

УДК 556.555

Структура водохранилища и ее роль в формировании температурного режима

С.А. Двинских, В.М. Носков

Пермский государственный университет

При описании физических процессов, происходящих в природе, долгое время придерживались точки зрения Аристотеля, согласно которой важность целого превышает важности его составляющих. Взгляды Аристотеля господствовали в физике на протяжении многих столетий, пока Галилей не высказал иную точку зрения, обоснованную впоследствии Ньютоном: целое объясняется свойствами его элементарных составляющих. Иначе говоря, знание о сложном объекте можно получить, изучая свойства его элементов, любую сложную систему можно разложить на простые системы (подсистемы). Применительно к водохранилищам удобнее всего это сделать на основе районирования. Последнее трактуется как «метод членения исследуемой территории на такие таксоны, которые отвечали бы, по крайней мере, двум критериям – критерию специфики выделяемых территориальных ячеек и критерию взаимосвязанности насыщающих их элементов» [4].

Опыт многолетнего изучения водохранилищ [3; 7; 5] показывает, что влияние природных факторов и деятельности человека на характер и интенсивность всех внутриводоемных процессов, а также своеобразное взаимодействие водоема с окружающей средой обуславливают особенности его морфометрии и морфологии. С учетом опыта районирования крупных водохранилищ можно выделить следующую систему таксономических единиц: плес, гидрологический район, гидрографический участок. Внутри каждой единицы могут быть установлены глубоководная и мелководная зоны, линейно вытянутые вдоль берега, определяющие перенос вещества и энергии. Необходимость их выделения сомнений не вызывает, так как обусловлено разными процессами. К своеобразию мелководной зоны относится ее положение, определяющее функции разграничения и связи между этими средами: постоянный контакт прибрежных вод с дном и атмосферой, обеспечивающий непрерывный обмен теплом и веществом между водой, грунтом и воздухом, освещенность, достигающая дна и достаточная для роста донной растительности; зарастание дна мелководий различными фитоценозами. Для мелководий характерен замедленный водообмен, способствующий интенсивному протеканию здесь биологических и биохимических процессов. Особенности формирования компонентов мелководий зависят от их морфологических и морфометрических характеристик, литологии, места положения в плане. Эти же характеристики в конечном счете определяют здесь и особенности динамики водных масс. Сказанное находит отражение и в классификации водохранилищ, проводимых по другим показателям [2; 7].

Обе зоны имеют вертикальную и горизонтальную структуру. Вертикальная характеризуется специфической совокупностью элементов, образующих систему, а горизонтальная – особенностью расположения и взаимодействия отдельных частей. Первая в основном претерпевает изменения во времени, вторая – в пространстве.

Вертикальная (ярусная) структура водохранилища включает породы дна, донные отложения, водную массу, растительный и животный мир, приземный слой атмосферы. По терминологии физико-географического районирования вертикальная структура глубоководной части водоема является «неполным» комплексом, так как взаимодействие трех основных компонентов географической оболочки (атмосферы, гидросферы и литосферы) частично проявляется в пограничных областях (у дна и у поверхности водного зеркала), а в полной мере – лишь в мелководной зоне. Следовательно, глубоководная зона – неполный географический комплекс, а мелководная зона – полный.

Горизонтальное (пространственное) строение водохранилища – это сочетание входящих в его состав частей более низкого таксономического уровня и ландшафтных элементов. Устойчиво повторяющееся, обусловленное генезисом или обменом веществом и энергией сочетание более мелких единиц называют «морфологией ландшафта» или «морфологической структурой» [8]. Следовательно, изучив морфологическую структуру водохранилища, можно получить представление о его горизонтальном строении, которое служит основанием для морфометрического районирования.

Временные масштабы изменения элементов вертикального и горизонтального строения значительно отличаются друг от друга. Если элементы вертикального строения могут изменять свои характеристики не только по сезонам года, но и внутри суток (так температурный и кислородный режимы водной массы имеют суточный ход), то элементы горизонтального строения более устойчивы: морфология может сохраняться неизменной на протяжении нескольких лет, а морфометрия более изменчива и в основном определяется уровнем режимом водоема. Но, несмотря на временную разницу в динамике вертикального и горизонтального строения, они взаимосвязаны. Морфология, определяя объемы водных масс и гидродинамические процессы (течения, волнение) влияет на термическую стратификацию, вертикальный водообмен, насыщение водных масс кислородом и т.д. В то же время изменение вертикального строения системы (толщина водной массы, слой донных отложений) сказывается на морфометрии, но все-таки ведущая роль принадлежит более устойчивому горизонтальному строению, которое и должно быть основным при проведении районирования водохранилищ. Районирования по другим показателям должны укладываться в рамки основного.

Таким образом, структура водохранилища выражается в характере внутренних взаимосвязей компонентов его вертикального и горизонтального строения, характеризующихся изменением как во времени, так и в пространстве. Горизонтальное строение лежит в основе выделения районов, однотипных по морфологии и морфометрии, а вертикальное – в выделении зон,

отличающихся по характеру взаимодействия между компонентами. Если в первом случае количество районов будет зависеть от сложности рельефа котловины водохранилища, то во втором в первую очередь выделяются глубоководная и мелкоководная зоны (в зависимости от глубины), которые могут быть подразделены на более мелкие части, что зависит от решаемой задачи.

Благодаря тесной связи между горизонтальным и вертикальным строением внутри каждого района можно выделить зоны, а внутри зон – подзоны. Водоохранилище как систему можно представить и состоящим из подсистем – зон или районов.

Следовательно, иерархическое описание водохранилища может вестись несколькими путями: горизонтального строения, вертикального строения и комплексное. Выбор вида описания зависит от поставленной проблемы.

Пространственная неоднородность температурного поля показывает, что теплообменные процессы в различных частях водохранилищ протекают неодинаково и имеют свои особенности. Посредством морфометрии осуществляется влияние основных факторов на процессы теплообмена, которые в конечном итоге формируют температурный режим водохранилища. В связи с этим при изучении термического режима водохранилищ нами использована морфометрическая схема районирования Ю.М. Матарзина и И.К. Мацкевича [7], примененная к Камскому водохранилищу и относящаяся к комплексным схемам. В основу деления сложного в морфологическом отношении водоема авторами положен комплекс морфолого-морфометрических показателей, в соответствии с которыми по длине водоема выделяются главный и крупные краевые плесы, гидрографические районы и участки, а в их пределах – морфодинамические глубоководная, мелкоководная и прибрежная зоны. Основной таксономической единицей по длине водохранилища является гидрографический район, а по ширине – морфодинамическая зона. Так как интенсивность теплообменных процессов в мелкоководной и глубоководной зонах во все периоды термического цикла неодинакова (в период весенне-летнего нагревания температура водной массы глубоководной зоны отстает от температуры мелкоководной, в период охлаждения наблюдается обратная картина), то глубоководную морфометрическую зону можно характеризовать как теплоинертную, а мелкоководную – как теплоактивную зону гидрографического района.

Для количественной характеристики роли морфометрического фактора в формировании термики отдельных районов водохранилища мы предлагаем морфометрический коэффициент, выражающий отношение объема теплоактивной мелкоководной зоны района к объему теплоинертной глубоководной зоны:

$$K_m = W_m/W_T \quad (1)$$

Величина морфометрического коэффициента (табл. 1) косвенно указывает на интенсивность теплообменных процессов в гидрографическом районе: чем больше его величина, тем интенсивнее идут как процессы нагревания, так и охлаждения. В различные периоды термического цикла зависимость между

Таблица 1

**Среднемесячная температура воды в поверхностном слое по районам и зонам Камского водохранилища
за период 1957-1985 гг. и его морфометрические показатели**

Район	Среднемесячная температура воды, С ⁰						Объемы, км ³			К _м	Площади зон, км ²	
	V	VI	VII	VIII	IX	X	Район	Глуб. зона	Мелк. зона		Глуб.	Мелк.
I	6,8	14,8	19,8	17,3	11,3	3,4	1,44	0,048	1,40	29,2	20	401
II	7,3	15,3	20,0	17,9	12,2	4,5	5,37	0,113	5,26	46,5	83	793
III	6,0	14,8	19,7	18,7	14,1	7,1	2,73	0,961	1,77	1,84	133	9,4
IV	7,2	15,2	19,8	18,3	13,3	5,7	1,97	0,356	1,61	4,52	90	175
Все водохранилище	6,8	15,0	19,8	18,0	12,7	5,2	11,5	1,478	10,03	6,79	326	1463

величинами коэффициента и температурой воды неоднозначна: в период весенне-летнего нагревания наблюдается прямая зависимость, в период осеннего охлаждения – обратная.

Учитывая, что направленность теплообменных процессов и их количественная характеристика определяются балансом энергии, в качестве основного выбран балансовый метод исследований.

Уравнение теплового баланса имеет следующий вид:

$$\pm B \pm Q_r - LE \pm P + Q_{пр} - Q_{ст} = \pm \Delta\theta \pm \delta . \quad (2)$$

Здесь B – радиационный баланс, Q_r – теплообмен с грунтами дна; LE – потери тепла на испарение; P – турбулентный теплообмен с атмосферой; $Q_{пр}$, $Q_{ст}$ – тепловой приток и сток; $\Delta\theta$ – изменение теплозапаса водной массы; δ – невязка теплового баланса. Кроме величины затрат тепла на испарение, которая всегда отрицательна, все остальные составляющие баланса могут быть как положительными (тепловой поток направлен к воде), так и отрицательными (тепловой поток направлен от воды). Все величины выражены в МДж/м²мес.

Радиационная составляющая теплового баланса, т.е. радиационный баланс, рассчитывалась по уравнению

$$B = R (1 - A) - E_{эф} , \quad (3)$$

где B – величина радиационного баланса; R – суммарная солнечная радиация; A – альbedo водной поверхности (в долях от единицы); E – эффективное излучение водной поверхности.

Суммарная солнечная радиация взята по данным актинометрических наблюдений на береговой ГМС Чермоз, расположенной в центральной части Камского водохранилища в непосредственной близости от уреза воды.

Для расчета эффективного излучения с поверхности Камского водохранилища была использована формула, рекомендованная Т.В. Кирилловой [6].

Расчет был произведен дифференцированно для каждого района водохранилища и показал, что наибольшие сезонные суммы эффективного излучения приходятся на третий район, наименьшие – на второй. В период весенне-летнего нагревания наибольшие величины эффективного излучения наблюдаются в первом районе, наименьшие – в третьем. В период осеннего охлаждения картина меняется на противоположную: наибольшие значения эффективного излучения наблюдаются в третьем районе, имеющем наибольший объем глубоководной зоны и, как следствие, наибольшую температуру воды. Минимальные значения отмечены во втором районе, имеющем наименьший объем и наибольшую интенсивность процесса охлаждения.

Важным фактором, определяющим величину эффективного излучения, является облачность. Удалось выявить графическую зависимость эффективного излучения от облачности только для первого и второго районов Камского водохранилища, связь обратная, причем наиболее тесная связь характерна для второго района. Это объясняется тем, что влияние

облачности сильнее проявляется на большой площади водной поверхности (рис.1).

Рассчитанные значения радиационного баланса по районам Камского водохранилища за 14-летний период (1966-1979) показали, что максимальные значения радиационного баланса наблюдаются в районе с наибольшим объемом и площадью мелководной зоны, наименьшие связаны с районом, имеющим наибольший объем глубоководной зоны.

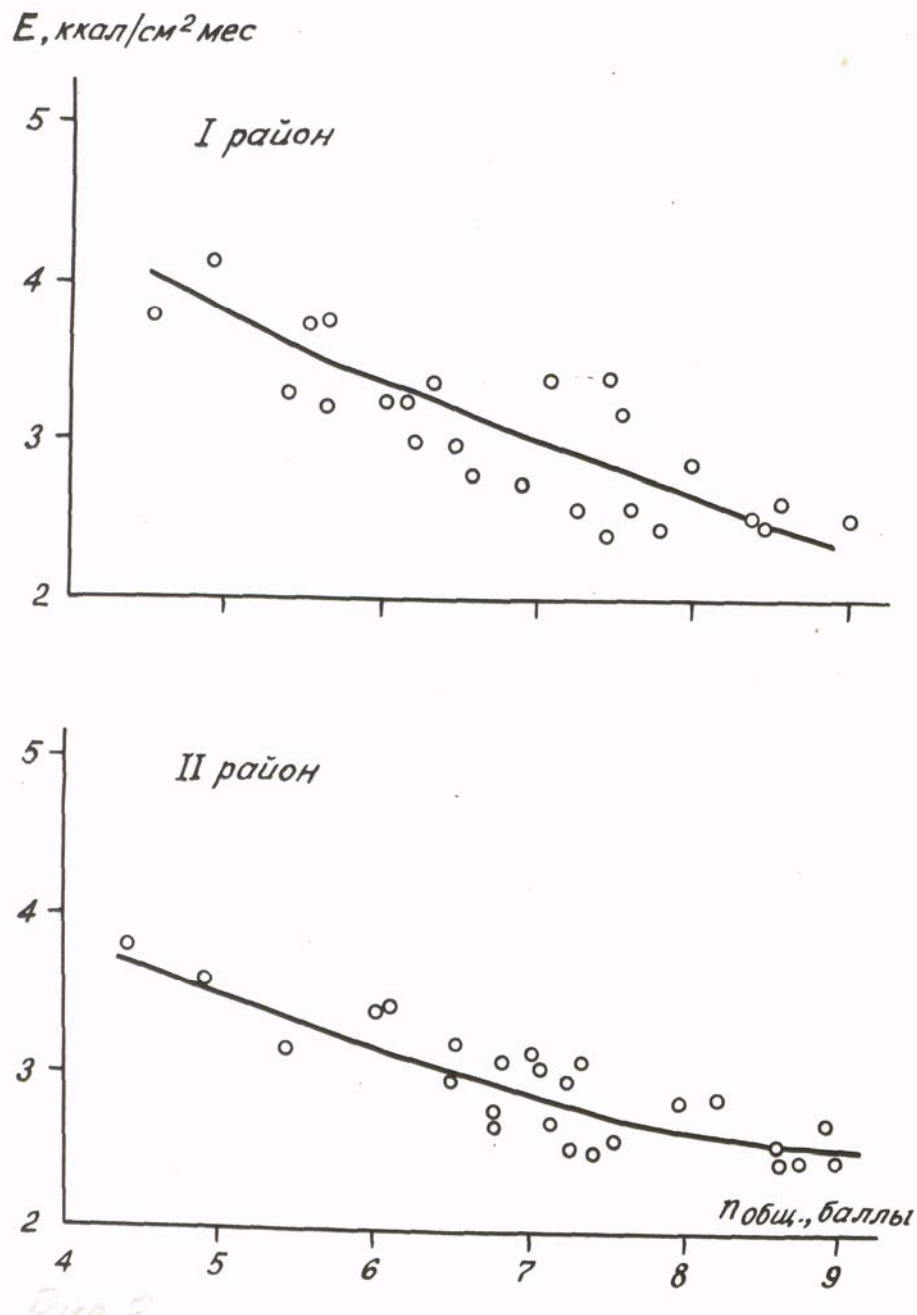


Рис. 1. Связь величин эффективного излучения и облачности для I и II районов Камского водохранилища

Следующими по величине составляющими теплового баланса являются величины потерь тепла на испарение и турбулентного теплообмена с

атмосферой, которые были рассчитаны по формулам А.П. Браславского [1]. Анализ рассчитанных величин показал, что период весенне-летнего нагревания характеризуется наибольшими потерями тепла на испарение в районах с наибольшими объемами и площадями мелководной зоны. В период осеннего охлаждения наблюдается обратная картина.

Величина турбулентного теплообмена с атмосферой в начале периода весенне-летнего нагревания положительна, ее максимальные величины наблюдаются в районе с наибольшим объемом глубоководной зоны. Переход к отрицательным значениям турбулентного теплообмена происходит в июне, когда возрастает роль морфометрического фактора. Наибольшее влияние морфометрии сказывается в конце осеннего охлаждения, когда величина турбулентного теплообмена в районе, имеющем наибольший объем глубоководной зоны, более чем в два раза превышает соответствующие величины района, имеющего наименьший объем глубоководной зоны.

Наименьший по величине член в уравнении теплового баланса – теплообмен с грунтом дна. В период весенне-летнего нагревания наибольший теплообмен в направлении от воды к грунту происходит в районах водохранилища, имеющих наименьшие объемы и среднюю глубину (первый, второй и четвертый районы). В период осеннего охлаждения картина меняется на противоположную: тепловой поток направлен от грунта к воде и его наибольшая величина наблюдается в районе с максимальным объемом глубоководной зоны.

Максимальная величина результирующего члена теплового баланса – изменения теплозапаса водной массы – также отмечается в третьем районе, имеющем наибольший объем глубоководной зоны.

Результаты расчета теплового баланса по районам Камского водохранилища за многолетний период приведены в табл.2.

Таблица 2

Среднемесячные составляющие теплового баланса по районам Камского водохранилища за многолетний период, мДж/ м² мес.

Месяц	B	Q _г	LE	P	Δθ	δ
I район						
V	416,7	-38,0	-142,1	42,6	181,4	97,8
VI	443,1	-41,4	-221,1	-11,7	42,2	126,6
VII	447,2	-32,2	-322,2	-44,3	-8,78	39,7
VIII	288,4	-9,2	-224,9	-65,6	-68,1	56,8
IX	109,1	13,0	-181,4	-60,6	-102,8	-17,1
X	-20,1	32,2	-123,7	-85,2	-104,9	-92,0
V-X	1688,7	-75,6	-1216,4	-224,9	-61,0	
II район						
V	426,4	-37,6	-110,8	38,4	275,5	41,0
VI	455,6	-40,5	-205,7	-13,8	137,9	57,7
VII	455,6	-30,9	-263,3	-29,3	38,0	94,1
VIII	296,8	-11,7	-244,9	-48,1	-107,8	-99,9
IX	113,2	12,1	-178,9	-60,2	-162,6	-48,9
X	-10,9	30,5	-125,8	-77,7	-205,6	21,7

V-X	1759,8	-78,2	-1128,6	-190,6	-24,7	
III район						
V	426,4	-92,1	-84,8	74,0	464,0	-80,6
VI	447,3	-33,8	-190,2	-4,18	253,7	-34,7
VII	443,1	-24,2	-232,4	-26,8	123,7	35,9
VIII	281,7	-6,27	-273,0	-62,3	-102,4	42,6

Окончание табл.2

Месяц	B	Q _г	LE	P	Δθ	δ
IX	92,8	11,7	-228,6	-78,2	-252,0	49,7
X	-33,4	21,7	-178,5	-134,5	-397,5	72,7
V-X	1417,0	-63,1	1187,1	-232,0	89,4	
VI район						
V	415,0	-37,6	-116,2	51,4	250,0	65,6
VI	451,4	-40,1	-198,6	2,09	157,6	57,2
VII	443,1	-30,9	-255,4	-28,4	67,7	60,6
Месяц	B	±Q _г	-LE	±P	Δθ	δ
VIII	284,6	-8,36	-295,1	-56,8	-76,9	1,25
IX	99,1	12,5	-190,1	-64,8	-166,8	23,4
X	16,3	30,5	-149,6	-102,8	-223,2	-23,8
V-X	1680,3	-72,3	1203,8	-201,4	8,36	

Сравнительный анализ результатов расчета составляющих теплового баланса с величинами морфометрического коэффициента показал, что все составляющие теплообменных процессов испытывают влияние морфометрии: между величинами потерь тепла на испарение, турбулентного теплообмена, изменением сезонных сумм теплозапаса и величиной морфометрического коэффициента выявлена обратная зависимость.

Основную роль в тепловом балансе водоема играет суммарная солнечная радиация (R), поэтому ход температуры воды (t) в безледоставный период определяется ее величиной, а связь $t = f(R)$ в свете сказанного выше должна иметь характерный для морфометрического участка вид. Исследования показали, что для условий Камского водохранилища сезонный цикл $t = f(R)$ графически представляет собой петлю, по форме напоминающую незамкнутый декартов лист, смещенный от начала координат в положительном направлении оси абсцисс (рис.2).

Любой внутренний водоем обладает тепловой инерцией и величина ее тем больше, чем больше его объем и средняя глубина. Очевидно, что процесс нагревания и охлаждения водоема есть явление гистерезисное.

Правая половина петли соответствует периоду весенне-летнего нагревания, т.е. периоду интенсивного увеличения температуры воды при незначительном увеличении суммарной солнечной радиации. Это объясняется тем, что к моменту очищения водохранилища от льда, а это происходит в первой декаде мая, температура воды не превышает 1-2°, в то время как величина суммарной солнечной радиации уже достаточно велика. Дальнейший рост температуры воды происходит под воздействием этой мало изменяющейся величины солнечной радиации. Достигнув максимальных значений, суммарная солнечная радиация и температура воды начинают

уменьшаться, причем разброс точек на участке кривой подъема гораздо больше, чем на участке кривой спада. Это объясняется тем, что в период весенне-летнего нагревания в умеренных широтах наблюдаются частые возвраты холодов, которые ощутимо воздействуют на термический режим водохранилища. Эти особенности характерны для всех четырех районов водохранилища.

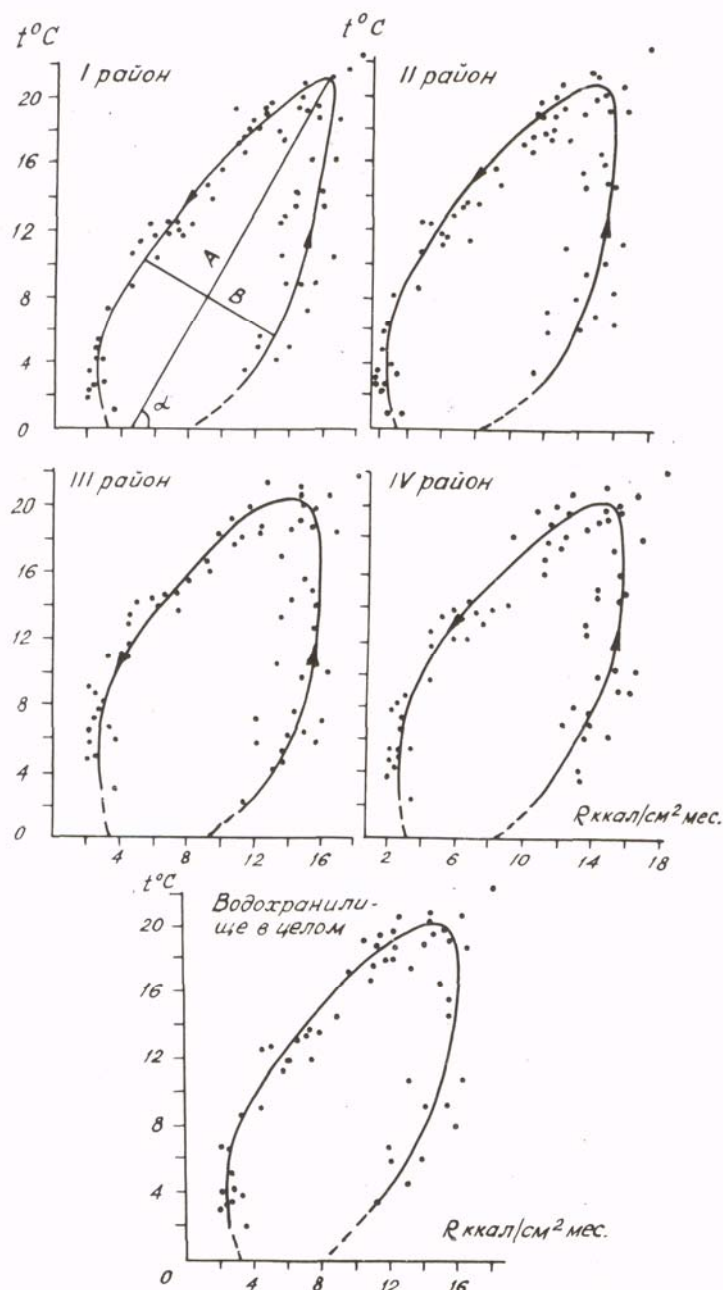


Рис. 2. Связь величин суммарной солнечной радиации и температура воды в поверхностном слое по районам Камского водохранилища

Дальнейший анализ графиков показал, что все элементы петли гистерезиса: длина основной (А) и длина короткой (В) осей, угол между основной осью и осью абсцисс (α) и годовая амплитуда температуры воды

(At) зависят от морфометрических особенностей районов водохранилища (табл.3).

Длина большой (A) оси увеличивается с увеличением годовой амплитуды температуры воды, которая определяется такими морфометрическими показателями, как средняя глубина, объем района и объем глубоководной зоны морфометрического района. Первый район водохранилища имеет наименьшие среднюю глубину и объем и, как следствие, максимальную амплитуду и длину основной оси (A). Величина амплитуды зависит и от объема глубоководной зоны: большой объем глубоководной зоны уменьшает амплитуду колебания температуры воды. Например, полный объем второго района почти в два раза превышает объем третьего, но амплитуда и длина большой оси третьего района меньше, чем второго, поскольку объем его глубоководной зоны примерно в 9 раз больше, чем второго.

Таблица 3

Морфометрические показатели Камского водохранилища и элементы петли гистерезиса связи $t = f(R)$

Район водохранилища	Глубина при НПГ, м	Объемы зон, млн.м ³			Элементы петли гистерезиса			
		общий	глубоководной	мелководной	A, см	B, см	α , град.	At, C ⁰
I	3,4	1443,0	48,0	1395,0	12,0	4,5	60	20,0
II	6,2	5368,0	112,8	5255,2	11,5	5,0	64	20,8
III	15,0	2731,0	961,1	1769,9	11,0	5,5	67	20,4
IV	6,3	1966,0	355,6	1610,0	11,2	5,0	63	20,2

Длина короткой оси гистерезиса (B) определяется средней глубиной района и объемом его глубоководной зоны: с увеличением этих показателей длина оси увеличивается. Таким образом, длина основной и короткой осей характеризуют степень тепловой инерции водоема и его отдельных районов. Угол между основной осью и осью абсцисс тем больше, чем больше средняя глубина и объем глубоководной зоны.

Угол между основной осью (A) и осью абсцисс также является показателем тепловой инерции, так как интенсивность теплообменных процессов и его величина находятся в прямой зависимости от средней глубины района и объема его глубоководной зоны.

Следовательно, любой внутренний водоем обладает тепловой инерцией и величина ее тем больше, чем больше объем его глубоководной зоны и средняя глубина данного водоема. Очевидно, что сам процесс нагревания и охлаждения водоема есть явление гистерезисное.

Полученные результаты подтверждают правильность дифференцированного подхода к исследованиям крупных водохранилищ и доказывают, что распределение суммарной солнечной радиации и

дальнейшее формирование термического режима водохранилища определяется его морфометрией.

Библиографический список

1. *Браславский А.П.* Указания по расчету испарения с поверхности водоемов / А.П. Браславский. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 92 с.
2. *Буторин Н.В.* Особенности гидрологических процессов в мелководных зонах равнинных водохранилищ / Н.В. Буторин // Водные ресурсы. 1986. № 2.С.3-10.
3. *Вендров С.Л.* О масштабах преобразования природы крупными водохранилищами / С.Л. Вендров // Известия ВГО. 1960. Т.91, вып. 4.
4. *Географический* энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1988.
5. *Двинских С.А.* Влияние водохранилищ на окружающую среду / С.А.Двинских, А.И. Печеркин, А.П. Лепихин. Пермь: Изд-во Перм.ун-та, 1981. 120 с.
6. *Кириллова Т.В.* Радиационный режим озер и водохранилищ / Т.В.Кириллова. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 205 с.
7. *Матарзин Ю.М.* Вопросы морфометрии и районирования водохранилищ / Ю.М. Матарзин, И.К. Мацкевич // Вопросы формирования водохранилищ и их морфометрия. Пермь: Изд-во Перм.ун-та, 1970. 92 с.
8. *Охрана ландшафта: Толковый словарь.* Москва: Изд-во «Прогресс», 1982. 286 с.