждающих» процессов (речного стока, осадков на зеркало и испарения), и предложен метод моделирования искусственных реализаций для выполнения имитационных экспериментов, в ходе которых оцениваются последствия реализации различных мероприятий.

Характеристика объекта исследований

Бессточное оз. Чаны является самым большим по площади естественным водоемом Западной Сибири (рис. 1). Площадь водосборного бассейна озера равна 27 340 км², величина акватории в среднем составляет около 1500 км², глубины на разных участках колеблются от 1,4–1,9 (в юго-восточной части озера) до 4,8–8,5 м (оз. Яркуль) [1]. Размеры оз. Чаны не постоянны и меняются в зависимости от колебаний климатических факторов и внутривековых циклов увлажненности, а также в результате хозяйственного освоения прилегающей территории.

В XVII в. оз. Чаны с примыкавшими к нему озерами занимало обширную территорию площадью 10–12 тыс. км², в него впадали реки Карасук, Баган, Чулым и Каргат. В многоводные годы из озера наблюдался отток воды в р. Иртыш по древнему руслу р. Карасук и в нижерасположенные озерные депрессии. К началу XIX в. прекратился сток в озеро из рек Карасук и Баган и начался распад озер Чановской системы на отдельные водоемы. С тех пор оз. Чаны ограничено рамками современной котловины и имеет сложную конфигурацию, состоящую из нескольких частей – озер Большие Чаны, Яркуль и Малые Чаны. Озеро Большие Чаны представляет собой систему плесов, различающихся по минерализации воды, площади и глубинам, и соединенных протоками и мелководными участками; самые крупные Чиняихинский, Тагано-Казанцевский и Ярковский плесы. Озеро Яркуль соединяется с Чанами двумя каналами; оз. Малые Чаны соединено с Чиняихинским плесом прот. Кожурла [2].

С начала 50-х годов прошлого столетия на озере наблюдался спад уровня водной поверхности. Резкое падение уровня в 1967–1968 гг. и продолжающееся его понижение в последующие годы привели к сильному замору рыбы в озере, что потребовало принятия неотложных мер по регулированию уровня. С этой целью западный и самый большой по площади Юдинский плес в 1972 г. был отделен от основной части озера. Проблему падения уровня воды в озере это кардинально не решило, сам же Юдинский плес к настоящему времени практически высох. Однако отмечается, что утратив треть своей площади за счет отделения плеса (площадь озера сократилась на 700 км²), озеро стало более чувствительным к колебаниям общей увлажненности и режим уровня начал быстрее реагировать на текущие метеорологические и гидрологические процессы. Если ранее озеро проходило маловодную и многоводную фазы каждые 25–45 лет, то теперь в водном режиме обнаруживаются менее продолжительные (10–12-летние) группировки [2–4].

Данные наблюдений (гидрометеорологическая изученность)

На оз. Чаны в настоящее время стационарные наблюдения за уровнем ведутся на всех плесах Больших Чанов, за исключением Чиняихинского, а также на Малых Чанах и оз. Яркуль. Наиболее репрезентативным для всего озера является ряд уровней по посту Квашнино (Ярковский плес), наблюдения на котором ведутся с 1898 г. по настоящее время.

Одна из основных составляющих приходной части водного баланса озера – сток рек Каргат и Чулым, впадающих в озеро в его юго-восточной части. Общая площадь водосбора рек Каргат и Чулым – 17 900 км². Основное питание реки получают весной за счет талых снеговых вод и сток их отличается сильной межгодовой изменчивостью. Для оценки суммарного притока использовались данные по постам гидрологических наблюдений: р. Каргат – с. Здвинск, площадь водосбора 6440 км², расстояние до устья 36 км, годы наблюдений 1935, 1936, 1938, 1940–2000; р. Чулым – с. Старогорносталево, площадь водосбора 9610 км², расстояние до устья 110 км, годы наблюдений 1978–2000; р. Чулым – с. Ярки, площадь водосбора 8 850 км², расстояние до устья 170 км, годы наблюдений 1947, 1949–1980. Сток с площади водосбора озера ниже водомерных постов не превышает 7 %, что дает незначительную невязку в водном балансе и позволяет рассчитывать речной приток в оз. Чаны основываясь на суммарном стоке рек Чулым и Каргат [2].

Колебания увлажненности территории определяются многолетней изменчивостью атмосферных осадков. Для оценки среднегодовой величины осадков, выпавших на площадь озера, использовались наблюдения за 1971–2000 гг. по пяти метеостанциям, расположенным на берегах озера (Квашнино, Таган, Городище, Яркуль, Староярково). За период с 1936 по 1977 гг. ряды среднегодовых величин осадков были дополнены данными из [2].

Существенное влияние на уровень режим оз. Чаны оказывает испарение с его поверхности. Оценки испарения, выполненные различными авторами, сильно различаются в зависимости от применяемых методов расчета и исходных данных наблюдений, используемых в них [2, 5–7]. В данной работе в качестве величин испарения с поверхности озера приняты результаты расчетов за период 1971–2000 гг. по эмпирическим формулам [7].

Выборочная оценка коэффициента корреляции между притоком и осадками составляет 0,21. Коэффициенты парной корреляции между испарением и составляющими приходной части водного баланса (притоком и осадками) отрицательные – 0,17 и – 0,44, соответственно.

На рис. 2 представлены графики изменения компонент водного баланса по данным наблюдений (осадки, приток) и расчетов (испарение), а также уровни водной поверхности озера (по данным в/п Квашнино).

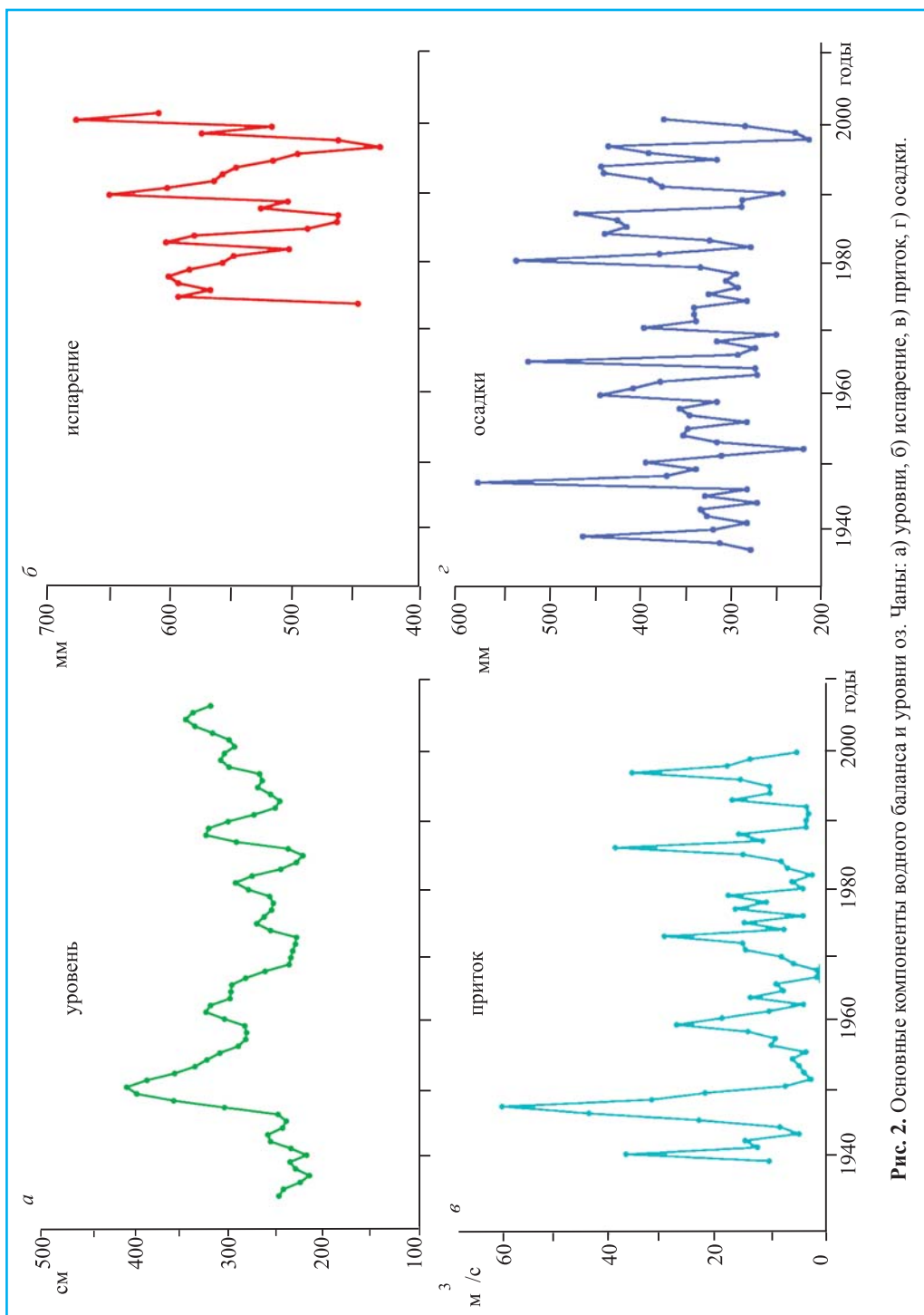


Рис. 2. Основные компоненты водного баланса и уровня оз. Чаны: а) уровень, б) испарение, в) приток, г) осадки.

Стохастическая модель колебания уровня замкнутых водоемов

Теория колебаний уровня замкнутых водоемов является достаточно развитым разделом гидрологии, но для практических целей весьма эффективным является имитационное моделирование колебаний уровня бессточных водоемов на основе уравнения водного баланса и вероятностных моделей колебаний его составляющих [8].

В бессточном водоеме вода, поступающая в виде речного притока и осадков, расходуется только на испарение с его поверхности, и уровень воды, вследствие этого, колеблется возле так называемого уровня тяготения – некоторого среднего уровня, отвечающего равенству среднесуточных величин притока и испарения. Колебания уровня воды бессточного водоема могут быть описаны с помощью известного уравнения водного баланса [9]:

$$\frac{dh}{dt} = v(t) / S(h) - e(t), \quad (1)$$

где $v(t)$ – приток воды в единицу времени;

$e(t)$ – слой видимого испарения;

$S(h)$ – площадь озера.

Применительно к рассматриваемой задаче разработаны методы линеаризации соответствующих уравнений водного баланса, позволяющие получать в аналитическом виде вероятностные характеристики многолетних колебаний уровня [10, 11]. Для случая оз. Чаны метод линеаризации урав-

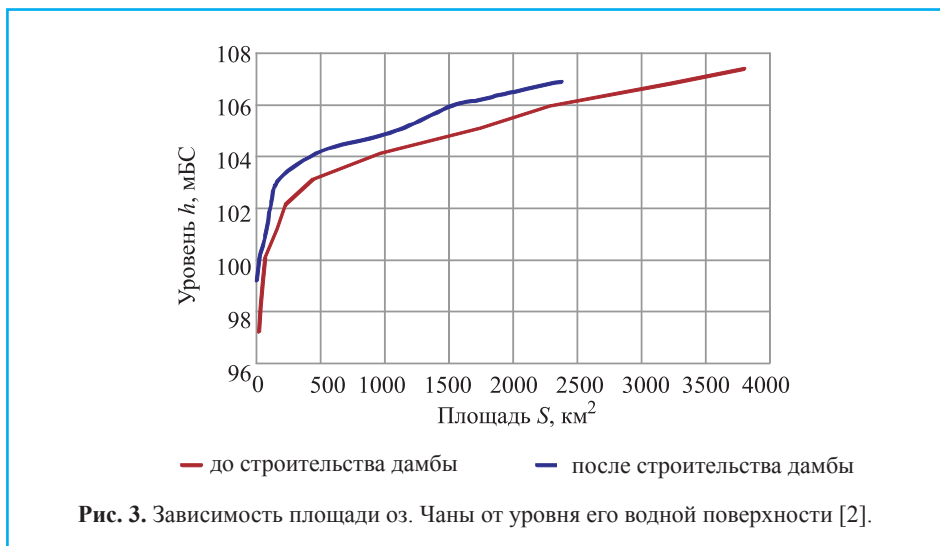


Рис. 3. Зависимость площади оз. Чаны от уровня его водной поверхности [2].

нения (1) оказывается неприменим в виду существенно нелинейной зависимости $S(h)$ (рис. 3), причем особенность рельефа окружающей территории такова, что при уровнях водной поверхности выше отметки 107,5 м БС озеро начинает затапливать территорию, площадь которой сложно оценить по доступным картографическим материалам.

В таком случае вместо уравнения (1) используется его конечно-разностный аналог и расчеты осуществляются с помощью искусственных рядов притока и испарения заданной продолжительности. Продолжительность рядов задается исходя из достижения требуемой точности расчетов. Для моделирования последовательностей всех компонент водного баланса озера принята схема простой цепи Маркова.

Известно, что марковский процесс полностью задается двумерным законом распределения. В данной работе для моделирования временных рядов (искусственных последовательностей) компонент водного баланса оз. Чаны используется двумерное (совместное) распределение случайных величин, имеющих трехпараметрические гамма-распределения С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля. Для задания двумерного закона распределения использован подход, предложенный И.О. Сармановым, основанный на построении системы ортогональных полиномов с использованием их явного представления через моменты весовой функции, которой в данном случае является трехпараметрическая плотность распределения С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля [12].

Как следует из решения уравнения Маркова [13], между неотрицательными случайными величинами ξ и η существует линейная корреляция, если эти величины имеют совместную плотность распределения:

$$p(x, y) = p_1(x)p_2(y) \cdot \left[1 + \sum_{k=1}^{\infty} R^k P_k(x)P_k(y) \right], \quad (2)$$

где $p(x, y)$ – двумерная плотность распределения;

$p_1(x)$, $p_2(y)$ – одномерные распределения;

$P_k(x)$ и $P_k(y)$ – ортонормированные полиномы;

R – коэффициент корреляции между случайными величинами ξ и η .

В результате прямого построения системы ортогональных полиномов на основе метода ортогонализации Грама–Шмидта удается получить симметричную плотность, которая удовлетворяет уравнению Маркова и характеризуется линейным уравнением регрессии.

Для моделирования искусственных последовательностей необходимо располагать условным распределением, которое является функцией перехо-

да, определяющей процесс моделирования искусственных реализаций побуждающих процессов:

$$p(y/x) = p_2(y) \cdot \left[1 + \sum_{k=1}^{\infty} R^k P_k(x) P_k(y) \right]. \quad (3)$$

В интегральной форме (в виде функции распределения) условный закон распределения запишется следующим образом:

$$F(y/x) = \int_0^y p_2(y) \cdot \left[1 + \sum_{k=1}^{\infty} R^k P_k(x) P_k(y) \right] dy. \quad (4)$$

Для моделирования случайных значений поступаем следующим образом. Из таблицы случайных чисел равномерно распределенных в интервале $[0, 1]$ берется значение условной функции распределения $F(y/x)$ и для нахождения случайного значения y при заданном x (где x – предыдущее значение процесса) вычисляется интеграл в правой части уравнения (4) (находим верхний предел y интеграла в правой части уравнения, при котором интеграл равен случайно сгенерированному числу). Полученное значение y подставляется вместо x и вся процедура повторяется необходимое число раз, обеспечивая тем самым моделирование случайной временной последовательности необходимой длины и с заданными свойствами (марковость входного случайного процесса и параметры безусловных распределений).

Далее на основании уравнения водного баланса озера определяются (рассчитываются) реализации выходного процесса – изменения уровня озера.

Имитационное моделирование составляющих водного баланса оз. Чаны

Естественным требованием к стохастической модели является условие воспроизведения тех же статистических характеристик, которые присущи выборочной (наблюденной) реализации случайного процесса – среднего, коэффициента вариации C_v и, в идеале, коэффициента автокорреляции $r(1)$, хотя последнему удовлетворить трудно из-за большой погрешности определения $r(1)$ по коротким рядам наблюдений. Выборочные оценки параметров распределения компонент водного баланса оз. Чаны были получены методами моментов и максимального правдоподобия, с последующим уточнением коэффициента асимметрии C_s из соображений лучшего соот-

Таблица 1. Выборочные оценки статистических характеристик компонент водного баланса и уровней воды в оз. Чаны

Ряд наблюдений	Метод оценки	Параметры распределения				
		Среднее	C_v	C_s / C_v	$r(1)$	C_s / C_v (уточн.)
Приток (1940– 2000 гг.)	максимального правдоподобия	12,6 м ³ /с	0,95	2,4	0,48	2,5
	моментов		0,93	1,9		
Осадки (1936– 2000 гг.)	максимального правдоподобия	342 мм	0,22	4,5	0,11	4
	моментов		0,22	3,8		
Испарение (1972– 2000 гг.)	максимального правдоподобия	541 мм	0,10	1,1	0,35	1
	моментов		0,11	–0,3		
Уровень (1934– 1972 гг.)	максимального правдоподобия	279 см (106,2 м БС)	0,19	4,8	0,90	4,5
	моментов		0,19	3,9		
Уровень (1973– 2006 гг.)	максимального правдоподобия	278 см (106,18 м БС)	0,1	1,3	0,81	1,5
	моментов		0,12	1,7		

ветствия трехпараметрической кривой С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля эмпирической кривой обеспеченности. Полученные статистические характеристики приведены в табл. 1, анализируя которые можно сделать некоторые выводы относительно возможности использования типа двумерного распределения для моделирования входных гидрометеорологических процессов. Безусловное распределение величин годового стока рек соответствует трехпараметрическому гамма-распределению. Законы распределения испарения и осадков близки к нормальному распределению, поскольку при малом коэффициенте вариации (который свойственен рядам значений испарения и осадков на озере) гамма-распределение стремится к нормальному. Это обстоятельство в случае малой автокорреляции позволяет использовать для моделирования искусственных последовательностей осадков и испарения подход, предложенный Д.Я. Ратковичем, основанный на линейной корреляции между обеспеченностями смежных случайных величин [14]. Сходная модель была использована в задаче прогнозирования колебаний уровня оз. Курлады для видимого испарения в работе [15]. При малом коэффициенте

те вариации и автокорреляции все известные модели дают близкие результаты, но подход Д.Я. Ратковича оказывается гораздо более эффективным с точки зрения экономичности вычислительного алгоритма.

Таким образом, для моделирования искусственных рядов входных случайных процессов использовались две модели. Модель 1 основана на построении системы ортогональных полиномов с использованием их явного представления через моменты весовой функции, в качестве которой берется трехпараметрическая плотность гамма-распределения, и характеризуется линейной регрессией между смежными значениями случайных величин. Модель 2 – модель с линейной корреляцией между равномерно распределенными значениями случайных величин (между их обеспеченностями), но с нелинейной регрессией между исходными случайными величинами (модель Д.Я. Ратковича).

Для воспроизведения искусственных последовательностей осадков и испарения выбрана модель 2. Расчет рядов речного притока (для случая прогноза уровня озера в естественном режиме) выполнен с использованием двух моделей.

На рис. 4 изображены линии регрессии для двух моделей: сплошной линией нанесены линии регрессии двумерной плотности распре-

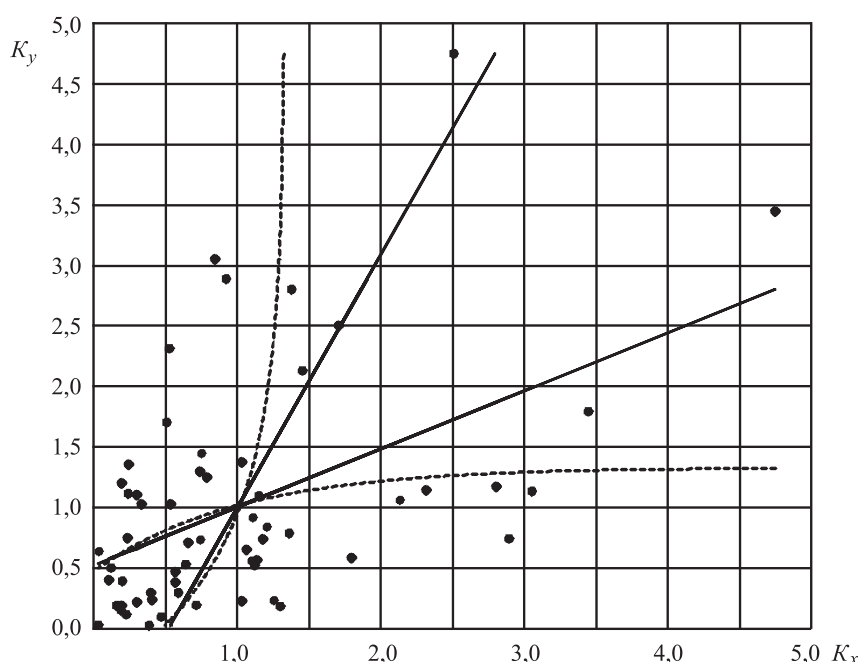


Рис. 4. Линии регрессии для двух стохастических моделей притока (условные обозначения даны в тексте).

ления, получаемой путем разложения по ортогональным полиномам с весовой функцией в виде трехпараметрического гамма-распределения (модель 1), пунктиром – линии регрессии для корреляции, получаемой путем преобразования совместного распределения обеспеченностей случайных величин (модель 2). Точки обозначают данные наблюдений в виде модульных коэффициентов (K_x , K_y) смежных членов ряда притока к озеру, и их положение на графике определяет корреляционную зависимость между смежными членами ряда. Из рисунка видно, что модель 2 существенно нелинейна, и условные математические ожидания величин стока, превышающих средние значения, полученные по этой модели, оказываются существенно ниже величин, оцениваемых с помощью уравнений линейной регрессии модели 1. Это обстоятельство делает затруднительной оценку ожидаемых величин стока в области высоких значений с помощью модели 2.

Вероятностные характеристики уровня озера

Реализации выходного процесса (т. е. уровня озера) получаются с помощью решения уравнения водного баланса озера (1) в конечно-разностной форме. Моделировалось два случая изменения уровня озера – без вмешательства в естественный режим озера и с учетом строительства дамбы, отделяющей Юдинский плес от основной части озера. Для средних величин стока, испарения, осадков и среднего уровня уравнение водного баланса, как отмечалось выше, должно выполняться точно. В первом варианте, без отсечения Юдинского плеса, расчеты дали заниженный средний уровень озера по сравнению с наблюдаемым за счет существующей невязки в водном балансе. При увеличении средней величины притока на 7 %, что возможно в виду недоучета стока с части водосбора рек и озера, осадков на 10 мм и уменьшении испарения на 20 мм, среднее смоделированного ряда уровней получилось практически равным выборочному (наблюдаемому) среднему. Результаты расчетов с использованием двух моделей изменчивости притока приведены в табл. 2. Обе модели достаточно хорошо воспроизводят статистические характеристики моделируемых рядов по отношению к выборочным оценкам параметров случайного процесса. Но модель 1, с линейной корреляцией между смежными величинами стока, приводит к большему значению асимметрии уровня озера, которое лучше согласуется с эмпирическими оценками, получаемыми по данным наблюдений.

Результаты модельных экспериментов позволили для дальнейших вероятностных расчетов при моделировании притока выбрать модель 1. Выполнив имитационные модельные расчеты с теми же входными параметрами

Таблица 2. Параметры распределений среднегодовых уровней воды оз. Чаны при различных схемах стохастического моделирования притока

Варианты расчета	Среднее, м	C_s	σ	$r(1)$
Естественный режим озера				
Моделирование притока по модели 1	106,14	0,08	0,79	0,97
Моделирование притока по модели 2	106,16	-0,32	0,78	0,97
С учетом строительства дамбы				
Моделирование притока по модели 1	106,72	-0,18	0,57	0,95

(среднее для притока 13,6 м³/с, для осадков 352 мм, для испарения 520 мм) для случая отсечения Юдинского плеса путем строительства дамбы, получили ряд уровней со статистическими характеристиками, приведенными в последней строке табл. 2.

Как видно из табл. 2 дисперсия уровня озера после отсечения плеса уменьшилась. Это объясняется тем, что при значениях уровня более 107,5 м площадь зеркала озера резко увеличивается, что является существенным стабилизирующим фактором колебаний уровня в области данной отметки, а поскольку среднее значение уровня после отсечения плеса существенно выше, чем в естественных условиях, то размах колебаний уровня уменьшается за счет ограничения сверху, что приводит к соответствующему уменьшению дисперсии.

В табл. 3 приведена еще одна характеристика случайного процесса – количество выбросов заданной продолжительности (выше среднего значения уровня) в моделированных рядах уровней оз. Чаны объемом 10 000 лет,

Таблица 3. Количество выбросов заданной продолжительности в моделированных рядах уровней оз. Чаны до отсечения Юдинского плеса и после (относительно среднего значения уровня)

Режим уровня	Продолжительность выброса выше среднего значения, годы								Средняя продолжительность выброса, годы
	≤ 5	10	15	20	25	30	40	50	
До отсечения Юдинского плеса	52	38	29	23	10	10	9	3	19
После отсечения Юдинского плеса	80	57	45	20	20	15	2	3	15

до отсечения Юдинского плеса и после. Анализируя данные таблицы можно заметить, что после строительства дамбы выросло количество периодов (выбросов) продолжительностью до 15 лет, в 2 раза увеличилось количество группировок продолжительностью 25 лет и уменьшилось количество выбросов продолжительностью 40 лет, что подтверждает вывод других авторов [2, 3] относительно чувствительности колебаний уровня озера к изменениям его морфометрических характеристик.

Кривые обеспеченности уровней оз. Чаны, построенные на основе данных моделированных искусственных рядов для двух случаев – естественного режима и после строительства дамбы, приведены на рис. 5. Для сопоставления на этом же рисунке представлены эмпирические кривые, построенные на основе данных натуральных наблюдений за соответствующие периоды, и аналитические кривые, соответствующие трехпараметрическому распределению Крицкого–Менкеля с параметрами, определенными по этим же данным.

Как следует из рис. 5б кривая обеспеченности уровня воды в оз. Чаны, построенная по данным наблюдений после отсечения Юдинского плеса, располагается ниже кривой обеспеченности уровней, построенной по данным, полученным методом имитационного моделирования с использованием тех же параметров распределений притока и слоев испарения и осадков, что и в наблюдаемых рядах, а также соответствующих морфометрических характеристик водоема. Имеющееся расхождение, во-первых, связано с тем, что ординаты кривой обеспеченности уровня, построенной по данным 35 лет наблюдений, имеют большую выборочную погрешность в связи с очень большим (более 0,8) значением первого коэффициента автокорреляции, что характерно для замкнутых водоемов. Оценка средней квадратической погрешности эмпирического (выборочного) среднего значения уровня с учетом внутрирядной корреляции выполнена по формуле [16]

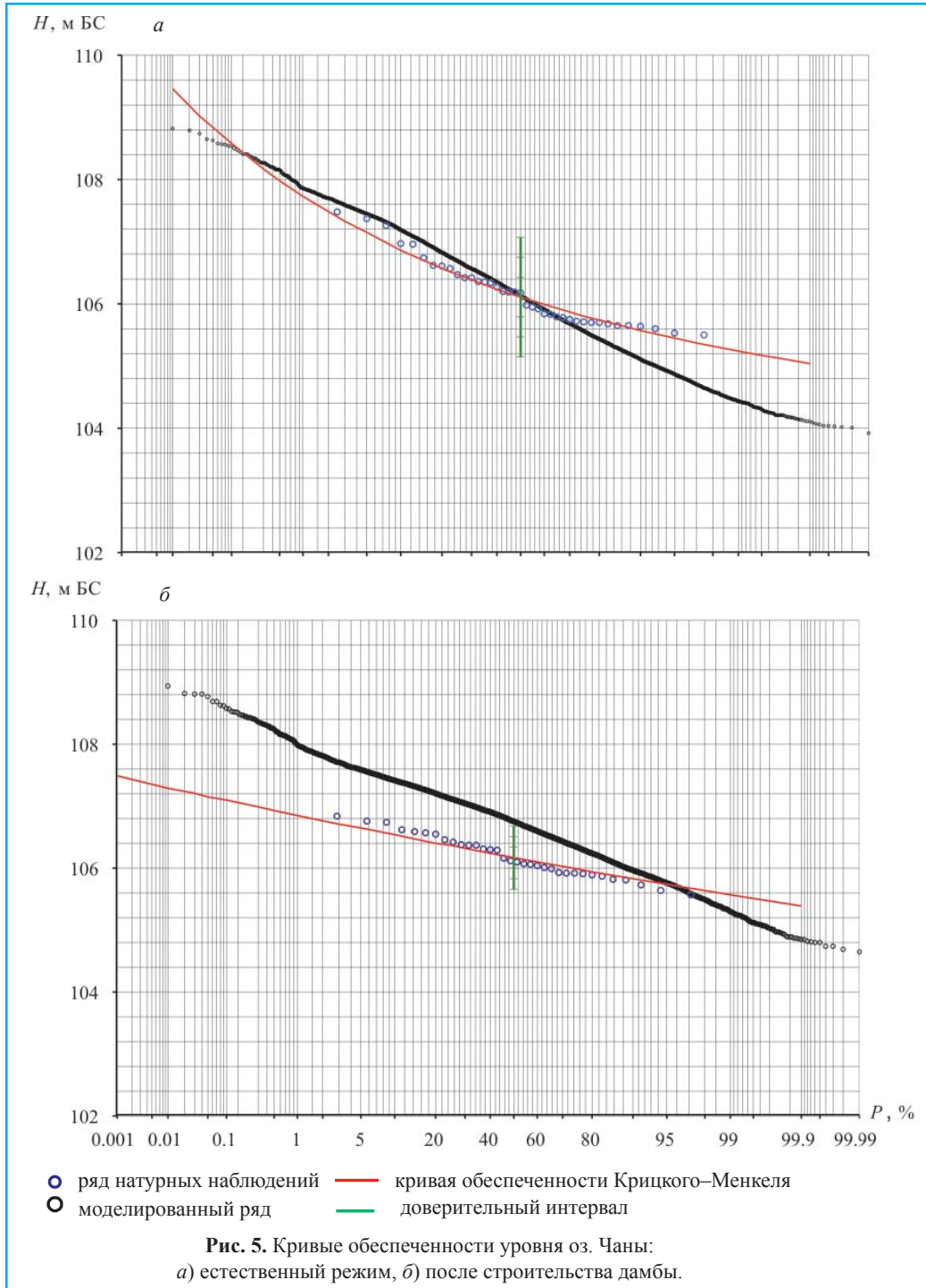
$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{2r}{(1-r^2)} \left[\frac{r^n + n(1-r) - 1}{n} \right]}, \quad (5)$$

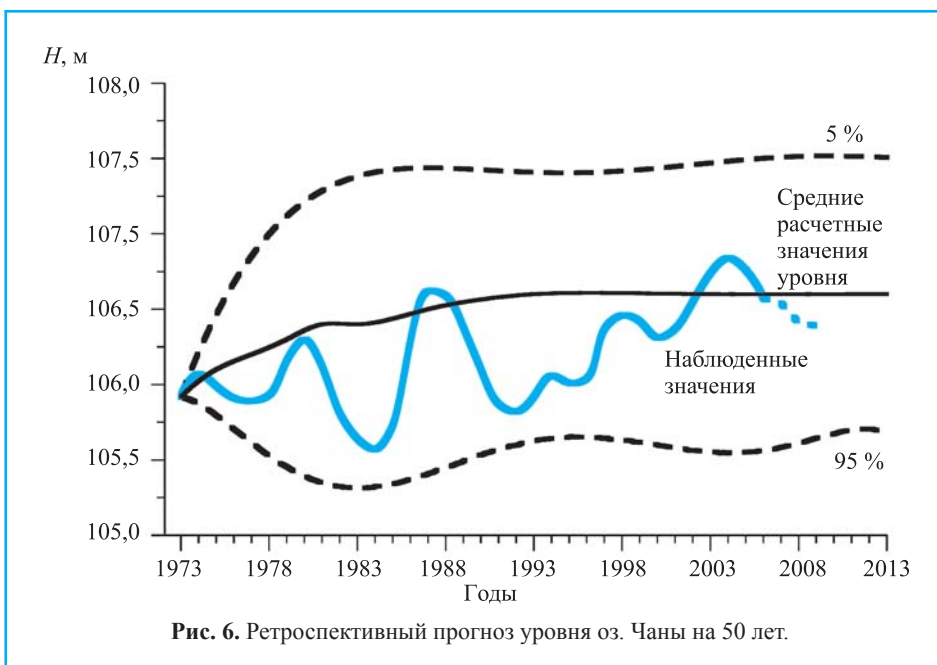
где r – коэффициент автокорреляции между смежными членами ряда;

n – объем выборки;

σ_x – среднее квадратическое отклонение случайной величины x (в данном случае уровня водной поверхности озера), оцениваемое по эмпирическим данным.

Соответствующие доверительные интервалы приведены на рис. 5 для квантили 50 %.





Во-вторых, «модельная» кривая обеспеченности представляет собой распределение уровня в стационарном случае, т. е. не учитывает зависимость от начальных условий. Это «модельное» распределение будет характеризовать режим колебания уровня через 30–40 лет после отсечения плеса и далее, когда зависимость от начальных условий будет очень слабой. Имеющийся ряд наблюдений, и соответствующая эмпирическая кривая обеспеченности уровней, отражают нестационарный режим наполнения озера, возникший после изменения его морфометрических характеристик, и сильно зависящий от начальных условий на момент строительства дамбы. Ввиду большого значения автокорреляции и существенно низких значений уровня на момент начала заполнения озера, в начальный период (до 30 лет) режим заполнения озера может сильно отклоняться от стационарных условий.

Для подтверждения репрезентативности полученных выводов и модельных представлений методом имитационного моделирования было выполнено исследование начального периода наполнения озера, т. е. с учетом начальных условий. Для этого смоделированные искусственные ряды притока, испарения и осадков делились на отрезки по 50 лет, и расчет будущих значений уровня многократно повторялся при одном и том же начальном наполнении озера, соответствующем моменту отсечения Юдинского плеса. Таким образом, были получены распределения уровня воды в озере с заблаговременностью до 50 лет. Ретроспективный прогноз уровня оз. Чаны на 50 лет (соответствующий современному состоянию акватории) в виде сред-

него значения уровня озера и его доверительного интервала приведены на рис. 6, откуда можно видеть, что наблюдаемые значения уровня попадают в доверительный интервал, ограниченный обеспеченностями 5 и 95 %.

Как видно из рисунка, доверительный интервал прогнозных значений уровня достаточно широк. Связано это с тем, что календарный прогноз (детерминистический прогноз) колебаний гидрометеорологических элементов с заблаговременностью год и более невозможен. Учет Марковских представлений о характере многолетней изменчивости в сочетании с большой автокорреляцией в рядах речного стока приводит к значительной дисперсии прогнозов уровней замкнутых водоемов, что подтверждается на ряде других объектов, таких как Каспийское море [17].

Для прикладных целей, связанных с различными видами гидротехнического строительства или выработкой рекомендаций по управлению водным режимом озера, необходимо использовать прогноз в вероятностной форме (в виде наборов квантилей) в соответствии с характером решаемой прикладной задачи.

Уменьшение доверительного интервала возможно только за счет преобразования естественного озера в полностью зарегулированный объект, параметры которого и задаются исходя из требуемых диапазонов колебаний уровня. Оценка технической возможности реализаций такого рода управленческих решений составит предмет дальнейших исследований.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что предложенный метод стохастического моделирования уровня режима бессточного оз. Чаны приводит к результатам, которые не противоречат реальному ходу уровней озера. Метод может быть использован для вероятностного прогноза и обоснования различных хозяйственных мероприятий на водосборе озера, в т. ч. и мероприятий по управлению его уровнем режимом.

Для применения предлагаемой методики в целях обоснования режимов управления озером требуется построение более надежной зависимости площади зеркала озера от его уровня в зоне высоких значений. Предметом дальнейших исследований может стать вероятностный прогноз уровня оз. Чаны с учетом оттока из него. Принимая во внимание особенность плоской равнины, на которой располагается оз. Чаны, можно предполагать, что при уровне, превышающем отметку в 107,5 м БС, озеро перестанет быть бессточным.

Авторы выражают признательность академику О.Ф. Васильеву за ценные замечания в процессе выполнения работы и О.В. Кондаковой за предоставленные данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ. Новосибирское водохранилище и озера Средней Оби. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 156 с.
2. Пульсирующее озеро Чаны. Л.: Наука, 1982. 304 с.
3. Савкин В.М., Двуреченская С.Я., Сапрыкина Я.В., Марусин К.В. Основные гидролого-морфометрические и гидрохимические характеристики озера Чаны // Сибирский экологический журнал. 2005. № 2. С. 183–192.
4. Васильев О.Ф., Савкин В.М., Сапрыкина Я.В. Анализ колебаний уровня озера Чаны // ДАН. 2006. Т. 4. № 407. С. 1–4.
5. Тархов Е.В., Тоцакова И.Н. Водный баланс оз. Чаны // Труды Зап.-Сиб. РНИГМИ. 1980. Вып. 43. С. 13–19.
6. Баева А.А., Бережных Т.В. Водный баланс оз. Чаны и многолетняя изменчивость его составляющих // Труды Зап.-Сиб. РНИГМИ. 1976. Вып. 22. С. 38–43.
7. Савкин В.М., Орлова Г.А., Кондакова О.В. Современный баланс бессточного озера Чаны // География и природные ресурсы. 2006. № 1. С. 123–131.
8. Болгов М.В. Марковские процессы в задаче прогнозирования уровня замкнутого водоема // Метеорология и гидрология. 2005. № 11. С. 74–85.
9. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Колебания уровня замкнутых водоемов // Труды Гидропроекта. 1964. № 12. С. 29–61.
10. Музылев С.В., Привальский В.Е., Раткович Д.Я. Стохастические модели в инженерной гидрологии. М.: Наука, 1982. 184 с.
11. Фролов А.В. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. М.: ГЕОС, 2003. 174 с.
12. Сарманов И.О., Болгов М.В. Несимметричная линейная корреляция между величинами, имеющими трехпараметрическое гамма-распределение Крицкого–Менкеля // Тезисы докладов VI Всероссийского гидрологического съезда, 28 сентября–1 октября 2004 г., Санкт-Петербург. Секция 5 / СПб: Гидрометеоиздат, 2004. С. 185–187.
13. Сарманов О.В. Исследование стационарных Марковских процессов методом разложения по собственным функциям // Труды МИАН. 1961. Т. 60. С. 238–261.
14. Раткович Д.Я. Стохастическая модель колебаний годового стока рек // Водные ресурсы. 1972. № 1. С. 52–94.
15. Летихин А.П., Немковский Б.Б., Казаков А.Г. Прогноз многолетних колебаний уровня озера Курлады при различных режимах сброса сточных вод // Охрана окружающей природной среды. Научные труды ИГД им. А.А. Скочинского. 1978. Вып. XXIV. С. 10–15.
16. Рождественский А.В. Оценка точности кривых распределения гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 270 с.
17. Раткович Д.Я., Болгов М.В. Исследование вероятностных закономерностей многолетних колебаний уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1994. № 6. С. 389–404.

Сведения об авторах:

Болгов Михаил Васильевич, д. т. н., заведующий лабораторией, Институт водных проблем Российской академии наук, 119333, Москва, ул. Губкина, 3; e-mail: bolgovmv@mail.ru

Коробкина Елена Александровна, главный специалист, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирский филиал, 630090, г. Новосибирск, Морской проспект, 2; e-mail: elenakorobkina@mail.ru