

Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 607—625.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(77):607—625.

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 556.555.2(571.14)
doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-607-625

Моделирование и прогнозирование уровня воды бессточного озера Чаны

***Александр Тимофеевич Зиновьев, Ольга Владимировна Кондакова,
Александр Владимирович Дьяченко, Александр Николаевич Семчуков***

Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук (ИВЭП СО РАН), Барнаул, Россия, kondakova.o.v@mail.ru

Аннотация. В работе приведены результаты компьютерного моделирования уровня воды крупного бессточного озера Чаны. Проведены сопоставительные расчеты температуры и уровня воды оз. Чаны в безледоставный период по двум термогидродинамическим моделям, плановой и нульмерной. Установлено, что учет неравномерности распределения температуры по акватории оз. Чаны позволяет уточнить величину испарения с водной поверхности и более точно рассчитать уровень озера. Выполнены моделирование уровня озера за многолетний период и прогноз уровня оз. Чаны в XXI веке при изменении температуры воздуха и атмосферных осадков в соответствии со сценариями изменения климата семейства RCP с применением нульмерной модели. Результаты прогноза показали, что в середине и конце XXI века следует ожидать значительного снижения уровня озера, что негативно отразится на его экологическом состоянии.

Ключевые слова: уровень воды, температура воды, испарение, изменение климата, компьютерное моделирование.

Благодарности: Исследование выполнено в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (Проект № 0306-2021-0002).

Для цитирования: Зиновьев А. Т., Кондакова О. В., Дьяченко А. В., Семчуков А. Н. Моделирование и прогнозирование уровня воды бессточного озера Чаны // Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 607—625. doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-607-625.

Original article

Modeling and forecasting water level of closed Lake Chany

*Alexander T. Zinoviev, Olga V. Kondakova,
Alexander V. Dyachenko, Alexander N. Semchukov*

Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the RAS (IWEP SB RAS), Barnaul, Russia, kondakova.o.v@mail.ru

Summary. The largest natural water body in Western Siberia — closed Lake Chany, is of great importance in terms of ecology and fisheries. A natural feature of the lake is the cyclic fluctuations of its water level and water surface area. The water level regime of Lake Chany is the driving factor influencing its ecological state. The lake has a complex basin structure and consists of several parts varying in depth (Fig. 1). In September 1971, the western shallow Yudinsky Reach was separated to preserve the fishery value of the lake. After separation (1972—2022), the average area of the lake made up 1620 km².

The paper presents the results of computer-based modeling of the Lake Chany water level. For simulation, we used a two-dimensional horizontal (2DH) thermohydrodynamic model based on the Delft3D FM software package and a zero-dimensional (0D) hydro-ice-thermal model (IWEP SB RAS).

Two models-based comparative modeling of thermal and level regimes of Lake Chany during the ice-free period demonstrates better agreement of 2DH calculation results with measurement data. It is found that the allowed for uneven temperature distribution across the lake area in the 2DH model make it possible to specify the amount of evaporation from the water surface, which significantly depends on water temperature. Therefore, it allows us to calculate the lake level more accurately and introduce a correction into evaporation estimations in the 0D model.

The results of 0D model-based modeling (with account of correction for evaporation) of long-term fluctuations of the Lake Chany level suggest good correlation with observational data. Thus, the 0D model adequately reproduces the main features of the level regime of Lake Chany for a long-term period, and can be used in prediction of its level in conditions of climate change.

The forecast of the average long-term water level of Lake Chany under future climate changes (i.e. air temperature and precipitation) was made in accordance with the RCP scenarios for the first time. In the 21st century, a significant drop in the average annual level of Lake Chany, having negative effect on its ecosystem, is expected.

Keywords: water level, water temperature, evaporation, climate change, computer modeling.

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the Research Program of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (Project № 0306-2021-0002).

For citation: Zinoviev A. T., Kondakova O. V., Dyachenko A. V., Semchukov A. N. Modeling and forecasting water level of closed Lake Chany. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(77):607—625. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-607-625.

Введение

Озеро Чаны, расположенное в бессточной области Обь-Иртышского междуречья, является крупнейшим естественным водным объектом Западной Сибири и имеет важное рыбохозяйственное и экологическое значение [1—3]. Природной особенностью озера Чаны является цикличность колебаний его уровня и площади водной поверхности, обусловленная изменчивостью общей увлажненности территории Обь-Иртышского междуречья [1—5].

Уровенный режим оз. Чаны является одним из важнейших факторов, влияющих на его водно-экологическое состояние. Колебания уровня и связанное с ними изменение солености воды оказывают существенное влияние на функционирование озерных биоценозов [1—3, 6—8]. Важное значение уровенный режим оз. Чаны имеет и для хозяйственной деятельности в его бассейне, поскольку озеро является водоемом промыслового рыболовства [1—3]. При снижении уровня воды в озере происходит уменьшение объемов улова. В период ледостава при уровнях ниже критической отметки 105,7 м БС (105,5 м БС-77 [10]) происходят обширные заморы рыбы [1]. Такие понижения уровней наблюдались в 1930—40-х гг., в периоды 1967—1971 гг., 1976—1968 гг., 1981—1985 гг., 1991—1993 гг. и в 1996 г.

Озеро Чаны (Чановская озерная система) имеет сложную плановую конфигурацию и состоит из нескольких частей, различных по глубине (рис. 1). На протяжении последних столетий лесостепные и степные пространства, среди которых расположено оз. Чаны, постепенно усыхают. В последней четверти XVIII в. площадь озер Чановской озерной системы достигала 10—12 тыс. км², в начале XIX в. составляла 5,0—5,5 тыс. км², в начале XX в. — около 3000 км², а к 1960 г. снизилась до 2300 км² [4]. Для сохранения рыбохозяйственного значения озера в сентябре 1971 г. системой дамб был отделен западный мелководный Юдинский плес, что позволило создать условия для повышения уровня в оставшейся его части за счет сокращения потерь на испарение и распределения на меньшую площадь притока рек Каргат и Чулым, впадающих в оз. Малые Чаны [3]. Площадь озера после отделения Юдинского плеса (за 1972—2022 гг.) в среднем составила 1620 км² (при среднемноголетнем уровне воды 106,12 м БС-77) с колебаниями от 1285 км² (при уровне воды 105,19 м БС-77) до 2023 км² (при 107,43 м БС-77). Площадь водосборного бассейна озера Чаны — 27 340 км² [1].

Уровень воды в озере определяется соотношением приходных и расходных статей его водного баланса. Приходными составляющими водного баланса оз. Чаны являются атмосферные осадки и речной приток, расходной статьёй — испарение с поверхности озера [1—4, 9—13]. Для бессточных мелководных озер, каким является оз. Чаны, потери воды на испарение весьма значительны [9] и существенно зависят от температуры водной поверхности [3—4].

Озеро Чаны является одним из наиболее изученных водоемов Западной Сибири [2]. Подробное описание основных этапов изучения озера (начиная с XVIII века) и обзор опубликованных работ, посвященных озеру Чаны, выполнено в [2, 3]. Исследование уровенного режима и водного баланса оз. Чаны после отделения Юдинского плеса приведено в работах [1—5, 9—10 и др.].

Годовые величины компонентов водного баланса оз. Чаны после отделения Юдинского плеса (за период 1971—2018 гг.) в среднем составили: речной приток — 298 мм или 0,47 км³ (48% от приходной части), атмосферные осадки на поверхность озера — 324 мм или 0,51 км³ (52%); испарение — 571 мм или 0,90 км³ [19].

Эффективным инструментом исследования изменения водного баланса и уровенного режима водоемов под влиянием различных факторов является математическое моделирование. Ранее выполнялось моделирование среднегодовых

значений уровня воды оз. Чаны с использованием разных математических моделей В. А. Понько и Н. Н. Завалишиным [11], В. П. Галаховым [12], М. В. Болговым и Е. А. Коробкиной [13]. В. А. Понько и Н. Н. Завалишин разработали фоновую модель уровня озера Чаны, в основу которой положена гипотеза многофакторной космической природы изменчивости гидрометеорологических процессов [11], В. П. Галахов предложил имитационную модель водного баланса водоема, включающую модель формирования стока впадающих в озеро рек [12], М. В. Болгов и Е. А. Коробкина — стохастическую модель колебаний основных компонент водного баланса озера [13].

В данной работе моделирование уровня воды оз. Чаны выполнялось на внутрисуточном, суточном и внутрисуточном масштабах времени с применением компьютерных моделей разной размерности, включающих, кроме водного баланса, тепловой баланс водоема.

Цель данной работы — прогноз уровня воды озера Чаны в XXI веке в условиях климатических изменений на основе методов математического моделирования.

Задачи исследования:

1. Сопоставительное моделирование термического режима и уровня воды озера в период открытой воды с применением компьютерных моделей разной размерности: двумерной горизонтальной (2DH) и нульмерной (0D).
2. Моделирование уровня озера за многолетний период с применением 0D-модели.
3. Долгосрочный прогноз уровня озера Чаны в XXI веке при ожидаемых изменениях климатических характеристик (температуры приземного воздуха и суммы атмосферных осадков) с использованием сценариев семейства RCP [14—16].

Методы и материалы

Для компьютерного моделирования использовались построенные в ИВЭП СО РАН двумерная горизонтальная (плановая) [17—20] и нульмерная (объемная) модели [21].

Плановая термогидродинамическая (ТГД) модель с нерегулярной расчетной сеткой, позволяющая выполнять расчеты для безледоставного периода, построена на базе программного комплекса с открытым исходным кодом Delft3D FM [22].

В основе используемой в работе модели лежат уравнения Сен-Венана (уравнения движения для компонент горизонтальной скорости течения и уравнение неразрывности), дополненные уравнением переноса тепла и уравнением состояния [22]. 2DH-модель предусматривает осреднение гидрофизических параметров по глубине и описывает изменение во времени распределения течений и температуры воды по акватории водоема, обусловленное сложным строением озерной котловины, влиянием речного притока и взаимодействием с атмосферой. Тепловой поток через свободную поверхность воды и интенсивность испарения вычисляются по модели «Ocean» [22].

Нульмерная гидроледотермическая модель представляет собой модель с сосредоточенными параметрами, основанную на совместном решении уравнений

водного и теплового балансов, и позволяет описывать ход основных гидрологических процессов в водоеме с учетом возникновения ледового и снежного покровов в течение холодного периода года [21].

Уравнение водного баланса имеет следующий вид:

$$\frac{dV}{dT} = \sum_{i=1}^N Q_i + q_a \Omega,$$

где t — время, ч, V — объем воды в водоеме, m^3 , N — число учитываемых речных притоков, Q_i — расходы этих притоков, $m^3/ч$, Ω — площадь поверхности водоема, m^2 , q_a — массообмен через единицу площади свободной поверхности водоема при отсутствии снежно-ледового покрова или поверхности раздела воды и льда при его наличии, $m/ч$.

Массообмен определяется соотношением:

$$q_a = \begin{cases} q_{pr} - q_{ev} & \text{при } \theta_{ice} = 0 \\ -q_f & \text{при } \theta_{ice} > 0 \end{cases}$$

где θ_{ice} — толщина льда, м, q_{pr} — интенсивность атмосферных осадков, $m/ч$, q_{ev} — интенсивность испарения, $m/ч$, q_f — интенсивность массообмена между водоемом и снежно-ледовым покровом, $m/ч$.

Уровень и соответствующая ему площадь поверхности водоема вычисляются как функции объема по батиграфическим кривым, после чего для уровня делается поправка на вытеснение воды льдом и снегом:

$$z = z^*(V) + \theta_{ice} \frac{\rho_{ice}}{\rho_w} + \theta_s \frac{\rho_s}{\rho_w},$$

где z — уровень свободной поверхности водоема, м, $z^*(V)$ — уровень, вычисленный исходя из объема воды подо льдом, м, θ_s — толщина снега на льду, м, ρ_w , ρ_{ice} и ρ_s — плотность воды, льда и снега, $кг/м^3$.

Уравнение теплового баланса водоема имеет следующий вид:

$$\frac{d(VT_w)}{dT} = \sum_{i=1}^N Q_i T_i + \frac{\Omega \Phi}{c_w \rho_w},$$

где T_w — температура воды, $^{\circ}C$; Φ — поток тепла через единицу площади свободной поверхности водоема, включая конвективный поток тепла с испаряющейся водой и осадками, при отсутствии ледового покрова или поверхности раздела воды и льда при его наличии, $ккал/(м^2 \cdot ч)$; c_w — удельная теплоемкость воды, $ккал/(г \cdot ^{\circ}C)$; T_i — температура воды в i -м речном притоке, $^{\circ}C$.

Теплообмен с атмосферой и интенсивность испарения рассчитываются по методике Харлемана [23]. Изменение толщины снежного и ледового покровов вычисляется на основе методики Харлемана-Руммера [23, 24].

Таким образом, в обеих моделях при расчете водного баланса учитываются приход воды с речным притоком и атмосферными осадками на поверхность озера и потери воды на испарение, при расчете теплового баланса — поступление тепла с водой речных притоков и теплообмен с атмосферой. При этом учитываются

солнечная радиация, длинноволновая радиация атмосферы и водной поверхности, потоки тепла, обусловленные испарением и атмосферной конвекцией, перенос тепла испаряющейся водой и атмосферными осадками. Теплообмен с дном считается пренебрежимо малым и не учитывается. Плотность воды в обеих моделях определяется по формуле UNESCO [21, 22].

Для хранения и подготовки исходных данных для расчетов создана база данных [17—19] на основе СУБД PostgreSQL [25], содержащая метеорологическую и гидрологическую информацию по озеру Чаны и его притокам. Источниками данных являлись ежегодные издания Государственного водного кадастра «Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» и метеорологические ежемесячники за 2001—2018 гг., а также интернет-ресурсы: «Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО)» (<https://gmvo.skniivh.ru>) и «Расписание погоды» (<https://tp5.ru>) за 2014 г. и 2018 г.

Входными данными для расчетов являлись расходы и температура воды впадающих в озеро рек Каргат и Чулым (по постам Здвинск и Старогорностаево) и метеорологические параметры (атмосферные осадки, температура и относительная влажность воздуха, атмосферное давление, общая облачность, скорость ветра и дополнительно для 2DH-модели — направление ветра). Для сопоставительных расчетов по двум моделям использована детальная метеорологическая информация с трехчасовой дискретностью по станции Квашнино. Для расчетов за длительный период по 0D-модели для всех параметров (кроме атмосферных осадков) задавались среднемесячные значения по станции Квашнино, для атмосферных осадков — по постам Квашнино, Таган, Городище и Яркуль. В начальный момент времени задавались уровень и температура воды в озере.

Также для численных расчетов использована цифровая модель рельефа котловины оз. Чаны, созданная в ИВЭП СО РАН [10] и впоследствии адаптированная для построения 2DH-модели озера [17—19] (рис. 1). В расчетах по 0D-модели учитывались общие зависимости площади водной поверхности и объема воды в озере от уровня воды, полученные по данным ЦМР.

Результаты исследований

Выполнены сопоставительные расчеты термического и уровня режимов оз. Чаны в безледоставный период по двум моделям, моделирование уровня режима за многолетний период и прогноз уровня оз. Чаны в XXI веке в условиях изменения климата с применением 0D-модели.

Моделирование термического и уровня режимов в безледоставный период

Ранее, на примере 2018 г., было показано, что 2DH-модель позволяет описывать термический режим оз. Чаны, неравномерное распределение температуры воды по акватории озера [17—18] и динамику изменения уровня воды в безледоставный период [19—20].

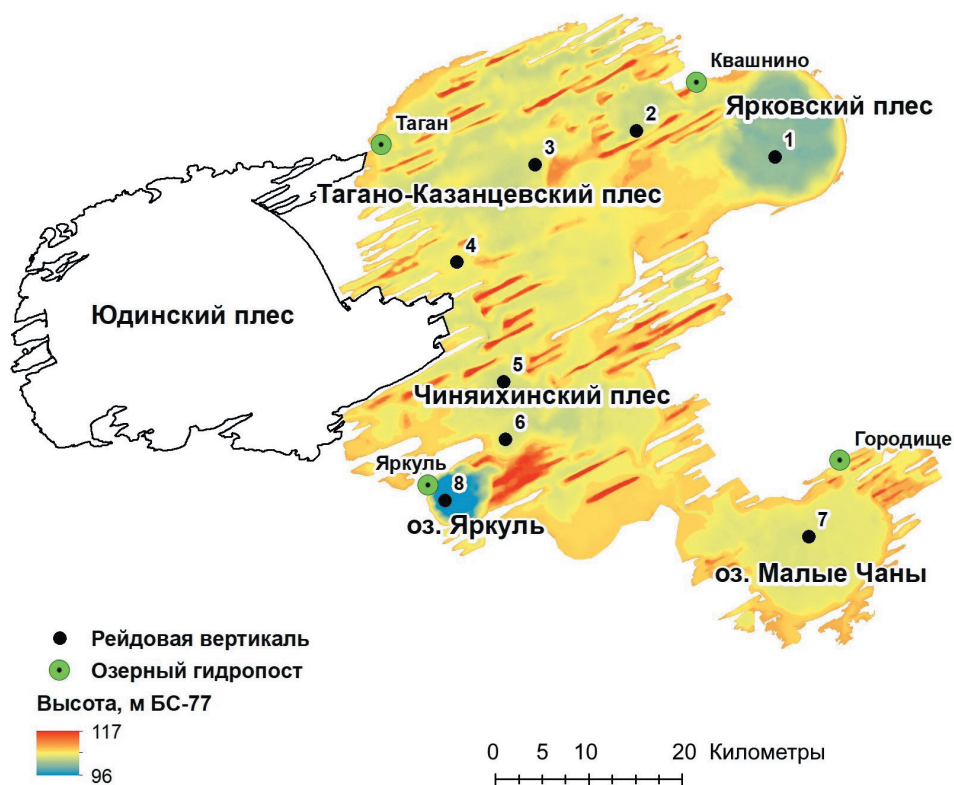


Рис. 1. Цифровая модель рельефа котловины оз. Чаны и схема расположения пунктов наблюдений.

Fig. 1. Digital elevation model of the Lake Chany basin and location scheme of observation points.

В данной работе выполнены сопоставительные расчеты термического и уровня режимов оз. Чаны в безледоставный период по 2DН и 0D-моделям для 2014 г. и 2018 г. Эти годы выбраны как наиболее обеспеченные гидрометеорологической информацией. В табл. 1 приведены значения уровня воды, площади водной поверхности, объема и средней глубины озера, осредненные за расчетный период.

Таблица 1

Морфометрические характеристики озера Чаны в 2014 г. и 2018 г.
(средние значения за расчетный период с 15 мая по 27 октября)

Morphometric characteristics of Lake Chany in 2014 and 2018
(average values for the calculation period from May 15 to October 27)

Год	Уровень средний по постам, м БС-77	Площадь, км ²	Объем, км ³	Средняя глубина, м
2014	106,21	1764	3,31	1,88
2018	106,72	1921	4,27	2,22

Для расчетов по 2DH-модели использованы метеоданные с трехчасовой дискретностью, по 0D-модели — их среднесуточные значения. Расходы воды в обеих моделях задавались среднесуточные, а температура воды рек — среднедекадная. Расчетный период выбран с 13:00 ч. 15 мая по 13:00 ч. 27 октября. В данной работе расчеты выполнялись без учета солености. В указаниях [26] для водоемов с содержанием солей менее 25—30 г/л рекомендуется рассчитывать испарение с водной поверхности как для пресных водоемов.

Анализ результатов сопоставительного моделирования термического режима оз. Чаны в безледоставный период для 2014 г. и 2018 г. показал, что значения температуры воды на мелководных участках, рассчитанные по двум моделям, достаточно близки между собой (рис. 2). Однако на более глубоких участках температура воды, рассчитанная по 0D-модели, в весенний период существенно выше, в осенний — несколько ниже, чем температура по 2DH-модели (рис. 3).

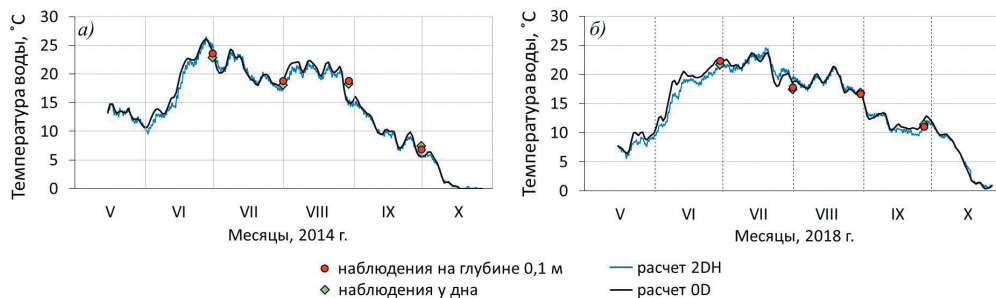


Рис. 2. Температура воды оз. Чаны на рейдовой вертикали 3:
a — в 2014 г., *б* — в 2018 г.

Fig. 2. The Lake Chany water temperature on the raid vertical 3:
a — in 2014, *б* — in 2018.

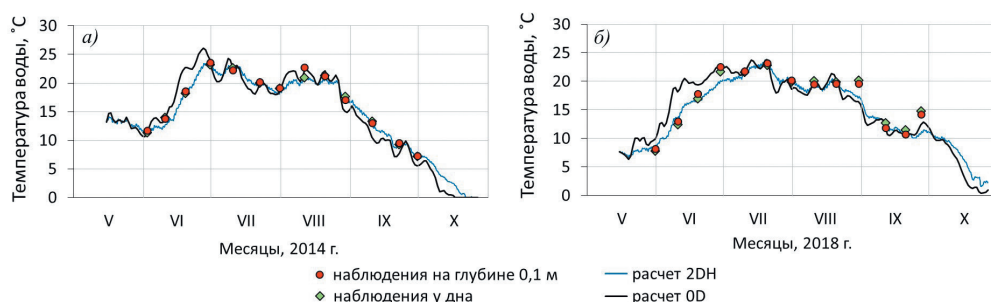


Рис. 3. Температура воды оз. Чаны на рейдовой вертикали 1:
a — в 2014 г., *б* — в 2018 г.

Fig. 3. The Lake Chany water temperature on the raid vertical 1:
a — in 2014, *б* — in 2018.

Это объясняется тем, что в 0D-модели не учитывается сложное строение озерной котловины и наличие плесов, различных по глубине, а используется общая зависимость объема воды в озере от уровня воды.

Завышение температуры воды в июне-июле по 0D-расчетам обуславливает более высокие величины испарения, что, соответственно, приводит к занижению уровня воды по сравнению с результатами расчетов по 2DH-модели и данными наблюдений (рис. 5).

Таким образом, сопоставление результатов, полученных по двум моделям, позволило внести поправку в расчеты испарения в 0D-модели и, следовательно, более точно рассчитать уровень озера в безледоставный период (табл. 2—3, рис. 4). В табл. 2 приведены сопоставление объема и слоя испарения (E) с поверхности воды за расчетный период по двум моделям и величина превышения испарения (ΔE) в 0D-модели по отношению к величине в 2DH-модели. Показано, что введенная поправка обусловила снижение испарения, рассчитанного по 0D-модели, на 7%.

В табл. 3 приводятся оценки расхождений рассчитанных уровней и данных наблюдений по величине среднеквадратического отклонения RMSE (Root Mean Square Error) по отношению к средней глубине озера за рассматриваемый период года (табл. 1).

Таблица 2

Испарение (E) с водной поверхности оз. Чаны (за период с 15 мая по 27 октября)

Evaporation (E) from the water surface of Lake Chany
(during the period from May 15 to October 27)

Модель	2014 г.			2018 г.		
	E		ΔE^* , %	E		ΔE^* , %
	км ³	мм		км ³	мм	
2DH-модель	0,83	469	—	0,90	470	—
0D-модель без поправки	1,07	605	+29	1,11	578	+23
0D-модель с поправкой	1,01	567	+22	1,03	538	+15

Примечание: * — по отношению к испарению по 2DH-модели.

Таблица 3

Оценка качества моделирования уровня оз. Чаны по величине среднеквадратического отклонения (RMSE) (по отношению к средней глубине озера)

Quality evaluation of the results of the Lake Chany water level modeling based on root mean square error (RMSE) (relative to the average depth of the lake)

Год	2DH-модель								0D-модель					
	Посты								Средний по постам		Без поправки		С поправкой	
	Квашнино		Городище		Таган		Яркуль							
см	%	см	%	см	%	см	%	см	%	см	%	см	%	
2014	7,2	3,8	4,5	2,4	5,1	2,7	3,3	1,8	3,6	1,9	4,7	2,5	3,1	1,7
2018	5,6	2,5	5,5	2,5	8,8	4,0	4,3	1,9	3,0	1,4	3,2	1,7	2,3	1,2

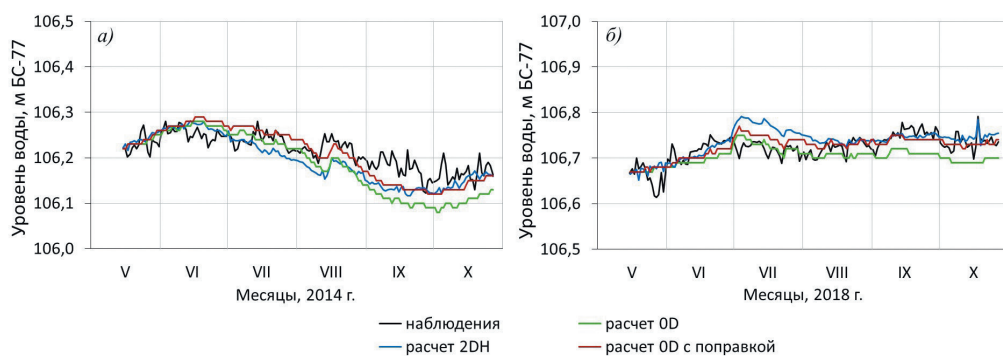


Рис. 4. Уровень оз. Чаны (средний по озеру):

a — в 2014 г., *б* — в 2018 г.

Fig. 4. The Lake Chany water level (averaged over the lake):

a — in 2014, *b* — in 2018.

Возможными источниками неопределенности и ошибок моделирования температурного и уровня режима оз. Чаны могут являться:

- использование данных о притоках по гидрологическим постам, расположенных на достаточно значительных расстояниях от их устьев;
- задание значений метеопараметров одинаковыми по всей акватории озера;
- осреднение температуры воды по глубине в 2DH-модели и по объему воды в OD-модели, что обуславливает отличие рассчитанных значений от фактической температуры поверхности воды.

В качестве возможных путей минимизации ошибок моделирования могут быть рассмотрены:

- учет приточности с территории водосборного бассейна ниже водомерных постов с использованием моделей формирования поверхностного стока;
- задание распределенной метеорологической информации, которая может быть получена путем пространственной интерполяции по данным метеостанций, находящихся в районе озера (Купино, Чаны, Барабинск и др.);
- применение трехмерных ТГД-моделей, позволяющих более точно рассчитывать температуру поверхности воды и величину испарения.

Моделирование многолетних колебаний уровня воды

С учетом введенной поправки в расчеты испарения с применением OD-модели выполнено моделирование колебаний уровня воды за многолетний период 2001—2018 гг. [20]. В качестве входных данных задавались среднемесячные значения гидрологических и метеорологических характеристик.

Получено хорошее соответствие результатов моделирования данным наблюдений (рис. 5). Среднеквадратическое отклонение (RMSE) для среднемесячных значений уровня воды составило 8,2 см (4,1 % по отношению к средней глубине

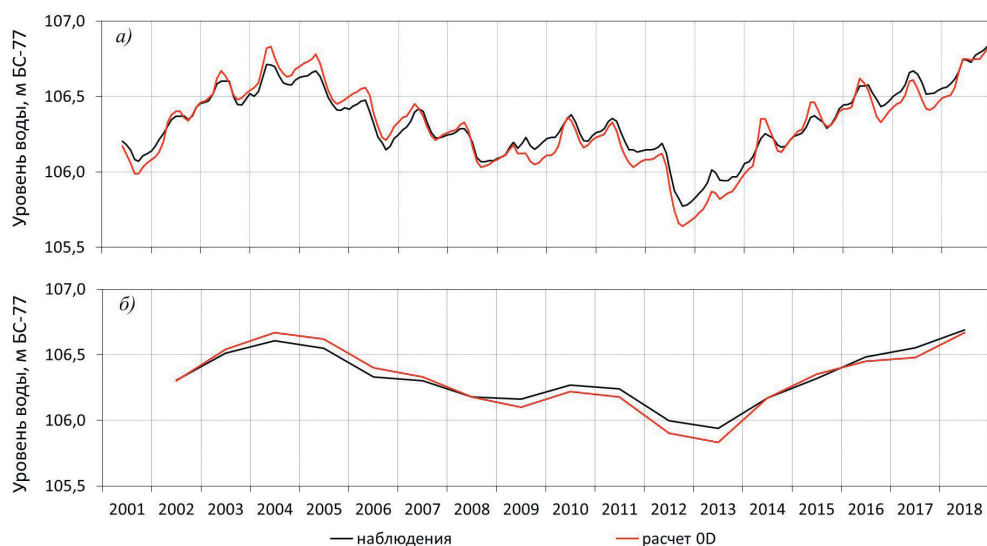


Рис. 5. Результаты моделирования уровня воды оз. Чаны за 2001—2018 гг.:
a — среднемесячные значения, *б* — среднегодовые значения.

Fig. 5. The results of modeling of the Lake Chany level for 2001—2018:
a — monthly average values, *b* — annual average values.

озера за рассматриваемый период 2,0 м), для среднегодовых значений — 7,1 см (3,5 %).

Таким образом, 0D-модель позволяет воспроизводить основные черты уровня оз. Чаны за многолетний период и может применяться для прогнозирования уровня озера под влиянием климатических изменений.

Оценки изменения уровня оз. Чаны в XXI в.

Выполнена оценка возможных изменений среднего многолетнего уровня воды оз. Чаны в XXI в. с учетом региональных изменений климата по сценариям семейства RCP (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) проекта CMIP5 [14—16] с применением 0D-модели.

На территории Российской Федерации прогнозируемое потепление климата в XXI в. может существенно превысить среднее глобальное потепление, при этом наибольший рост приземной температуры ожидается зимой [14—16, 27—28].

Для территории, прилегающей к оз. Чаны, оценка ожидаемых изменений климатических характеристик (температуры приземного воздуха и суммарных атмосферных осадков) в XXI веке выполнена по картам прогнозируемых изменений на территории РФ [14—16]. Определены диапазоны возможных изменений сезонных и годовых величин рассматриваемых характеристик в бассейне оз. Чаны в начале (2011—2030 гг.), середине (2041—2060 гг.) и в конце

(2080—2099 гг.) XXI века по отношению к базовому климатическому периоду 1981—2000 гг. (табл. 4—5).

Таблица 4

Ожидаемые изменения температуры приземного воздуха (°C) по отношению к базовому периоду 1981—2000 гг. по сценариям RCP проекта CMIP5 на территории, прилегающей к оз. Чаны

Projected changes in seasonal and annual mean surface air temperature (°C) relative to the base period 1981—2000 under CMIP5 RCP scenarios on the territory adjacent to the Lake Chany

Прогнозный период, годы	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
<i>Сценарий RCP2.6</i>					
2011—2030	1,5—2,0	1,5—2,0	1,0—1,5	1,0—1,5	1,5—2,0
2041—2060	2,5—3,0	2,5—3,0	2,0—2,5	2,0—2,5	2,0—2,5
2080—2099	2,5—3,0	2,0—2,5	1,5—2,0	2,0—2,5	2,0—2,5
<i>Сценарий RCP4.5</i>					
2011—2030	1,5—2,0	1,5—2,0	1,0—1,5	1,0—1,5	1,0—1,5
2041—2060	3,0—3,5	3,0—3,5	2,0—3,0	2,5—3,0	2,5—3,0
2080—2099	4,0—5,0	3,5—4,0	3,0—3,5	3,0—3,5	3,5—4,0
<i>Сценарий RCP8.5</i>					
2011—2030	1,5—2,5	1,5—2,0	1,0—1,5	1,0—2,0	1,5—2,0
2041—2060	4,0—5,0	3,5—4,0	3,0—3,5	3,0—3,5	3,5—4,0
2080—2099	8,0—9,0	5,0—7,0	6,0—7,0	5,0—7,0	5,0—7,0

Таблица 5

Ожидаемые изменения количества сезонных и годовых атмосферных осадков (в %) по отношению к базовому периоду 1981—2000 гг. по сценариям RCP проекта CMIP5 на территории, прилегающей к оз. Чаны

Projected changes in seasonal and annual mean precipitation amounts (%) relative to the base period 1981—2000 under CMIP5 RCP scenarios on the territory adjacent to the Lake Chany

Прогнозный период, годы	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
<i>Сценарий RCP2.6</i>					
2011—2030	10—15	5—10	5—10	5—10	5—10
2041—2060	10—15	10—15	0—5	5—10	5—10
2080—2099	10—15	10—15	5—15	5—15	5—15
<i>Сценарий RCP4.5</i>					
2011—2030	10—15	5—10	0—5	5—10	5—10
2041—2060	15—20	10—15	5—10	5—10	5—10
2080—2099	20—35	15—20	5—10	10—15	10—15
<i>Сценарий RCP8.5</i>					
2011—2030	10—15	5—10	0—5	5—10	5—10
2041—2060	20—30	10—15	0—5	10—15	10—15
2080—2099	35—40	20—30	0—5	15—20	15—20

К концу XXI в. ожидаемое повышение среднегодовой температуры приземного воздуха на территории, прилегающей к оз. Чаны, (рис. 6) относительно базового периода составит по наиболее оптимистичному сценарию RCP2.6 2,0—2,5 °С, по умеренному сценарию RCP4.5 — 3,5—4,0 °С, по сценарию RCP8.5, соответствующему максимальным антропогенным выбросам, — 5,0—7,0 °С (рис. 6). Прогнозируемое увеличение годовой суммы атмосферных осадков (рис. 7) по отношению к базовому периоду составит 5—10 % (по сценарию RCP2.6), 10—15 % (RCP4.5) и 15—20 % (RCP8.5). Средние значения рассматриваемых характеристик отнесены к серединам прогнозных периодов (рис. 6—7).

Ранее в [20] была выполнена предварительная оценка снижения уровня озера Чаны для средних значений рассматриваемых климатических характеристик по сценариям RCP4.5 и RCP8.5. В данной работе проведены варианты расчетов возможных изменений среднего годового уровня воды озера Чаны для минимальных, максимальных и средних значений диапазонов возможных изменений температуры воздуха и атмосферных осадков для сценариев RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5. Расчеты выполнены для периода с 1991 г. по 2089 г. (между серединами базового (1981—2000 гг.) и прогнозного (2080—2099 гг.) периодов).

Полученные результаты показали, что для всех рассматриваемых вариантов расчетов в XXI в. следует ожидать значительного снижения уровня воды оз. Чаны (рис. 8), что негативно отразится на экосистеме озера. По всем сценариям

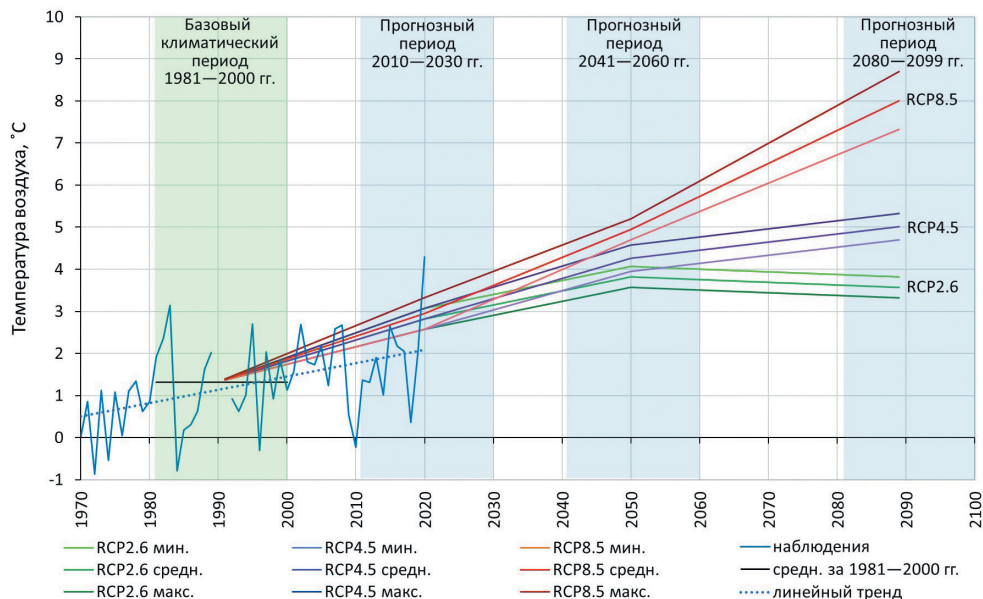


Рис. 6. Ожидаемые изменения среднегодовой температуры приземного воздуха по сценариям RCP на территории, прилегающей к оз. Чаны.

Fig. 6. Projected changes in annual mean surface air temperature under RCP scenarios on the territory adjacent to the Lake Chany.

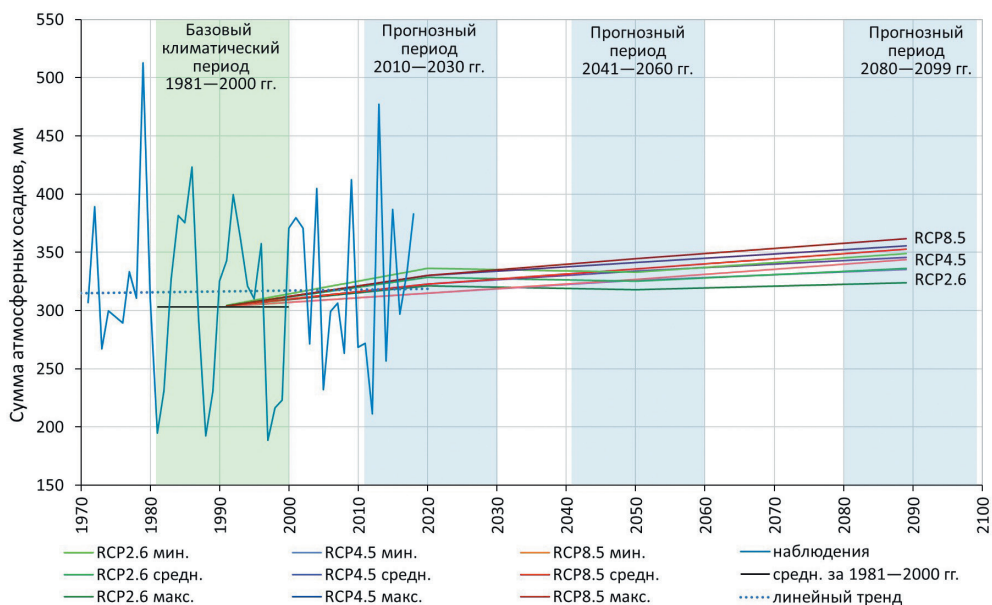


Рис. 7. Ожидаемые изменения количества годовых атмосферных осадков по сценариям RCP на территории, прилегающей к оз. Чаны.

Fig. 7. Projected changes in annual precipitation amount under RCP scenarios on the territory adjacent to the Lake Chany.

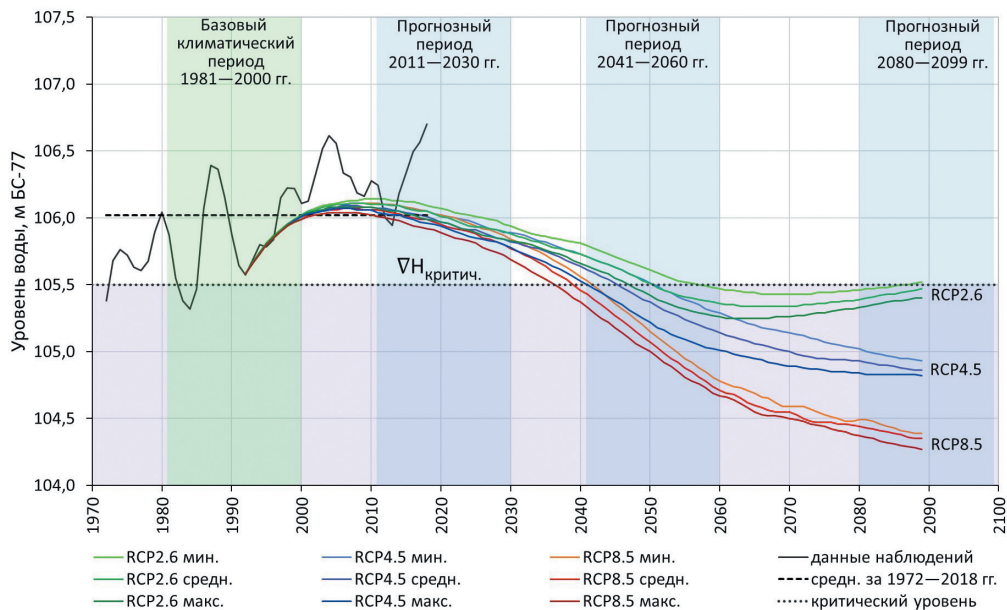


Рис. 8. Оценка возможных изменений уровня воды оз. Чаны в XXI в.

Fig. 8. Assessment of possible changes in the Lake Chany water level in the 21st century.

климатических изменений средний годовой уровень воды оз. Чаны может снизиться до критической отметки в середине XXI в. По сценарию RCP2.6, после 2060—2070 гг. уровень воды начнет незначительно повышаться. В расчетах по сценариям RCP4.5 и RCP8.5 во второй половине века уровень продолжит снижаться и ближе к концу века по рассматриваемым вариантам расчетов может составить 104,82—105,93 и 104,27—104,39 м БС-77, соответственно, что на 0,57—0,68 м и 1,10—1,23 м ниже критического значения.

Заключение

Сопоставительное моделирование термического и уровенного режимов оз. Чаны в безледоставный период с применением 2D и 0D-моделей показало, что результаты расчетов по плановой модели лучше согласуются с данными наблюдений. Установлено, что учет неравномерности распределения температуры по акватории оз. Чаны позволяет уточнить величину испарения с водной поверхности, существенно зависящую от температуры воды, и следовательно, более точно рассчитать изменение уровня озера.

Выполненное моделирование многолетних колебаний уровня воды оз. Чаны с применением объемной гидроледотермической модели водоема (с учетом внешней поправки на испарение) показало хорошее соответствие рассчитанных и фактических значений. Установлено, что 0D-модель воспроизводит основные черты уровенного режима оз. Чаны за многолетний период, что позволяет применять ее для прогнозирования уровня озера при климатических изменениях.

Впервые выполнен прогноз среднесуточного уровня воды в оз. Чаны при изменении температуры приземного воздуха и атмосферных осадков в соответствии со сценариями изменения климата семейства RCP (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5). Показано, что в XXI веке следует ожидать значительного снижения годового уровня воды оз. Чаны, что вызовет негативные последствия для экосистемы озера.

Результаты исследования могут быть использованы для оценки и прогноза экологического состояния озера Чаны при ожидаемых климатических изменениях и могут быть учтены при планировании хозяйственного использования озера и разработке мероприятий по охране его водных ресурсов.

Список литературы

1. Обзор экологического состояния озера Чаны (Западная Сибирь) / Отв. ред. О. Ф. Васильев, Я. Вейн. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2015. 255 с.
2. Экология озера Чаны / Под ред. Б. Г. Иоганзена, Г. М. Кривошекова. Новосибирск: Наука, 1986. 270 с.
3. Пульсирующее озеро Чаны / Под ред. Н. П. Смирновой и А. В. Шнитникова. Л.: Наука, 1982. 304 с.
4. Шнитников А. В. Большие озера Среднего региона и некоторые пути их использования / Озера Среднего региона (историческая изменчивость и современное состояние). Л.: Наука, 1976. С. 5—133.
5. Vasil'ev O. F., Savkin V. M., Saprykina Ya. V. Analysis of water level fluctuations in Lake Chany. Doklady Earth Sciences. 2006; 407(3): 446—449. doi: 10.1134/S1028334X06030226.
6. Kipriyanova L. M., Yermolaeva N. I., Bezmaternykh D. M. et al. Changes in the biota of Chany Lake along a salinity gradient // Hydrobiologia. 2007. Vol. 576. № 1. P. 83—93. doi: 10.1007/s10750-006-0295-9.

7. Bezmaternykh D. M. Spatial and temporal organization of benthic macroinvertebrate communities in Lake Chany, Western Siberia. *Russian Journal of Ecology*. 2016. Vol. 47. № 5. P. 480—485. doi: 10.1134/S1067413616050039.
8. Попов П. А. Влияние уровня режима водоемов реки Оби на экологию рыб // *Известия Алтайского отделения Русского географического общества*. 2022. № 2 (65). С. 59—81. doi: 10.24412/2410-1192-2022-16503.
9. Савкин В. М., Орлова Г. А., Кондакова О. В. Современный водный баланс бессточного озера Чаны // *География и природ. ресурсы*. 2006. № 1. С. 123—130.
10. Кондакова О. В., Савкин В. М., Двуреченская С. Я., Марусин К. В. Водный баланс и характеристики минерализации бессточного озера Чаны // *География и природные ресурсы*. 2020. № 1. С. 122—129. doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2020-1(122-129).
11. Понько В. А., Завалишин Н. Н. Фоновая модель уровня оз. Чаны / Пульсирующее озеро Чаны. Л.: Наука, 1982. С. 60—67.
12. Галахов В. П. Оценка увлажнения юга Западной Сибири (по колебаниям уровня озера Чаны) // *Известия Русского географического общества*. 2012. Т. 144. № 1. С. 59—63.
13. Болгов М. В., Коробкина Е. А. О моделировании колебаний уровня оз. Чаны для управления его гидрологическим режимом // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2012. № 1. С. 4—22.
14. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. В. М. Катцова и С. М. Семенова. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.
15. Катцов В. М., Говоркова В. А. Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и годового стока на территории России в XXI-м веке: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5) // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова*. 2013. Вып. 569. С. 75—97.
16. Изменения климата России в 21-м веке (модели CMIP5). Режим доступа: <http://voeikovmgo.ru/index.php/izmenenie-klimata-v-rossii-v-xxi-veke?id=613> (дата обращения: 05.04.2022).
17. Зиновьев А. Т., Дьяченко А. В., Кондакова О. В. Моделирование термогидродинамических процессов в озере Чаны // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2022. Т. 4. С. 86—92. doi: 10.33764/2618-981X-2022-4-86-92.
18. Зиновьев А. Т., Дьяченко А. В., Кондакова О. В. Моделирование термического режима озера Чаны // *Вопросы географии*. Сб. 157. Водные проблемы и их решение. М.: Медиа-ПРЕСС, 2023. С. 421—432.
19. Зиновьев А. Т., Дьяченко А. В., Кондакова О. В. Моделирование уровня озера Чаны // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2023. Т. 4. № 1. С. 70—76. doi: 10.33764/2618-981X-2023-4-1-70-76.
20. Зиновьев А. Т., Кондакова О. В., Дьяченко А. В., Семчуков А. Н. Моделирование уровня бессточного озера Чаны (Западная Сибирь) // *Пятье Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен. Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова (Санкт-Петербург, 05—14 октября 2023 г.)*. СПб.: Изд-во ВВМ, 2023. С. 207—211.
21. Bulk Model of Water Level, Temperature and Salinity Change in a Water Body // *The rehabilitation of the ecosystem and bioproductivity of the Aral Sea under conditions of water scarcity*. INTAS Project — 0511 REBASOWS. Final report. Coordinator: H. P. Nachtnebel. IWHW-BOKU. Vienna — Tashkent, 2006. P. 181—189 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.cawater-info.net/library/eng/intas_2006_en.pdf (дата обращения 20.12.2023).
22. Delft3D Flexible Mesh Suite. D-Flow Flexible Mesh. User Manual. Режим доступа: https://content.oss.deltares.nl/delft3dfm2d3d/D-Flow_FM_User_Manual.pdf (дата обращения 20.12.2023).
23. Rayan P. J., Harleman D. R. F., Stolzenbach K. D. Surface heat loss from cooling ponds // *Water resources research*. 1974. Vol. 10. № 5. P. 930—938. doi: 10.1029/WR010i005p00930.
24. Wake A., Rumer R. R. Modeling ice regime of lake Eria // *Journal of the Hydraulics Division*. 1979. Vol. 105. № 7. P. 827—844. doi: 10.1061/JYCEAJ.0005239.
25. PostgreSQL: The World's Most Advanced Open Source Relational Database [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.postgresql.org> (дата обращения: 20.06.2023).

26. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 84 с.
27. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова; Росгидромет. Санкт-Петербург: Научно-технологические, 2022. 676 с.
28. Катцов В. М., Павлова Т. В., Говоркова В. А. и др. Сценарные прогнозы изменений климата на территории России в XXI веке на основе ансамблевых расчетов с моделями СМIP6 // Труды ГГО. 2022. Вып. 604. С. 5—54.

References

1. Vasil'ev O. F., Veen J., eds. Obzor ehkologicheskogo sostoyaniya ozera Chany (Zapadnaya Sibir'). Novosibirsk: Academic Publishing House «GEO»; 2015: 255 p. (In Russ.).
2. Ioganzen B. G., Krivoshchekov G. M., eds. Ehkologiya ozera Chany. Novosibirsk: Nauka; 1986: 270 p. (In Russ.).
3. Smirnova N. P., Shnitnikov A. V., eds. Pul'siryuyushchee ozero Chany. Leningrad: Nauka; 1982: 304 p. (In Russ.).
4. Shnitnikov A. V. Large lakes of the Middle Region and some ways to use them. *Ozera Sredinnogo regiona (istoricheskaya izmenchivost' i sovremennoe sostoyanie)*. = *The lakes of the Middle region (historical variability and current status)*. Leningrad: Nauka, 1976: (5—133). (In Russ.).
5. Vasil'ev O. F., Savkin V. M., Saprykina Ya. V. Analysis of water level fluctuations in Lake Chany. *Doklady Earth Sciences*. 2006; 407(3): 446—449. doi: 10.1134/S1028334X06030226.
6. Kipriyanova L. M., Yermolaeva N. I., Bezmaternykh D. M. et al. Changes in the biota of Chany Lake along a salinity gradient. *Hydrobiologia*. 2007; 576(1):83—93. doi: 10.1007/s10750-006-0295-9.
7. Bezmaternykh D. M. Spatial and temporal organization of benthic macroinvertebrate communities in Lake Chany, Western Siberia. *Russian Journal of Ecology*. 2016; 47(5):480—485. doi: 10.1134/S1067413616050039.
8. Popov P. A. Influence of the level regime of reservoirs of the Ob river on the ecology of fish. *Izvestiya Altaiskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obshchestva = Proceedings of the Altai Branch of the Russian Geographical Society*. 2022; 2(65): (59—81). doi: 10.24412/2410-1192-2022-16503. (In Russ.).
9. Savkin V. M., Orlova G. A., Kondakova O. V. The present-day water balance of undrained Lake Chany. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2006; (1): (123—130). (In Russ.).
10. Kondakova O. V., Savkin V. M., Dvurechenskaya S. Ya., Marusin K. V. Water balance and patterns of mineralization of closed Lake Chany. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2020; 41(1): (51—58). doi: 10.1134/S1875372820010072.
11. Pon'ko V. A., Zavalishin N. N. Background model of Lake Chany level. *Pul'siryuyushchee ozero Chany = Pulsating Lake Chany*. Leningrad: Nauka, 1982: (60—67). (In Russ.).
12. Galakhov V. P. Assessment of humidity in the south of Western Siberia (based on the fluctuations of the Lake Chany level). *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2012; 144(1): (59—63). (In Russ.).
13. Bolgov M. V., Korobkina E. A. About modeling of level fluctuations of Lake Chany for its hydrological regime management. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie = Water sector of Russia: problems, technologies, management*. 2012; (1): (4—22). (In Russ.).
14. Kattsov V. M., Semenov S. M., eds. The second assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Moscow: Rosgidromet; 2014: 1008 p. (In Russ.).
15. Kattsov V. M., Govorkova V. A. Expected surface air temperature, precipitation and annual runoff changes over the territory of Russia through the XXI century: projections with an ensemble of global climate models (CMIP5). *Trudy GGO = Proc. MGO*. 2013; (569): (75—97). (In Russ.).
16. Climate Changes in Russia in the 21st Century (CMIP5 Models). Available at: <http://voeikovmgo.ru/index.php/izmenenie-klimata-v-rossii-v-xxi-veke?id=613>. (accessed on: 05.04.2022). (In Russ.).
17. Zinoviev A. T., Dyachenko A. V., Kondakova O. V. Modeling of thermohydrodynamic processes in Lake Chany. *Interespo Geo-Sibir' = Interexpo GEO-Siberia*. 2022; 4: (86—92). doi: 10.33764/2618-981X 2022-4-86-92. (In Russ.).

18. Zinoviev A. T., Dyachenko A. V., Kondakova O. V. Modeling of the Lake Chany thermal regime. *Voprosy geografii. Sbornik 157. Vodnye problemy i ikh reshenie = Problems of Geography. Vol. 157. Water problems and their solution*. Moscow: Media-Press, 2023: (421—432). (In Russ.).
19. Zinoviev A. T., Dyachenko A. V., Kondakova O. V. Modeling of Lake Chany level. *Interekspo Geo-Sibir' = Interexpo GEO-Siberia*. 2023; 4(1): (70—76). (In Russ.). doi: 10.33764/2618-981X-2023-4-1-70-76. (In Russ.).
20. Zinoviev A. T., Dyachenko A. V., Kondakova O. V., Semchukov A. N. Modeling of water level of closed Lake Chany (Western Siberia). *Pyatye Vinogradovskie chteniya. Gidrologiya v ehpokhu pere-men. Sbornik dokladov mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii pamyati vydayushchegosya russkogo uchenogo Yuriya Borisovicha Vinogradova = V Vinogradov Conference. Hydrology in the era of change. Book of proceedings of the international scientific conference in memory of the outstanding Russian scientist Yuri Vinogradov* (St. Petersburg, 05—14 October 2023). St. Petersburg: VVM Publishing House, 2023 (In Russ.).
21. Bulk Model of Water Level, Temperature and Salinity Change in a Water Body. *The rehabilitation of the ecosystem and bioproductivity of the Aral Sea under conditions of water scarcity. INTAS Project — 0511 REBASOWS. Final report*. Coordinator: H. P. Nachtnebel. IWHW-BOKU. Vienna — Tashkent, 2006: (181—189). Available at: http://www.cawater-info.net/library/eng/intas_2006_en.pdf (accessed on: 20.12.2023).
22. Delft3D Flexible Mesh Suite. D-Flow Flexible Mesh. User Manual. Available at: https://content.oss.deltares.nl/delft3dfm2d3d/D-Flow_FM_User_Manual.pdf (accessed on: 20.12.2023).
23. Rayan P. J., Harleman D. R. F., Stolzenbach K. D. Surface heat loss from cooling ponds. *Water resources research*. 1974; 10(5): (930—938). doi: 10.1029/WR010i005p00930.
24. Wake A., Rumer R. R. Modeling ice regime of lake Eria. *Journal of the Hydraulics Division*. 1979; 105(7):827—844. doi: 10.1061/JYCEAJ.0005239.
25. PostgreSQL: The World's Most Advanced Open Source Relational Database. Available at: <https://www.postgresql.org> (accessed on: 20.06.2023).
26. *Guidelines on the calculation of evaporation from the surface of reservoirs*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1977: 84 p. (In Russ.).
27. Kattsov V. M., ed. The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Sankt-Peterburg: Naukoemkie tekhnologii, 2022; 676 p. (In Russ.).
28. Kattsov V. M., Pavlova T. V., Govorkova V. A. et al. Climate change projections over the territory of Russia through the XXI century based on ensemble of CMIP6 models. *Trudy GGO = Proc. MGO*. 2022; (604): (5—54). (In Russ.).

Информация об авторах

Зиновьев Александр Тимофеевич, доктор технических наук, доцент, директор, главный научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, лаборатория гидрологии и геоинформатики, zinoviev@iwer.ru.

Кондакова Ольга Владимировна, младший научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, Новосибирский филиал, kondakova.o.v@mail.ru.

Дьяченко Александр Владимирович, научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, лаборатория гидрологии и геоинформатики, dychenko@iwer.ru.

Семчук Александр Николаевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, Новосибирский филиал, a.semchukov@inbox.ru.

Information about authors

Zinoviev Alexander Timofeevich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director, Chief Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Laboratory of Hydrology and Geoinformatics.

Kondakova Olga Vladimirovna, Junior Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Novosibirsk Branch.

А. Т. ЗИНОВЬЕВ, О. В. КОНДАКОВА, А. В. ДЬЯЧЕНКО, А. Н. СЕМЧУКОВ

Dyachenko Alexander Vladimirovich, Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Laboratory of Hydrology and Geoinformatics.

Semchukov Alexander Nikolaevich, PhD in Physics and Mathematics, Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Novosibirsk Branch.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 13.11.2024

Принята к печати 13.12.2024

The article was received on 13.11.2024

The article was accepted on 13.12.2024