

УДК [556.555.4] (282.247.325.2)

Н. С. Вандюк

**ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ КАНЕВСКОГО
ВОДОХРАНИЛИЩА КАК ОДИН ИЗ
ВАЖНЫХ АБИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЕГО ЭКОСИСТЕМЫ**

Исследованы особенности формирования термического режима водных масс Каневского водохранилища в условиях их активного транзита по водохранилищу. Определена специфика распределения температуры по акватории, вертикальная термическая структура водохранилища и ее внутригодовая динамика. Оценено влияние современных климатических изменений на температурные характеристики водохранилища. Представлены результаты изучения термического режима водоемов придаточной сети. Рассмотрены некоторые аспекты влияния температурного фактора на абиотические и биотические компоненты экосистемы Каневского водохранилища.

Ключевые слова: температурный режим, гомотермия, стратификация, придаточная сеть, динамика температуры.

Экосистемный подход к изучению водных объектов предусматривает определение и количественную оценку ключевых элементов их гидрологического режима, наиболее полно характеризующих условия водной среды [10]. К таким ключевым элементам относятся гидрофизические свойства водных масс и грунтов, в частности температура воды. Температура является фактором водной среды, определяющим ход и интенсивность большинства химико-биологических процессов [7]. Изучение термического режима водных объектов — неотъемлемая составляющая комплексных гидроэкологических и эколого-гидрологических исследований.

Интенсивное использование водных ресурсов Каневского водохранилища разными отраслями промышленности, сельского хозяйства, энергетики, рекреации и т. п. на фоне глобальных климатических изменений дает серьезные основания для детального исследования его термического режима.

Материал и методика исследований. Наиболее распространенным методом исследования термического режима водных объектов являются натурные наблюдения. Они могут быть стационарными, то есть постоянными, и экспедиционными.

© Н. С. Вандюк, 2013

Стационарные (мониторинговые) методы наблюдений применяют для получения данных, позволяющих выявить пространственную и временную динамику температурных показателей. Такие исследования проводятся непрерывно в течение длительного периода времени на гидрологических станциях и постах.

Экспедиционный метод предусматривает наблюдение за необходимыми элементами температурного и теплового режимов водоема в течение незначительного промежутка времени.

Расчетные методы определения температурных показателей водной массы обычно используются в случаях отсутствия или ограниченности данных натурных наблюдений. Подбор расчетного метода в каждом конкретном случае следует осуществлять исходя из имеющихся материалов наблюдений, особенностей водного объекта, расчетного интервала времени.

Итоговым этапом многих гидрологических исследований, в том числе и термического режима, является теоретический анализ [5]. В его основе лежит использование законов физики в сочетании с географическими закономерностями пространственно-временных изменений гидрологических характеристик. К одному из таких подходов относится моделирование. Оно базируется на расчетном эксперименте и позволяет изучать, прогнозировать и оптимизировать сложные многопараметрические нелинейные процессы. Применяется в случаях, когда теоретическое и экспериментальное изучение этих процессов с помощью традиционных методов затруднено или вообще невозможно [1].

Оценка характеристик термического режима Каневского водохранилища (рис. 1) выполнена на основе данных наблюдений сети Государственной гидрометеорологической службы Украины и материалов экспедиций Института гидробиологии НАН Украины, в которых автор принимал участие. Материалы мониторинговых наблюдений за температурой воды на Каневском водохранилище включают в себя данные пяти водпостов за период с 1976 по 2011 г.; данные наблюдений за распределением температуры по глубине на четырех рейдовых вертикалях: № 1 — у г. Канева, № 2 — вблизи урочища Зарубинцы, № 3 — у г. Украинка; № 4 — у г. Киева (см. рис. 1) за период с 1979 по 1998 г.; данные о температуре воды поверхностного слоя за период с 1978 по 2011 г.

Результаты исследований и их обсуждение

По гидрологическим и морфометрическим показателям Каневское водохранилище разделяют на два участка — речной (верхний), длиной свыше 45 км, и озерный (нижний), протяженностью около 80 км. Речной участок включает в себя значительную придаточную сеть, которая влияет на его термический режим. На озерном такую функцию выполняют обширные мелководья.

Всю совокупность факторов, определяющих термический режим Каневского водохранилища, можно условно разделить на две группы.



1. Схема Каневского водохранилища (I — речной участок, II — озерный участок).

В первую входят факторы, отвечающие за поступление и расход тепла. Это радиационный теплообмен; теплообмен с атмосферой за счет конвекции (турбулентный теплообмен), испарения или конденсации воды; теплоприток с осадками; расход тепла на таяние льда или выделение тепла при его образовании; теплообмен с дном водоема и грунтовыми водами; тепло, поступающее с водами притоков; отток тепла со стоком воды за пределы водоема; тепло, выделяющееся при переходе механической энергии потока в тепловую; тепло, образующееся при биологических и биохимических процессах; тепло, поступающее или расходующееся при заборах и сбросах воды коммунально-бытовыми и промышленными предприятиями.

Вторая группа факторов обуславливает распределение тепла в водных массах водохранилища — это преимущественно внутриводоемная гидродинамика и морфометрия водоема. Основными гидродинамическими процессами, влияющими на распределение тепла в водных массах водохранилища,

являются течения, турбулентное перемешивание, поверхностное и внутреннее волнение, колебания уровня воды [14]. Перенос водных масс течениями распределяет тепло по отдельным участкам и зонам водохранилища [16]. Раскрыть общую схему течений и циркуляций водных масс в водохранилище при определенных гидрометеорологических условиях позволяют разнообразные физические и математические модели. В их числе двухмерная в горизонтальной плоскости гидродинамическая модель А. И. Фельзенбаума [15]. Одной из ее модификаций является метод полных потоков, разработанный для случая малых глубин. Он использован при эколого-гидродинамическом районировании озерного участка Каневского водохранилища. В результате моделирования были выделены транзитная (где происходит основной транзит стока) и нетранзитная зоны [13]. Стоковые и ветровые течения, а также турбулентность в Каневском водохранилище обуславливают практически полное перемешивание водных масс на всех участках и зонах. Морфометрические характеристики водохранилища влияют на термический режим косвенно, создавая разные условия для нагрева и охлаждения водных масс.

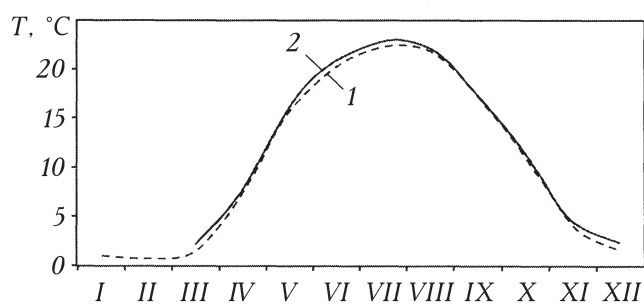
Термический режим речного участка водохранилища определяется преимущественно температурой водных масс, поступающих из вышерасположенного Киевского водохранилища и р. Десны, и водообменом с объектами придаточной сети. За счет активной внутриводоемной динамики нагревание и охлаждение водных масс происходит практически одновременно по глубине и ширине участка, поэтому разница между температурой на поверхности и у дна не превышает 1° . Однородность температуры может несколько изменяться лишь в местах впадения притоков или сбросов воды предприятиями.

Озерный участок водохранилища в целом характеризуется термическим режимом, присущим водоемам. Однако, в отличие от последних, в нем достаточно редко возникают условия для формирования устойчивой температурной стратификации. Этому способствуют ветровые и стоковые течения, волнение и небольшие (около 6—8 м) глубины.

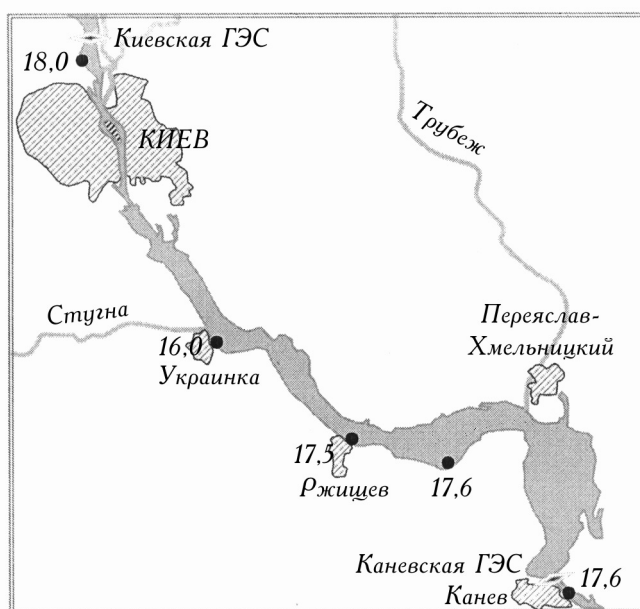
Наиболее изменчивой характеристикой термического режима водохранилища является температура поверхностного слоя воды. Максимальные ее значения, как на речном, так и на озерном участках Каневского водохранилища наблюдаются обычно в конце июля — начале августа (рис. 2). Иногда температура может достигать максимальных значений уже в первой декаде июня, иногда — лишь в конце августа.

Распределение температуры поверхностного слоя воды водохранилища характеризуется неоднородностью (рис. 3). Она наблюдается даже на небольших участках его акватории (рис. 4, 5).

Вертикальная термическая структура водных масс в Каневском водохранилище определяется рядом факторов, а их баланс в течение года формирует годовой термический цикл. В нем можно выделить следующие периоды: зимнего, весеннего и летнего нагревания, осеннего и зимнего охлаждения.



2. Осредненное за многолетний период внутригодовое изменение температуры поверхностного слоя воды Каневского водохранилища: 1 — речной; 2 — озерный участки.



3. Распределение температуры поверхностного слоя воды Каневского водохранилища в сентябре 2006 г.

Период зимнего нагревания начинается с момента формирования ледостава. В это время на водохранилище устанавливается либо гомотермия, либо незначительная обратная температурная стратификация (рис. 6, а). Последняя наблюдается за счет нагревания водной толщи от дна. Максимальная зафиксированная разница в значениях температуры воды у поверхности и у дна в Каневском водохранилище в период зимнего нагревания составила 1,5°.

Период весеннего нагревания часто начинается еще при наличии ледяного покрова. В это время температура воды в поверхностном слое и в меньшей степени на глубине отличается наибольшей неоднородностью по акватории водохранилища. Это обусловлено разной глубиной, неодновременностью вскрытия и очищения ото льда разных участков, разным режимом течений, поступлением

тепла с водами притоков и т. п. Прогревание водохранилища обычно начинается с мелководных зон. После вскрытия его ото льда весеннее нагревание водных масс охватывает всю акваторию. Разница в значениях температуры поверхностного слоя на речном и озерном участках может достигать 10°. Заканчивается период весеннего нагревания установлением в водных массах водохранилища температуры максимальной плотности (4°С).

Начало периода летнего нагревания на Каневском водохранилище приходится в среднем на первую половину апреля. Период длится до тех пор, пока температура водной массы не достигнет максимальных значений. При-

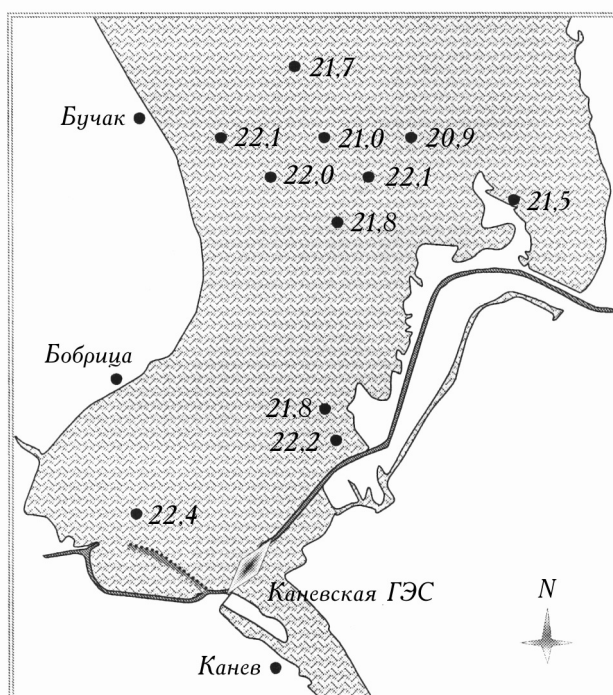
рост температуры воды в течение периода неоднородный. В марте он составляет в среднем $4-6^{\circ}$, в апреле — мае — $7,5-9,5^{\circ}$. После этого интенсивность прогревания снижается и в июне не превышает $3-5^{\circ}$. Обычно процесс нагревания водных масс происходит в условиях, близких к гомотермии (см. рис. 6, б).

Со второй половины июня — начала июля, при установлении тихой солнечной погоды и интенсивном прогревании верхнего слоя воды, в водоемах обычно возникают условия для вертикального температурного расслоения водной толщи на эпилимнион, металимнион, и гипolimнион. Но высокая проточность Каневского водохранилища практически исключает условия для разделения водной толщи на три зоны. Температура воды здесь с глубиной снижается плавно, а слой скачка, как правило, отсутствует (см. рис. 6, в). Наблюдениями за распределением температуры в период с 1979 по 1998 г. расслоение водной толщи на три зоны было зафиксировано на озерном участке водохранилища лишь 4 раза — в 1979, 1986 и 1992 гг. (рис. 7). При этом в половине случаев слой скачка находился в 2-метровом поверхностном слое (см. рис. 7).

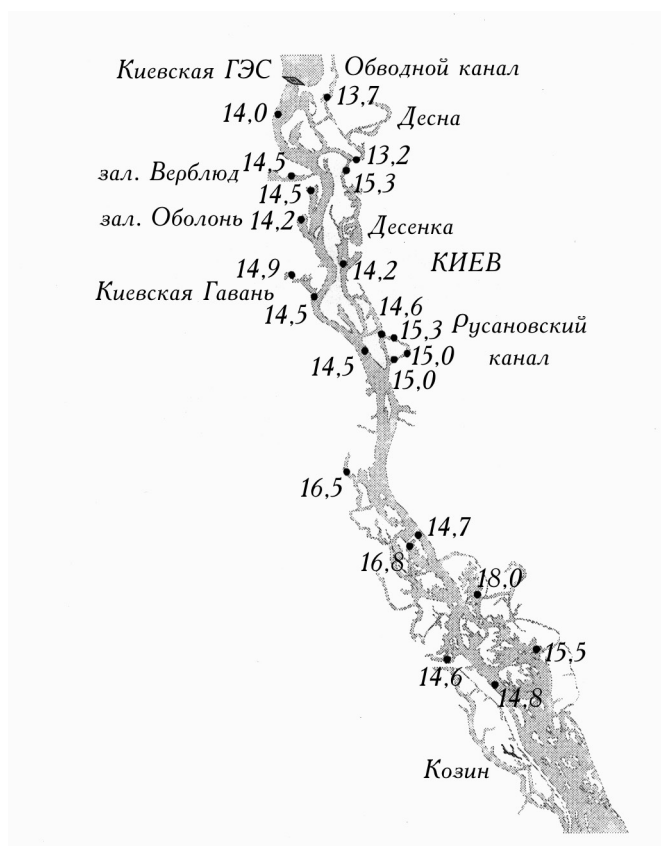
Наибольшая разница между значениями поверхностной и придонной температур в Каневском водохранилище ($5,2^{\circ}$) была зафиксирована на приплотинном участке в 1986 г. (рис. 8). В этом году здесь дважды отмечался термоскачок. Первый — в конце второй декады июня с градиентом $1,7^{\circ}/\text{м}$, второй — в конце второй декады июля с градиентом $1,1^{\circ}/\text{м}$.

Периодически стратификация водной толщи отмечается лишь на рейдовых вертикалях 1 и 2 (озерный участок), причем обычно лишь в теплое время года.

Наши экспедиционные исследования в августе 2004 г. показали, что наиболее прогретыми являются прибрежные акватории озерного участка водохранилища (рис. 9). Наибольшая разница в значениях поверхностной и при-



4. Температура поверхностного слоя воды приплотинного участка Каневского водохранилища в августе 2004 г.



5. Температура поверхностного слоя воды на речном участке Каневского водохранилища в конце второй декады октября 2001 г.

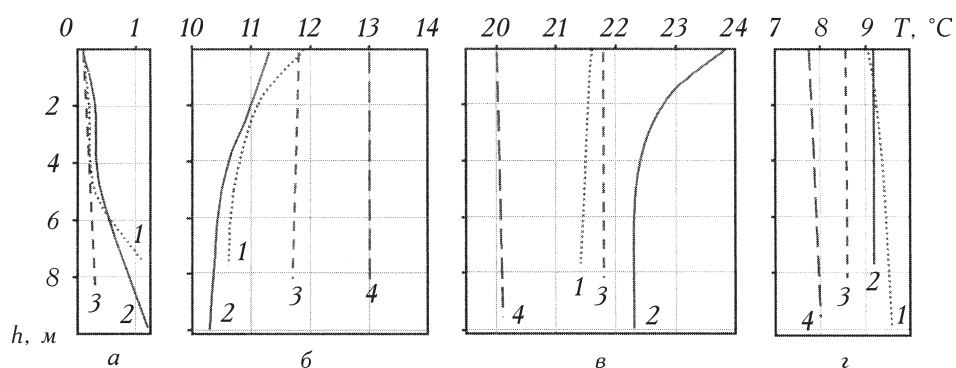
донной температур в период наблюдений составляла около $1,5^{\circ}$. Погодные условия в этот период характеризовались высокой температурой воздуха ($25\text{--}27^{\circ}\text{C}$), ясным безоблачным небом и отсутствием ветра.

Период осеннего охлаждения на Каневском водохранилище начинается обычно в середине августа с момента появления отрицательного теплового потока, направленного в атмосферу. Снижение температуры воды происходит в условиях разрушения прямой стратификации и формирования гомотермии (см. рис. 6, г). Заканчивается период осеннего охлаждения с установлением на водохранилище температуры максимальной плотности (4°C) в конце первой

вой — начале второй декады ноября. С этого момента начинается период зимнего охлаждения, который длится до формирования ледостава. В течение этого периода на водохранилище наблюдается гомотермия. Разница в значениях температуры воды придонного и поверхностного слоев составляет в среднем $0,2\text{--}0,3^{\circ}$, максимум — $0,7^{\circ}$.

Важную роль в формировании теплового баланса и термического режима речного участка Каневского водохранилища играет придаточная сеть — пойменные озера, заливы, протоки и пр. Общий объем воды в них составляет $0,08\text{ км}^3$, площадь водной поверхности — 23 км^2 [9]. Большинство водоемов сети претерпело существенное антропогенное вмешательство, о чем свидетельствуют нехарактерные для таких водных объектов значительные глубины, форма котловин, рельеф дна и донные отложения. Среди таких объектов следует отметить оз. Выдубицкое, заливы Берковщина, Вишенки, Осокорки и Оболонь [3, 4, 11].

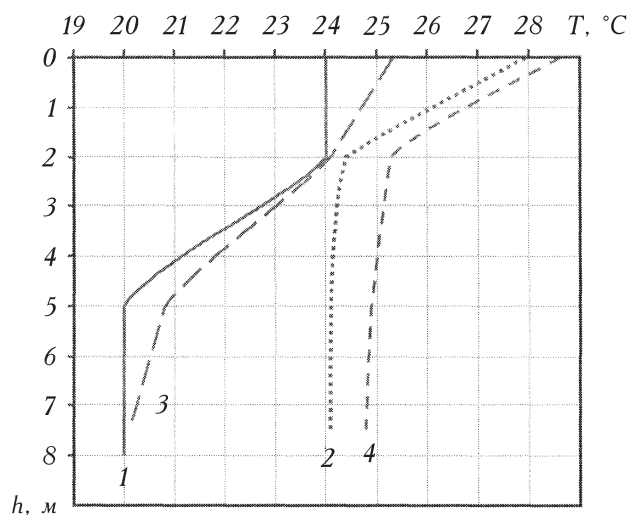
В естественном состоянии для этих водоемов была характерна гомотермия в течение всего года. На сегодняшний день вертикальное распределе-



6. Характерное распределение температуры воды по глубине (h , м) на разных участках Каневского водохранилища в январе (а), апреле (б), в конце второй декады июля (в) и в конце второй декады ноября (г): 1 — г. Канев; 2 — ур. Зарубинцы; 3 — г. Украинка; 4 — г. Киев.

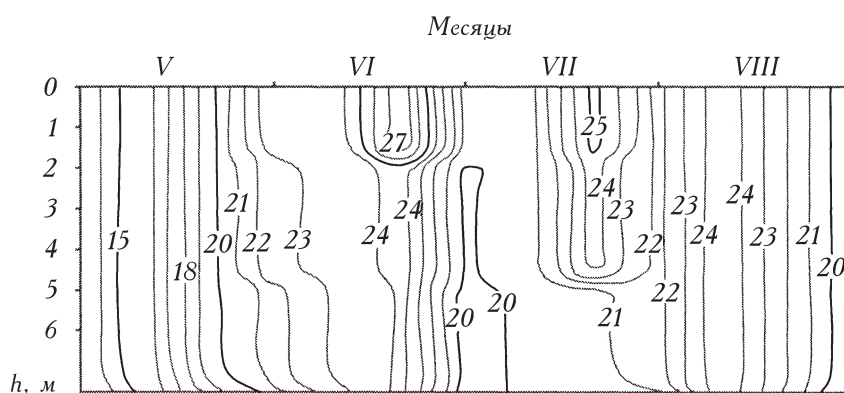
ние температуры в них характеризуется устойчивой стратификацией: летом — прямой, зимой — обратной. В летний период разница между поверхностной и придонной температурами может достигать 15° (рис. 10).

В теплое время года водоемы придаточной сети речного участка становятся источниками тепла, поступающего в водохранилище за счет активного водообмена, вызванного колебаниями уровня воды в системе. Разница в значениях температуры поверхностного слоя воды в основном русле и водных объектах придаточной сети может составлять в среднем $2-3^{\circ}$.

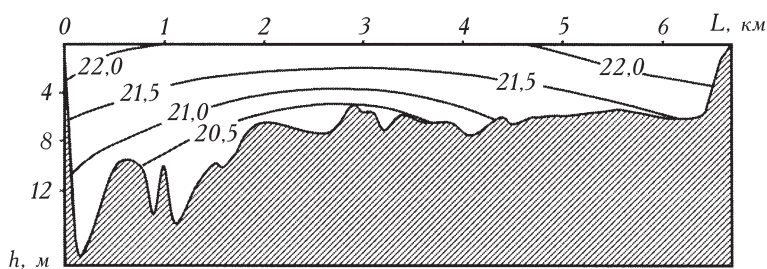


7. Распределение температуры воды по глубине (h , м) на рейдовой вертикали 1 в июле 1979 г. (1), в июне 1986 г. (2), в июле 1986 г. (3) и в июле 1992 г. (4).

Существование Каневского водохранилища приходится на период вторичного потепления в Северном полушарии, продолжающегося с середины 70-х годов прошлого столетия [8]. За это время прирост средней температуры воздуха приземного слоя здесь составил $0,092^{\circ}$. В районе исследуемого



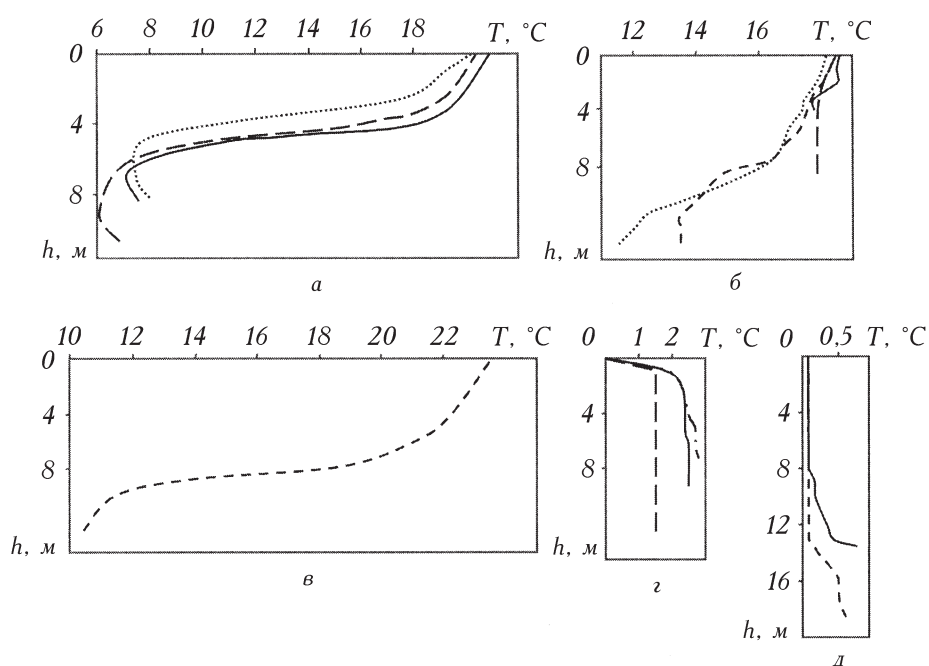
8. Изоплеты температуры воды на приплотинном участке Каневского водохранилища в 1986 г. Здесь и на рис. 9: цифры на линиях — °С.



9. Поперечный температурный профиль приплотинного участка Каневского водохранилища, август 2004 г. L — расстояние от правого берега.

водохранилища среднегодовая температура воздуха за последние 100 лет возросла на $0,7\text{--}0,9^\circ$ [6]. Это безусловно отразилось на термическом режиме водоемов. На рисунке 11 приведен ход среднегодовой температуры воды у берега на речном и озерном участках Каневского водохранилища за последние 35 лет. Линии трендов четко демонстрируют стойкое повышение температуры воды на обоих участках. При этом наблюдаются циклы спада и возрастания температуры с периодичностью приблизительно в 5 лет. За время существования водохранилища среднегодовая температура воды на речном участке выросла в среднем на $1,8\text{--}2,0^\circ$, на озерном — на $1,5\text{--}1,7^\circ$. Тенденция к росту наблюдается и в показателях температуры воды поверхностного слоя. За период с 1999 по 2011 г. почти ежегодно фиксировалось превышение значений температуры над нормой. Кроме роста температурных показателей, сместились и даты перехода температуры через $0,2^\circ$, 4° и 10°C . Весеннее нагревание начинается раньше, а осеннее охлаждение — позже.

Температура является одним из решающих факторов формирования газового, и в частности, кислородного режима водоемов [7]. Ее изменения определяют сезонные и внутрисуточные колебания содержания этого газа в водной среде. Зимой концентрация растворенного кислорода на каждом из

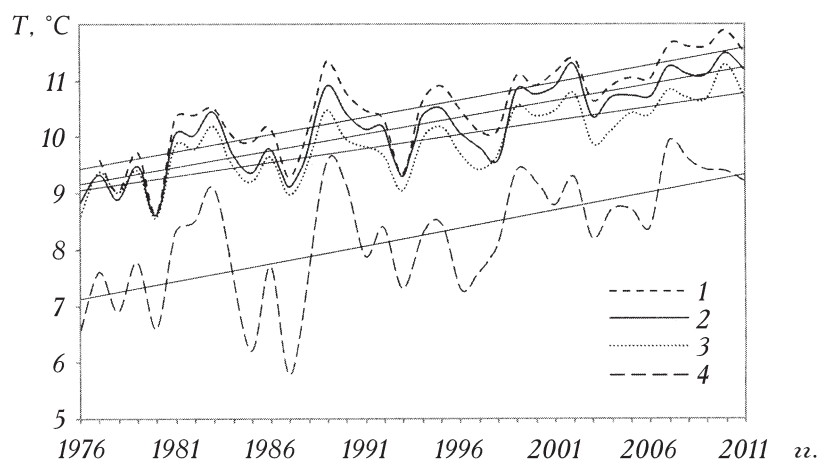


10. Распределение температуры по глубине в водоемах придаточной сети речного участка Каневского водохранилища. а — оз. Выдубицкое, август 2006 г.; б — зал. Берковщина, июнь 2007 г.; в — зал. Вишенки, июнь 2007 г.; г — зал. Осокорки, февраль 2006 г.; д — зал. Оболонь, март 2010 г.

участков и зон водохранилища заметно выше, летом — ниже. Летом на речном участке водохранилища часто наблюдается дефицит кислорода — до 35—50% насыщения (3—4 мг $O_2/дм^3$) [12]. Рост температуры в водохранилище активизирует процессы бактериальной деструкции органического вещества, что, в свою очередь, обуславливает интенсивное поглощение кислорода.

На озерном участке в периоды формирования температурной стратификации возникают условия для формирования вертикальной стратификации кислорода, двуокси углерода и рН. На водоемах устойчивая температурная стратификация с термоклином существенно ослабляет вертикальный водообмен и обмен биогенными элементами между слоями воды, что сказывается на жизнедеятельности гидробионтов. Но на Каневском водохранилище, в связи с невысокой вероятностью возникновения устойчивой температурной стратификации, подобные ситуации возникают редко.

Причиной уменьшения концентрации растворенного кислорода в придонных слоях озерного участка водохранилища часто является повышение температуры воды у дна, интенсифицирующее деструкцию органических соединений в донных отложениях [2].



11. Среднегодовая температура воды Каневского водохранилища (у берега) с 1976 по 2011 г.: 1 — г. Киев; 2 — г. Украинка; 3 — г. Канев и воздуха (4) на метеостанции г. Киев. Прямые — линии трендов.

В отдельные периоды летом высокая температура поверхностного слоя способствует массовому развитию и дальнейшему отмиранию синезеленых водорослей. Это сопровождается уменьшением содержания в воде кислорода и становится причиной заморных явлений.

Заключение

Особенности формирования термических характеристик водных масс Каневского водохранилища обуславливаются его высокой проточностью и неоднородностью гидродинамических условий на разных участках. Таким образом, речной участок водохранилища на протяжении всего года характеризуется гомотермией. На озерном участке стратификация наблюдается преимущественно летом, но при этом имеет неустойчивый характер.

Исследования термического режима водоемов придаточной сети водохранилища показали, что антропогенное вмешательство в их морфометрию, а именно существенное углубление, привело к формированию в них в теплый период года устойчивой температурной стратификации.

На основании анализа данных многолетних наблюдений за температурой воды на Каневском водохранилище выявлена тенденция к ее повышению, обусловленная очередным потеплением в Северном полушарии. При этом на общем фоне роста температуры прослеживаются 5-летние периоды ее снижения и повышения.

**

В роботі викладено результати досліджень термічного режиму Канівського водосховища. Вивчено особливості його вертикальної термічної структури та її зміни

протягом року, а також режим температури води поверхневого шару. Наведено результати дослідження термічного режиму водойм придаткової мережі. Розкрито динаміку змін температури води у водосховищі, обумовлену глобальним потеплінням клімату. Розглянуто деякі аспекти впливу температурного фактору на абіотичні та біотичні компоненти Канівського водосховища.

**

Features of thermal regime of the Kaniv reservoir have been investigated. Vertical thermal structure of the reservoir water masses and its changes during the year has been considered. Water temperature regime of the surface layer has been described. The thermal regime investigation results of the floodplain water bodies of the Kaniv reservoir section have been presented. Dynamics of temperature of water in the reservoir, due to climate change have been revealed. Some aspects of the temperature factor impact on the abiotic and biotic components of the Kaniv reservoir ecosystem have been considered.

**

1. Белоліпецький В. М., Генова С. Н., Туговиков В. Б., Шокин Ю. И. Моделирование задач гидроледотермики водотоков. — Новосибирск, 1993. — 138 с.
2. Денисова А. И., Тимченко В. М., Нахшина Е. П. и др. Гидрология и гидрохимия Днепра и его водохранилищ. — Киев: Наук. думка, 1989. — 216 с.
3. Екологічний стан урбанізованих заплавних водойм. Затока Берковщина / За ред. В. М. Тимченка і С. С. Дубняка. — К.: ЛОГОС, 2009. — 69 с.
4. Екологічний стан урбанізованих заплавних водойм. Затока Осокорки / За ред. В. М. Тимченка. — К.: ЛОГОС, 2011. — 76 с.
5. Загальна гідрологія / За ред. С. М. Лисогора. — К.: Фітосоціоцентр, 2000. — 264 с.
6. Клімат України / За ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. — К.: Вид-во Раєвського, 2003. — 343 с.
7. Константинов А. С. Общая гидробиология. — М.: Высш. шк., 1967. — 432 с.
8. Мартазінова В. Ф., Іванова О. К. Сучасний клімат Київської області. — К.: Аверс, 2010. — 69 с.
9. Окснюк О. П., Тимченко В. М., Давыдов О. А. и др. Экологические попуски Киевской ГЭС. — Киев: ЛОГОС, 2003. — 72 с.
10. Тимченко В. М. Экологическая гидрология водоемов Украины. — Киев: Наук. думка, 2006. — 384 с.
11. Тимченко В. М., Линник П. М., Щербак В. І. та ін. Екологічний стан урбанізованих заплавних водойм. Озеро Видубицьке. — К.: ЛОГОС, 2007. — 64 с.
12. Тимченко В. М., Окснюк О. П., Тимченко О. В. Методические аспекты регулирования кислородного режима речных участков днепровских водохранилищ в летний период (на примере Киевского участка Каневского водохранилища) // Гидробиол. журн. — 2006. — Т. 42, № 1. — С. 99—107.
13. Тимченко В. М., Тимченко О. В., Гуляєва О. О. та ін. Еколого-гідродинамічне районування каскадних долинних водосховищ // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. — К.: Обрії, 2010. — Т. 2 (19). — С. 23—29.

14. *Тушинский С. Г.* Изучение динамики вод суши // Гидрология суши. — М.: Изд-во АН СССР, 1978. — Т. 3. — С. 15—63.
15. *Фельзенбаум А. И.* Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений. — М.: Изд-во АН СССР, 1960. — 126 с.
16. *Филатов Р. В.* Динамика озер. — Л.: Гидрометеиздат, 1983. — 168 с.

Институт гидробиологии НАН Украины, Киев

Поступила 20.03.13