УДК 556.555.4

https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-77-91

Оригинальная статья / Original paper

Тепловые балансы волжских водохранилищ

С. А. Поддубный

spod@ibiw.ru

Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН, пос. Борок, Некоузский р-н, Ярославская обл., Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Изучение вклада составляющих теплового баланса позволяет выделить основные внешние факторы, влияющие на процессы накопления и расходования тепла водными массами водоемов. Проведенный анализ литературных источников за последнюю четверть века не выявил каких-либо работ по оценке теплового баланса внутренних водоемов и, в частности, волжских водохранилищ в современных условиях. Особенную актуальность такое исследование приобретает в связи с нарастающим вниманием к вопросам постепенного глобального потепления климата и его влияния на водную среду. **Методы.** Расчет теплового баланса проводился по стандартным методикам для безледоставного периода года. Среднемесячные тепловые балансы волжских водохранилищ рассчитывались для периода с 2001 по 2022 г., характеризующегося заметным повышением температуры воздуха на 1,4–1,8 °С, и для периода до потепления климата (до 1976 г.). Гидрометеорологические характеристики, необходимые для расчета составляющих теплового баланса, заимствованы из архива лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН, Рыбинской гидрометобсерватории, а также с сайта Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных за периоды эксплуатации водохранилищ. **Результаты.** Несмотря на определенные методические сложности в оценке отдельных составляющих балансов, можно заключить, что потепление климата повлияло на их структуру в современных условиях. Результирующий тепловой поток, проходящий через открытую водную поверхность, увеличился для водохранилищ в 1,5–16 раз. Основной вклад в теплосодержание водоемов вносит поступление тепла с втекающими водными массами. За счет увеличения теплового стока в современный период в ряде водохранилищ тепло, накапливаемое их водными массами с мая по октябрь, в большей степени расходуется.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водохранилища, тепловой баланс, составляющие баланса, водная масса, теплосодержание, тепловой сток, результирующий тепловой поток, невязка баланса

ФИНАНСИРОВАНИЕ: работа выполнена в рамках государственного задания № 124032100076-2.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Поддубный С. А. Тепловые балансы волжских водохранилищ // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 5. С. 77–91; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-77-91; EDN: JSDEZA

© Поддубный С. А., 2026

Heat balances of the Volga reservoirs

Sergey A. Poddubny

spod@ibiw.ru

Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences

ABSTRACT

Relevance. The study of the contribution of the components of the heat balance makes it possible to determine the main external factors that affect the accumulation and dissipation of heat by water masses in water bodies. An analysis of literature sources over the past quarter century did not reveal any studies on the assessment of the heat balance of inland water bodies, particularly the Volga reservoirs, under modern conditions. Such study is especially important due to the growing attention to the issue of gradual global warming and its impact on the aquatic environment. **Methods.** The calculation of the heat balance was carried out using standard methods for the ice-free period of the year. The average monthly heat balances in the Volga reservoirs were calculated for the period from 2001 to 2022, characterized by a significant increase in air temperature by 1.4–1.8 °C and for the period before global warming (before 1976). The hydrometeorological characteristics necessary for calculating the components of the heat balance were taken from the archive of the Laboratory of Hydrology and Hydrochemistry, Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, the Rybinsk Hydrometeorological Observatory, and at the website of the Russian Federal Research Institute of Hydrometeorological Information-World Data Center for the periods of the reservoir operation. **Results.** Despite certain methodological difficulties in assessing particular components of the balances, it can be concluded that climate warming has affected their structure in modern conditions. The resulting heat flow passing through the open water surface increased by 1.5 to 16 times for the reservoirs. The heat input from in flowing water masses made the main contribution to the heat content of water bodies. Due to the increase in heat flow during the modern period, the heat accumulated by the water masses from May to October is largely expended in some reservoirs.

KEYWORDS: reservoirs, heat balance, balance components, water mass, heat content, heat sink, net heat flow, balance discrepancy

FINANCING: The study was carried out within the framework of the state assignment No. 124032100076-2.

FOR CITATION: Poddubny S. A. Heat balances of the Volga reservoirs. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 5. P. 77–91; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-77-91; EDN: JSDEZA

ВВЕДЕНИЕ

Процессы внешнего теплообмена озер и водохранилищ определяют структуру их теплового баланса в разные периоды годового термического цикла. Изучение вклада составляющих теплового баланса позволяет выделить основные внешние факторы, влияющие на процессы накопления и расходова-

ния тепла водными массами водоемов [1]. Рассматривая вопросы, связанные с оценкой составляющих теплового баланса, можно выделить, на наш взгляд, наиболее значимые, которым в настоящее время уделяется основное внимание. Во-первых, это касается исследования особенностей радиационного баланса водной поверхности – важной характеристики термодинамического режима, обусловливающей поступление тепла в водоемы [2, 3]. К другим по значимости вопросам можно отнести изучение теплообменных процессов, включающих оценку потерь тепла при испарении и турбулентного теплообмена на границе вода – воздух. Оценка потерь тепла на испарение может основываться на расчетных методах с использованием эмпирических формул[1], регрессионных и математических моделей с учетом изменения теплозапаса водоема [4–6], а также на прямых наблюдениях за метеорологическими параметрами на автономных буйковых станциях (платформах) с оценкой тепловых потоков на границе вода – воздух [2, 7–9]. К важной составляющей теплового баланса водоемов можно отнести и тепло, приносимое с водой притоков. Эта составляющая учитывается для небольших водохранилищ, в которых сток через гидроэлектростанцию составляет более 50 % от общего объема притока в водоем. В этих случаях вклад переносимого водой тепла в тепловом балансе может достигать 25 % [10].

Применительно к озерам и водохранилищам полностью тепловой баланс рассчитывался для оз. Белое [11], Рыбинского водохранилища [7], Камского водохранилища [2] и для отдельных участков Куйбышевского водохранилища [12] соответственно за периоды с 1951 по 1973 г., с 1948 по 1964 г., с 1966 по 1979 г. и с 1965 по 1971 г.

Следует отметить, что проведенный анализ литературных источников за последнюю четверть века не выявил каких-либо работ по оценке теплового баланса внутренних водоемов и, в частности, волжских водохранилищ в современных условиях. Особенную актуальность такое исследование приобретает в связи с нарастающим вниманием к вопросам постепенного глобального потепления климата и его влияния на водную среду.

Таким образом, цель настоящей работы – расчет тепловых балансов и оценка их составляющих для водохранилищ Волжского каскада в разные периоды климатического воздействия на Европейскую часть России.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчет теплового баланса проводился в соответствии с рекомендациями В. М. Мишона[1], Т. В. Одровой[2], К. К. Эдельштейна[3], «Руководства по гидро-

1 Мишон В. М. Практическая гидрофизика. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 177 с.
2 Одрова Т.В. Гидрофизика водоемов суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 312 с.
3 Эдельштейн К. К. Гидрология озер и водохранилищ. Учебник для вузов. М.: Издательство «Перо», 2014. 399 с.

логическим расчетам при проектировании водохранилищ»[4], «Указаний по расчету испарения с поверхности водоемов»[5] для безледоставного периода года. Среднемесячные тепловые балансы волжских водохранилищ рассчитывались для периода с 2001 по 2022 г., характеризующегося заметным повышением температуры воздуха на 1,4–1,8 °С, и для периода до потепления климата – с начала ввода в эксплуатацию водоемов (1937–1971 гг.) до 1976 г. [13]. Гидрометеорологические характеристики, необходимые для расчета составляющих теплового баланса (температура поверхности воды и водной массы, скорость ветра, температура воздуха, общая и нижняя облачность, упругость водяного пара, осадки), заимствованы из архива лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН, Рыбинской гидрометобсерватории, а также с сайта Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных [14]. Необходимо отметить, что за весь период эксплуатации (с 1947 г. по настоящее время) Рыбинское водохранилище в наибольшей степени обеспечено гидрометеорологической информацией. Для остальных водохранилищ каскада отмечался дефицит гидрологической информации, кроме данных по объему притока в водоемы. В связи с этим такие важные гидрологические параметры, как средняя температура водной массы ($T_{вм}$) и средняя температура поверхностного слоя воды ($T_{пов}$), рассчитывались по полученным ранее регрессионным зависимостям $T_{вм} = f(T_{возд})$ и $T_{вм} = f(T_{пов})$, где $T_{возд}$ – температура воздуха (табл. 1) [13].

Таблица 1. Регрессионные зависимости между гидрометеорологическими параметрами волжских водохранилищ в безледный период (*n* – число членов ряда) [13]

Table 1. Regression relationships between hydrometeorological parameters of the Volga reservoirs during the ice-free period (*n* is the number of series members) [13]

Водохранилище, пункт наблюдений	$T_{вм} = f(T_{возд})$	*n*	R^2
Иваньковское, Тверь	$T_{вм} = 1{,}157 \cdot T_{возд} - 0{,}091$	182	0,95
Угличское, Углич	$T_{вм} = 4{,}64 + 0{,}836 \cdot T_{возд}$	114	0,68
Рыбинское, Рыбинск, ГМО	$T_{вм} = 1{,}437 + 0{,}957 \cdot T_{возд}$	287	0,82
Горьковское, Юрьевец	$T_{вм} = 0{,}848 + 1{,}00037 \cdot T_{возд}$	70	0,84
Куйбышевское, Вязовые	$T_{вм} = 3{,}26 + 0{,}863 \cdot T_{возд}$	30	0,73
Саратовское, Самара	$T_{вм} = 5{,}64 + 0{,}614 \cdot T_{возд}$	30	0,46
Волгоградское, Камышин	$T_{вм} = 5{,}71 + 0{,}634 \cdot T_{возд}$	30	0,52
Для всех водохранилищ	$T_{вм} = 0{,}679 + 0{,}983 \cdot T_{пов}$ $T_{пов} = (T_{вм} - 0{,}679) / 0{,}983$	571	0,94

4 Руководство по гидрологическим расчетам при проектировании водохранилищ. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 284 с.

5 Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 84 с.

Уравнение теплового баланса записывалось в следующем сокращенном виде с учетом основных его составляющих, характеризующих среднюю за расчетный период интенсивность тепловых потоков в Вт/м^2:

$$\Theta_р \pm \Theta_{эф} \pm \Theta_{ис} \pm \Theta_{то} + \Theta_{ос} \pm \Theta_д + \Theta_{прит} - \Theta_{ст} = \pm \Delta\Theta, \quad (1)$$

где $\Theta_р$ – поглощенная водой суммарная солнечная радиация; $\Theta_{эф}$ – эффективное излучение; $\Theta_{ис}$ – затраты тепла на испарение; $\Theta_{то}$ – турбулентный теплообмен воды с атмосферой; $\Theta_{ос}$ – поступление тепла с жидкими осадками; $\Theta_д$ – теплообмен с донными грунтами; $\Theta_{прит}$ – тепловой приток в водоем; $\Theta_{ст}$ – тепловой сток из водоема; $\Delta\Theta$ – изменение теплозапаса.

Расчет составляющих теплового баланса проводился по следующим формулам:

$$\Theta_р = (Q + q)_0[1 - nK_н N_н - nK_{с+в}(N_о - N_н)(1 - r)/(1 - \gamma r)] \quad (2)$$

$$\Theta_{эф} = 0{,}95\sigma(273{,}2 + T_0)^4 - \sigma(273{,}2 + T_{200})^4(b_1 + b_2) \quad (3)$$

$$\Theta_{ис} = 4{,}1(E_0 - E_{200})[1 + 0{,}8U_{200} + f(\Delta\vartheta)] \quad (4)$$

$$\Theta_{то} = 2{,}65(T_{200} - T_0)[1 + 0{,}8U_{200} + f(\Delta\vartheta)] \quad (5)$$

$$\Theta_{ос} = 0{,}0485 \cdot T_{200} \cdot h \quad (6)$$

$$\Theta_{прит} = c_р \rho Q_{прит} T_{прит}/S \quad (7)$$

$$\Theta_{ст} = c_р \rho Q_{ст} T_{ст}/S \quad (8)$$

$$\Delta\Theta = c_р \rho(H_{ср\,к} T_{вм\,к} - H_{ср\,н} T_{вмн})/\tau \quad (9)$$

В используемых формулах приняты следующие обозначения: $(Q + q)_0$ – суммарная радиация на уровне моря при безоблачном небе; n – относительная плотность облачного покрова; $N_н$ и $N_о$ – соответственно облачность нижнего и верхнего ярусов в долях единицы; $K_н$ и $K_{с+в}$ – коэффициенты, характеризующие непропускание суммарной радиации облаками нижнего, среднего и верхнего ярусов; r – среднесуточное альбедо водной поверхности; γ – коэффициент, характеризующий долю повторно рассеянной и отраженной облаками в направлении к поверхности воды радиации: $\gamma = 0{,}3 + 0{,}5N_н + 0{,}42(N_о - N_н)$; $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м$^2 K^4$); T_0 – температура поверхности воды, °С; T_{200} – температура воздуха на 2 м над водой, °С; b_1 и b_2 – коэффициенты, характеризующие влияние облачного покрова нижнего и верхнего ярусов на встречное излучение атмосферы; E_0 – максимальная упругость водяного пара, мбар; E_{200} и T_{200} – упругость водяного пара (мбар) и температура воз-

духа (°С) на высоте 2 м над водоемом; T_0 – температура поверхности воды; U_{200} – скорость ветра на высоте 2 м над водоемом, м/с; $f(\Delta\vartheta)$ – функция, учитывающая изменение интенсивности испарения за счет разности значений T_0 и T_{200}; h – слой жидких осадков за сутки, мм; $c_р$ – удельная теплоемкость воды 4190 Дж/(кг·°С); ρ – плотность воды 1000 кг/м^3; $H_{срк}$, $T_{вмк}$ и $H_{срн}$, $T_{вмн}$ – соответственно средняя глубина и температура воды в конце и начале периода наблюдений при данном уровне воды Z, м балтийской системы (БС); $Q_{прит}$ и $Q_{ст}$ – средние значения расходов воды притока и стока, м^3/с; $T_{прит}$ и $T_{ст}$ – средние значения температуры воды притока и нижнего бьефа гидроузла, °С; S – площадь водоема, м^2.

Значения указанных параметров и коэффициентов, включая теплообмен с донными грунтами ($\Theta_д$), заимствованы из соответствующих таблиц[4,6].

Таблица 2. Тепловые балансы Иваньковского, Угличского и Рыбинского водохранилищ в период до 1976 г. (интенсивность тепловых потоков дана в Вт/м^2)

Table 2. Heat balances of the Ivankovo, Uglich and Rybinsk reservoirs in the period up to 1976 (heat flow intensity is given in W/m^2)

Месяц	Составляющие баланса							ΔΘ	$N_{тб}$, %
	Приход			Расход					
	$\Theta_р$	$\Theta_{прит}$	$\sum_{приход}$	$\Theta_{ис}$	$\Theta_о$	$\Theta_{ст}$	$\sum_{расх}$		
Иваньковское водохранилище									
V	190	80	270	85	47	73	206	43	21
VI	214	60	274	121	73	51	245	37	−6
VII	201	56	256	113	79	39	231	13	15
VIII	158	39	196	78	87	24	189	−8	17
IX	99	26	125	50	80	15	145	−31	17
X	48	17	65	26	53	9	88	−37	26
$\sum_{сезон}$	909	277	1186	474	419	212	1104	17	90
%	77	23	100	43	38	19	100	1,4	7,6
Угличское водохранилище									
V	183	128	312	72	34	113	219	84	9
VI	212	85	298	111	70	83	264	29	5
VII	200	67	267	125	66	67	258	14	−5
VIII	162	45	207	111	67	49	227	−13	−7
IX	94	27	121	93	65	33	191	−36	−34
X	44	17	61	56	53	26	136	−41	−34
$\sum_{сезон}$	896	370	1266	569	355	372	1295	37	−66
%	70	30	100	44	27	29	100	2,9	5,2
Рыбинское водохранилище									
V	196	25	221	40	84	8	132	81	8
VI	221	15	236	97	89	14	200	37	−1
VII	213	11	224	122	83	17	222	6	−4
VIII	156	8	164	111	79	16	206	−32	−10
IX	89	5	94	81	75	11	167	−56	−17
X	37	3	40	47	58	5	110	−55	−15
$\sum_{сезон}$	912	66	978	498	467	72	1037	−19	−39
%	93	7	100	48	45	7	100	1,9	4,0

6 Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 84 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Формирование термического режима водохранилищ определяется теплообменом между водной массой и атмосферой, а также перераспределением тепла внутри водной толщи водоемов. Кроме того, на термический режим водохранилищ оказывают влияние морфометрические характеристики – глубина, площадь водной поверхности и объем. Рассмотрим основные составляющие теплового баланса волжских водохранилищ в указанные периоды разного климатического воздействия на их водную среду.

Предварительная оценка составляющих баланса (1) показала, что в его приходной части вклад $\Theta_д$, $\Theta_{то}$ и $\Theta_{эф}$ для двух климатических периодов крайне незначителен (0,3–5 %) и, следовательно, ими можно пренебречь без существенной потери точности расчета баланса. В расходной части теплового баланса указанные выше составляющие характеризуются несколько большим

Таблица 3. Тепловые балансы Иваньковского, Угличского и Рыбинского водохранилищ в период с 2001 по 2022 г. (интенсивность тепловых потоков дана в Вт/м²)

Table 3. Heat balances of the Ivankovo, Uglich and Rybinsk reservoirs during the period from 2001 to 2022 (heat flow intensity is given in W/m²)

Месяц	Составляющие баланса							ΔΘ	$N_{тб}$, %
	Приход			Расход					
	$\Theta_р$	$\Theta_{прит}$	$\sum_{приход}$	$\Theta_{ис}$	$\Theta_о$	$\Theta_{ст}$	$\sum_{расх}$		
Иваньковское водохранилище									
V	197	78	276	110	57	81	249	47	−20
VI	210	64	274	129	81	69	278	19	−23
VII	202	53	254	143	99	58	300	20	−66
VIII	163	42	205	110	37	46	193	−14	30
IX	97	40	138	62	26	41	129	−36	50
X	49	29	79	19	2	23	44	−42	90
$\sum_{сезон}$	919	307	1226	573	303	318	1193	−6	61
%	74	26	100	48	25	27	100	0,5	5,0
Угличское водохранилище									
V	195	32	227	103	67	57	227	50	–50
VI	209	34	243	96	63	45	203	21	19
VII	202	31	232	93	50	40	183	21	28
VIII	162	32	194	81	15	39	135	−14	73
IX	95	29	124	69	46	36	151	−35	8
X	47	28	75	55	43	42	140	−44	−21
$\sum_{сезон}$	909	185	1094	497	284	259	1041	−1	57
%	83	17	100	48	27	25	100	0,1	5,2
Рыбинское водохранилище									
V	193	17	210	64	38	8	110	57	43
VI	208	13	221	128	48	14	190	56	−25
VII	201	12	213	149	55	18	222	34	−43
VIII	160	9	169	150	56	18	224	−4	−51
IX	91	6	97	86	42	12	140	−46	3
X	43	5	48	58	30	7	95	−40	−7
$\sum_{сезон}$	896	62	958	635	269	78	982	57	−80
%	94	6	100	65	27	8	100	5,9	8,4

вкладом (1–30 %), и в дальнейшем целесообразно учитывать только их сумму: $\Theta_0 = \Theta_д + \Theta_{то} + \Theta_{эф}$.

Согласно проведенным расчетам, в период до 1976 г. и в современный период потепления климата 64–92 % в приходной части баланса составляет поглощенная водой солнечная радиация (2). Для водохранилищ Верхней Волги суммарные за сезон $\Theta_р$ близки по величине (896–949 Вт/м^2). Отмечена крайне незначительная (на 1–4 %) тенденция увеличения $\Theta_р$ после 2000 г. за счет некоторого уменьшения общей и нижней облачности (табл. 2, 3).

На средней и нижней Волге в современный период увеличение $\Theta_р$ составило 4–6 % также за счет уменьшения общей облачности и облачности нижнего яруса (табл. 4–6).

Таблица 4. Тепловые балансы Горьковского, Куйбышевского и Саратовского водохранилищ в период до 1976 г. (интенсивность тепловых потоков дана в Вт/м^2)

Table 4. Heat balances of the Gorky, Kuibyshev, and Saratov reservoirs in the period up to 1976 (heat flow intensity is given in W/m^2)

Месяц	Составляющие баланса							ΔΘ	$N_{тб}$, %
	Приход			Расход					
	$\Theta_р$	$\Theta_{прит}$	$\sum_{приход}$	$\Theta_{ис}$	$\Theta_о$	$\Theta_{ст}$	$\sum_{расх}$		
Горьковское водохранилище									
V	185	25	210	112	27	79	217	46	−53
VI	216	41	257	123	50	63	236	28	−7
VII	201	54	256	117	43	72	233	12	11
VIII	165	50	214	94	34	60	188	−11	37
IX	102	33	135	62	27	42	130	−35	40
X	45	19	64	39	10	23	73	−41	32
$\sum_{сезон}$	915	222	1137	548	192	337	1077	−1	60
%	80	20	100	51	18	31	100	0,1	5,3
Куйбышевское водохранилище									
V	215	172	388	152	59	216	428	111	−151
VI	238	118	356	158	53	112	323	54	−21
VII	223	84	307	144	42	84	270	22	15
VIII	189	65	254	128	45	69	243	−27	38
IX	125	44	169	101	43	46	190	−78	57
X	64	23	87	72	50	23	145	−93	35
$\sum_{сезон}$	1055	507	1562	755	292	550	1597	−11	−27
%	68	32	100	47	18	34	100	0,7	1,7
Саратовское водохранилище									
V	220	633	852	174	36	643	853	61	−62
VI	242	354	596	145	64	352	561	29	6
VII	231	282	513	128	38	252	419	12	82
VIII	196	230	426	128	24	212	364	−11	73
IX	133	148	281	121	27	148	295	−43	29
X	71	75	146	109	53	98	259	−56	−57
$\sum_{сезон}$	1092	1722	2814	806	241	1705	2752	−8	71
%	39	61	100	29	9	62	100	0,3	2,5

Таблица 5. Тепловые балансы Горьковского, Куйбышевского и Саратовского водохранилищ в период с 2001 по 2022 г. (интенсивность тепловых потоков дана в Вт/м²)

Table 5. Heat balances of the Gorky, Kuibyshev, and Saratov reservoirs during the period from 2001 to 2022 (heat flow intensity is given in W/m²)

Месяц	Составляющие баланса							ΔΘ	$N_{тб}$, %
	Приход			Расход					
	$\Theta_р$	$\Theta_{прит}$	$\sum_{приход}$	$\Theta_{ис}$	$\Theta_о$	$\Theta_{ст}$	$\sum_{расх}$		
Горьковское водохранилище									
V	200	22	223	111	53	82	246	47	−70
VI	219	41	260	100	61	65	227	20	13
VII	212	52	264	107	51	74	231	18	15
VIII	168	52	219	90	46	60	195	−13	37
IX	102	35	137	57	27	41	124	−35	48
X	48	19	67	29	10	18	57	−42	52
$\sum_{сезон}$	949	221	1170	493	249	339	1081	−4	95
%	81	19	100	46	23	31	100	0,3	8,1
Куйбышевское водохранилище									
V	223	214	438	129	60	222	410	99	−71
VI	242	138	380	133	56	135	325	42	13
VII	240	99	339	135	49	104	288	25	26
VIII	203	78	281	121	44	92	257	−18	42
IX	132	51	183	80	43	62	185	−70	68
X	67	26	93	48	63	32	143	−85	35
$\sum_{сезон}$	1107	606	1714	646	316	647	1608	−7	113
%	65	35	100	40	20	40	100	0,4	6,6
Саратовское водохранилище									
V	231	677	908	137	23	671	831	25	52
VI	251	399	650	119	15	419	554	18	78
VII	248	309	557	122	11	328	461	−9	105
VIII	216	259	474	118	3	267	388	−44	130
IX	142	198	340	102	–	186	288	−55	107
X	75	123	198	83	32	91	206	−112	104
$\sum_{сезон}$	1163	1964	3127	795	84	1963	2842	−177	576
%	37	63	100	28	3	69	100	6	18

Таблица 6. Тепловые балансы Волгоградского водохранилища в разные периоды климатического воздействия (интенсивность тепловых потоков дана в Вт/м²)

Table 6. Heat balances of Volgograd reservoir in different periods of climatic influence (heat flow intensity is given in W/m²)

Месяц	Составляющие баланса							ΔΘ	$N_{тб}$, %
	Приход			Расход					
	$\Theta_р$	$\Theta_{прит}$	$\sum_{приход}$	$\Theta_{ис}$	$\Theta_о$	$\Theta_{ст}$	$\sum_{расх}$		
До 1976 г.									
V	224	428	652	177	36	448	661	83	−92
VI	245	212	456	174	64	231	470	47	−61
VII	238	153	391	175	38	158	371	21	−1
VIII	203	132	335	163	24	140	327	−14	22
IX	143	92	235	145	24	95	264	−65	36
X	82	61	143	120	38	64	222	−87	8
$\sum_{сезон}$	1134	1078	2212	954	223	1137	2314	−14	−88

%	51	49	100	41	10	49	100	1	4
В период с 2001 по 2022 г.									
V	233	412	645	155	23	453	631	79	−65
VI	251	243	494	148	14	272	434	46	14
VII	250	188	438	154	10	210	374	28	36
VIII	221	157	378	151	3	180	334	−6	50
IX	149	121	270	121	–	137	258	−74	86
X	81	75	156	100	29	88	217	−84	23
$\sum_{сезон}$	1186	1196	2382	829	79	1340	2248	−12	144
%	50	50	100	37	4	60	100	1	6

Другой важной составляющей приходной части баланса служит тепло, поступающее с притоком в водоем ($\Theta_{прит}$). Вклад этой величины изменяется от 7 до 60 % и в основном зависит от объема притока. Необходимо отметить, что при расчете $\Theta_{прит}$ (7) до 1976 г. температура водной массы самого верхнего в каскаде Иваньковского водохранилища рассчитывалась как средняя величина температуры воды основных впадающих рек [15].

В дальнейшем для всех водохранилищ каскада $\Theta_{прит}$ вычислялась с учетом температуры водной массы, рассчитанной по регрессионным уравнениям (табл. 1) и поступающей из вышележащего водоема. Допускалось, что объем сброса через гидросооружения равен объему притока в водохранилища. Рассматривая процентное соотношение составляющих приходной части баланса, приходим к выводу, что с постепенным увеличением объема поступающего тепла в каждый нижерасположенный по каскаду водоем вклад $\Theta_р$ постепенно уменьшается.

Основная расходная часть теплового баланса водохранилищ Верхней Волги и Куйбышевского водохранилища – затраты тепла на испарение, достигающие 40–65 % от общего расхода тепла. На Саратовском и Волгоградском водохранилищах за счет увеличения поступления тепла с притоком воды вклад $\Theta_{ис}$ составляет 28–41 % (табл. 2–6). В целом по каскаду в современный период интенсивность испарения с поверхности водохранилищ меньше на 2–22 % (в среднем на 10 %) по сравнению с периодом до потепления климата. С другой стороны, на Рыбинском и Иваньковском водохранилищах испарение увеличилось после 2000 г. на 17–22 %.

Выявленные различия в затратах тепла на испарение для водохранилищ волжского каскада могут быть объяснены следующим образом. В современный период средняя скорость ветра, учитываемая в (4), согласно метеоданным, меньше на 14 % таковой, принятой для периода до потепления климата. Уменьшение вклада скорости ветра в итоге приводит к уменьшению интенсивности испарения для конкретного водоема. Далее, при расчете $\Theta_{ис}$ максимальная упругость водяного пара E_0 определяется по температуре поверхности воды, которая, в свою очередь, вычисляется по уравнениям регрессии (табл. 1). При этом ранее [13] было отмечено, что ошибки расчетов $T_{вм}$ и

$T_{пов}$ по указанным уравнениям могут достигать 20 %. Кроме того, неточности в расчете $\Theta_{ис}$ также могут быть связаны со сложностью выбора коэффициентов, характеризующих особенности берегового расположения метеостанций относительно водоема и используемых при расчете скорости ветра на высоте 2 м над водной поверхностью.

Таким образом, полученные величины интенсивности испарения для волжских водохранилищ следует считать ориентировочными, требующими дальнейшей более детальной корректировки. Наиболее низкая точность расчетов затрат тепла на испарение и турбулентного теплообмена между поверхностью водоемов и атмосферой отмечалась также ранее при проведении комплексных исследованиях водной среды ряда озер Северо-Запада России [11].

Тепловой сток из водохранилищ, как значимая составляющая расходной части их теплового баланса, оказывает существенное влияние на термический режим каждого нижележащего по каскаду водоема, а в суммарном выражении – на термику Северного Каспия. Согласно расчетам, адвективный теплообмен волжских водохранилищ в современный период в сравнении с периодом до потепления климата в среднем увеличился на 11 % в соответствии с аналогичным увеличением стока из водоемов на 2–14 % (табл. 7).

Таблица 7. Отношение среднего объема притока ($Q_{ср\ прит}$) к объему водохранилища (W)
Table 7. Ratio of the average inflow volume ($Q_{averinf}$) to the reservoir volume (W)

Водохранилище	W, км^3	До 1976 г.		После 2000 г.	
		$Q_{ср\ прит}$, км^3	$Q_{ср\ прит}$ / W, %	$Q_{ср\ прит}$, км^3	$Q_{ср\ прит}$ / W, %
Иваньковское	1,1	0,6	57	0,7	65
Угличское	1,2	0,7	56	0,8	64
Рыбинское	25,4	2,4	10	2,3	9
Горьковское	8,8	3,9	44	4,3	49
Куйбышевское	57,3	21,8	38	24,8	43
Саратовское	12,9	21,1	164	22,8	177
Волгоградское	31,4	22,1	70	22,6	72

В целом величина потерь тепла за счет стока во всех водохранилищах определяется соотношением объема стока и объема самого водоема. При относительно небольшом объеме стока по сравнению с объемом водоема (Рыбинское водохранилище) адвективные потери тепла минимальные. В случае объема стока, близкого к объему водохранилища или превышающего его, тепловой сток в нижний бьеф составляет 19–40 % от расходной части теплового баланса. Наибольший же вынос тепла происходит из Саратовского и Волгоградского водохранилищ (49–69 % от расходной части баланса) (табл. 5–6).

Результирующий тепловой поток, проходящий через открытую водную поверхность, определяемый уравнением: $\Theta_{рез} = \Theta_р - \Theta_{эф} - \Theta_{ис} - \Theta_{то}$, увеличился для верхневолжских водохранилищ в 1,5–16 раз, для Куйбышевского и Сара-

товского водохранилищ соответственно в 3 и 7,4 раза. В Волгоградском водохранилище $\Theta_{рез}$ до 1976 г. близок к нулю, а в современный период выявлено его существенное увеличение (рис. 1).

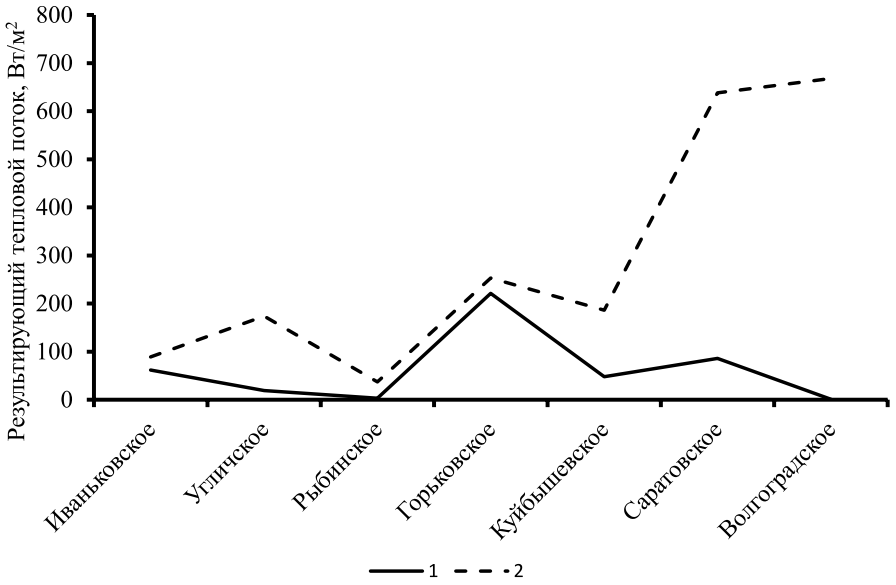


Рис. 1. Результирующий тепловой поток, проходящий через открытую водную поверхность водохранилищ $\Theta_{рез}$, Вт/м². 1 – до 1976 г., 2 – после 2000 г.

Fig. 1. The resulting heat flow passing through the open water surface of reservoirs Θ_{res}, W/m². 1 – before 1976, 2 – after 2000

Уравнение теплового баланса замыкается величиной изменения теплозапаса всей массы воды водоемов. При этом на сбалансированность всех составляющих теплового баланса указывает величина невязки ($N_{тб}$, %), которая включает ошибки определения отдельных учтенных элементов баланса и его неучтенные элементы. Кроме того, из-за сложности режима метеорологических элементов и других переменных, записанных в левой части уравнения (1), точность их расчета может не поддаваться достоверной оценке, т. к. расчетные значения составляющих нельзя сопоставить с измеренными величинами [12].

В результате немногочисленных работ по расчету тепловых балансов было показано, что его невязки могут составлять от 5 до 50 % [2, 7, 11]. Проведенные расчеты тепловых балансов волжских водохранилищ показали разброс невязок от 1,7 до 7,6 % для периода до 1976 г. и 5–8,4 % для периода после 2000 г., что указывает в целом на удовлетворительную сбалансированность составляющих баланса. Исключение составила невязка теплового баланса Саратовского водохранилища в современный период с величиной 18 %, что может быть связано с ограниченным количеством необходимой гидрометеорологической информации.

ВЫВОДЫ

Проведенный расчет тепловых балансов волжских водохранилищ позволил сделать следующие выводы. В целом, допуская определенные методические сложности в оценке отдельных составляющих балансов, можно заключить, что потепление климата повлияло на их структуру в современных условиях.

Вклад $\Theta_{рез}$ в формирование теплового режима водохранилищ во все рассматриваемые периоды в среднем не превышает 10 %. Основной вклад в теплосодержание водоемов вносит поступление тепла с втекающими водными массами. Для верхневолжских водохранилищ он составляет в среднем 18 %, а для водохранилищ Средней и Нижней Волги – 48 %.

За счет увеличения теплового стока в современный период в ряде водохранилищ тепло, накапливаемое их водными массами с мая по октябрь, в большей степени расходуется. В Рыбинском водохранилище тепло аккумулируется, а в Куйбышевском потери тепла сокращаются, что связано, как указывалось ранее, с соотношением притока в водоем и его объема.

Разброс невязок тепловых балансов для волжских водохранилищ от 1,7 до 8,4 %, несмотря на их приемлемые значения, все же, на наш взгляд, указывает на объективную сложность в достоверной оценке таких балансов для простых и сложных в морфометрическом отношении водоемов. Проведенные оценки тепловых балансов волжских водохранилищ следует рассматривать как ориентировочные, требующие дальнейших уточнений с использованием более полной гидрометеорологической информации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS
The author declares no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бояринов П. М., Петров М. П. Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов. Л.: Наука,1991. 176 с.
2. Гидрологический режим Камского водохранилища / подред. А. Б. Китаева. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2020. 463 с.
3. Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / под ред. С. А. Кондратьева, Ш. Р. Позднякова, В. А. Румянцева. М: Российская академия наук, 2021. 637 с. https://doi.org/10.12731/978-5-907366-50-3
4. Duan Z., Bastiaanssen W. G. M. A new empirical procedure for estimating intra-annual heat storage changes in lakes and reservoirs: review and analysis of 22 lakes // Remote sensing of environment. 2015. Vol. 156. P. 143–156. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.009
5. Duan Z., Bastiaanssen W. G. M.Evaluation of three energy balance-based evaporation models for estimating monthly evaporation fo five lakes using derived heat storage changes from a hysteresis model // Environmental Research Letters. 2017. Vol. 12. No. 2. Art. 024005. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa568e

6. Panin G. N., Grechushnikova M. G., Puklakov V. V. Adapting a Model of Heat and Mass Exchange between a Water Body and the Atmosphere Taking into Account the Effect of Shallows: Case Study of the Ivankovo Reservoir // Water Resources. 2011. Vol. 38. No. 6.P. 818–826. https://doi.org/10.1134/S0097807811060133
7. Зайцева Е. А. Уточнение составляющих теплового баланса Рыбинского водохранилища // Сборник работ Рыбинской ГМО. Л: Гидрометеорологическое издательство, 1969. С. 11–21.
8. Pierre A., Nadeau D. F., Thiboult A., Rousseau A. N., Tremblay A., Isabelle P.-E., Anctil F. Characteristic time scales of evaporation from a subarctic reservoir // Hydrological Processes. 2023. Vol. 37. No. 3. P. 1–16. https://doi.org/10.1002/hyp.14842
9. Spank U., Hehn M., Bernhofer C., Keller P., Roschorrek M. A season of eddy-covariance fluxes above an extensive water body based on observation from a floating platform // Boundary-Layer Meteorology. 2020. Vol. 174. No. 3. P. 433–464. https://doi.org/10.1007/s10546-019-00490-z
10. Pierre A., Nadeau D. F., Thiboult A., Rousseau A. N., Anctil F., Deblois Ch. P., Demarty M., Isabelle P.-E., Tremblay A. Does the operation of a reservoir alter its interactions with the atmosphere? Investigating the role of advective fluxes on energy and hydrological balances of the Romaine-2 subarctic hydropower reservoir // Journal of Hydrometeorology. 2024. Vol. 25. No. 3. P. 391–411. https://doi.org/10.1175/JHM-D-23-0149.1
11. Антропогенное влияние на крупные озера Северо-Запада СССР. Часть I. Гидрология и гидрохимия озера Белого. Л.: Наука, 1981. 250 с.
12. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Куйбышевское и Саратовское водохранилища. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 270 с.
13. PoddubnyiS. A., Zakonnova A. V., Tsvetkov A. I., Trofinmenko L. T., Shvets N. V. Current Hydrological Regime of the Volga Reservoirs // WaterResources. 2023. Vol. 50. No. 3. P. 345–357. https://doi.org/10.1134/S0097807823030107
14. Веселов В. М., Прибыльская И. Р., Мирзеабасов О. А. Специализированные массивы для климатических исследований [Электр. ресурс] // Copyright© 2000–2011–2018–2024 ВНИИГМИ-МЦД / WebАисори-М: http://meteo.ru/services/data-providing/ (дата обращения: 19.08.2025).
15. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. Вып. 23. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 629 с.

REFERENCES

1. Boyarinov P. M., Petrov M. P. Processes of formation of thermal regime of deep freshwater reservoirs. Leningrad: Nauka, 1991. 176 p.
2. Hydrological regime of the Kama Reservoir / ed. by A. B. Kitaev. Perm: Perm State National Research University 2020. 463 p.
3. Current state and problems of anthropogenic transformation of the Lake Ladoga ecosystem in a changing climate / edited by S. A. Kondratyev, Sh. R. Pozdnyakov, V. A. Rumyantsev. Moscow: Russian Academy of Sciences, 2021. 637 p. https://doi.org/10.12731/978-5-907366-50-3
4. Duan Z., Bastiaanssen W. G. M. A new empirical procedure for estimating intra-annual heat storage changes in lakes and reservoirs: review and analysis of 22 lakes. *Remote sensing of environment*. 2015. Vol. 156. P. 143–156. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.009
5. Duan Z., Bastiaanssen W. G. M. Evaluation of three energy balance-based evaporation models for estimating monthly evaporation fo five lakes using derived heat storage changes from a hysteresis model. *Environmental Research Letters*. 2017. Vol. 12. No. 2. Art. 024005. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa568e
6. Panin G. N., Grechushnikova M. G., Puklakov V. V. Adapting a Model of Heat and Mass Exchange between a Water Body and the Atmosphere Taking into Account the Effect of Shallows: Case Study of the Ivankovo Reservoir. *Water Resources*. 2011.Vol. 38. No. 6.P. 818–826. https://doi.org/10.1134/S0097807811060133

7. Zaitseva E. A. Clarification of the components of the heat balance of the Rybinsk Reservoir // Collection of works of the Rybinsk Hydrometeorological Observatory. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House, 1969. P. 11–21.
8. Pierre A., Nadeau D. F., Thiboult A., Rousseau A. N., Tremblay A., Isabelle P.-E., Anctil F. Characteristic time scales of evaporation from a subarctic reservoir. *Hydrological Processes*. 2023. Vol. 37. No. 3. P. 1–16. https://doi.org/10.1002/hyp.14842
9. Spank U., Hehn M., Bernhofer C., Keller P., Roschorrek M. A season of eddy-covariance fluxes above an extensive water body based on observation from a floating platform. *Boundary-Layer Meteorology*. 2020. Vol. 174. No. 3. P. 433–464. https://doi.org/10.1007/s10546-019-00490-z
10. Pierre A., Nadeau D. F., Thiboult A., Rousseau A. N., Anctil F., Deblois Ch. P., Demarty M., Isabelle P.-E., Tremblay A. Does the operation of a reservoir alter its interactions with the atmosphere? Investigating the role of advective fluxes on energy and hydrological balances of the Romaine-2 subarctic hydropower reservoir. *Journal of Hydrometeorology*. 2024. Vol. 25. No 3. P. 391–411. https://doi.org/10.1175/JHM-D-23-0149.1
11. Anthropogenic influence on large lakes of the North-West USSR. Part I. Hydrology and hydrochemistry of Lake Beloye. Leningrad: Nauka, 1981. 250 p.
12. Hydrometeorological regime of lakes and reservoirs of the USSR. Kuibyshev and Saratov reservoirs. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978. 270 p.
13. Poddubnyi S. A., Zakonnova A. V., Tsvetkov A. I., Trofinmenko L. T., Shvets N. V. Current Hydrological Regime of the Volga Reservoirs. *Water Resources*. 2023. Vol. 50. No. 3. P. 345–357. https://doi.org/10.1134/S0097807823030107
14. Veselov V. M., Pribylskaya I. R., Mirzeabasov O. A. Specialized arrays for climate research [Electronic resource] // Copyright© 2000–2011–2018–2024 VNIIGMI-MCD / Web Aisori-M: http://meteo.ru/services/data-providing (accessed 08/19/2025).
15. Long-term data on the regime and resources of surface waters on land. Vol. 1. Iss. 23. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. 629 p.

Сведения об авторе:

Поддубный Сергей Артурович, д-р геогр. наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией гидрологии и гидрохимии, ФГБУН «Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина» РАН, Россия, 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок; https://orcid.org/0000-0002-5793-3755; e-mail: spod@ibiw.ru

About the author:

Sergey A. Poddubny, Doctor of Geographical Sciences, Chief Researcher, Head of the Laboratory of Hydrology and Hydrochemistry, Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, Borok, Nekouzskiy raion, Yaroslavl oblast, 152742, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-5793-3755; e-mail: spod@ibiw.ru

Поступила в редакцию / Received 13.05.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 18.09.2026.
Принята к публикации / Accepted 24.09.2026.