

ГОМОТЕРМИЯ ВОДНОЙ ТОЛЩИ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ-ОХЛАДИТЕЛЕ

С.А. Лапин

*Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»),
отдел динамики климата и водных экосистем, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: sal58@mail.ru*

На примере Десногорского водохранилища рассмотрены особенности термического режима водохранилища-охладителя. На базе анализа результатов гидрологических съемок водохранилища в различные сезоны подробно описана структура водной толщи и ее трансформация внутри года в области влияния теплового стока от Смоленской атомной электростанции (САЭС). Рассмотрены причины отсутствия обратной стратификации в зимнее время в наиболее перемешанной части области теплового воздействия. Отмечено, что в частях акватории, непосредственно примыкающих к месту разгрузки теплового стока от САЭС, прямая стратификация водной толщи может поддерживаться и в зимний период. Для термически измененной части водохранилища описан процесс формирования и длительного стояния осенне-зимне-весенней гомотермии и ее переход в весенне-летнюю прямую стратификацию. Рассмотрено ее взаимодействие с частью водной массы водохранилища, не затронутой тепловым воздействием. Отмечено, что весенний переход на прямую стратификацию существенно ускоряется вследствие действия плотностного (холодного) потока у дна и теплового у поверхности.

Ключевые слова: термический режим, стратификация, водоем-охладитель

ВВЕДЕНИЕ

Практика эксплуатации водохранилищ-охладителей насчитывает около 100 лет. При этом важно подчеркнуть, что в большей степени они используются в России и на постсоветском пространстве, наиболее широко – начиная со второй половины XX в. В США и других западных странах водохранилища-охладители не получили большого распространения, и предпочтение там отдается другим подходам к охлаждению энергогенерирующих объектов, в частности прямоточным системам с использованием как морских, так и поверхностных вод [Cooling power plants, 2020].

Исследованиям водохранилищ-охладителей посвящено достаточно большое количество работ. При этом чаще всего они акцентированы на изучении экологических проблем конкретных водоемов. По мере накопления опыта эксплуатации подобных объектов стали появляться и более полные, обобщающие работы [Гидрохимия и гидробиология..., 1971]. Особенно хочется отметить труды А.Л. Суздалевой и В.Н. Безносова с соавторами [Суздалева, 2002; Суздалева, Безносов, 2000; Безносов и др., 2002; Безносов, Суздалева, 2000, 1999], которые многократно обращались к проблемам нарушения стратификации и изменению гидрологической структуры водоемов-охладителей. При этом необходимо отметить, что главное внимание они уделяли экологическим и биологическим аспектам таких трансформаций. Другая группа исследователей акцентировала свои работы на решении практической инженерной задачи, связанной с главным предназначением подобных объектов, а именно на изу-

чении различных аспектов процесса охлаждения вод от энергетических объектов с точки зрения его оптимизации [Дрижус, 1985; Смагин и др., 2007; Пряшников и др., 2014].

Цель настоящей работы – акцентировать внимание на главном факторе, который позволяет рассматривать водоемы-охладители как особый вид водных объектов, а именно – на осмыслении термических процессов в затронутой тепловым воздействием части водохранилища-охладителя посредством оценки вертикальной структуры его водной толщи.

Сезонные изменения состояния водной толщи в водохранилищах-охладителях существенно отличаются от тех, которые наблюдаются в обычных водоемах, в которых годовой термодинамический цикл состоит из меняющих друг друга состояний: прямой (летней) стратификации, осенней гомотермии, обратной (зимней) стратификации и, соответственно, весенней гомотермии [Эдельштейн, 2014]. Подобные изменения происходят вследствие последовательных (согласно сезону) охлаждений водной толщи до температуры замерзания воды ниже температуры максимальной плотности пресных вод (4 °С) или ее прогрева выше указанной температуры.

В водоемах-охладителях в части акватории, находящейся под воздействием теплых вод, годичный цикл температурной перестройки водной толщи устроен иначе. Такая ситуация связана, главным образом, с тем обстоятельством, что на большей части акватории с трансформированным тепловым режимом сезонное охлаждение не достигает температуры максимальной плотности воды. Таким об-

разом, процесс формирования осенней гомотермии, связанный с постепенным увеличением плотности воды вследствие ее охлаждения и, соответственно, создающий условия для постоянного перемешивания водной толщи от поверхности до дна, распространяется также и на весь зимний период. Со сменой тренда с охлаждения на прогрев ранней весной структура водоема достаточно быстро обретает признаки прямой (летней) стратификации. Таким образом, структура водной толщи водохранилищ-охладителей в большей части области термического воздействия имеет свой годовой цикл, состоящий из осенне-зимне-весенней гомотермии и весенне-летней прямой стратификации.

Осенне-зимнее состояние гомотермии, описанное выше, имеет свою особенность, связанную с адаптацией «потоков холода и тепла». Первый процесс выражен в подтекании плотных вод по дну со стороны границы с неподверженной тепловому воздействию части водохранилища-охладителя. Второй – в растекании теплых вод по поверхности в местах разгрузки теплового стока от энергообъектов. Таким образом, в этих областях создаются своеобразные промежуточные (буферные) зоны, связанные с поступающими разнородными стоками. При смене сезонного тренда с охлаждения на рост температуры указанные процессы существенно ускоряют формирование прямой стратификации в акватории теплового воздействия водохранилища-охладителя.

В предлагаемой работе описанные выше особенности термического режима водной толщи водохранилища-охладителя иллюстрируются практикой исследований на Десногорском водохранилище в течение ряда лет применительно к различным сезонам года.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Работа основана на проведенных Всероссийским научно-исследовательским институтом рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО) гидрологических съемках Десногорского водохранилища-охладителя Смоленской атомной электростанции (САЭС) в различные сезоны 2012–2018 гг. Для определения необходимого минимума стандартных станций как основы для исследования структуры водной толщи водохранилища изначально была проведена весьма подробная съемка водоема. Задача этого этапа работ состояла в выделении части акватории водохранилища, постоянно находящейся под воздействием поступающего от САЭС теплового стока, и области ее взаимодействия с незатронутой этим процессом частью водоема. В результате было отобрано девять станций, расположенных над затопленным руслом,

которые должны были относительно корректно отражать исследуемые процессы (рис. 1).

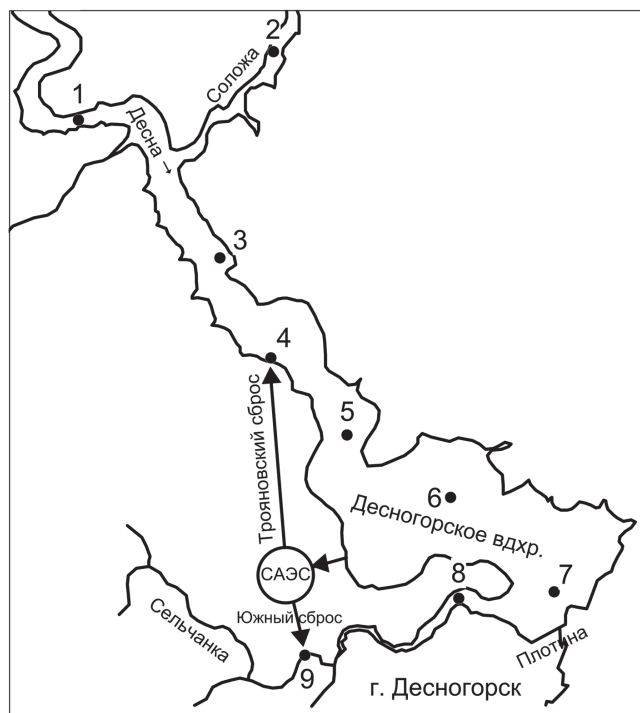


Рис. 1. Схема расположения гидрологических станций на акватории Десногорского водохранилища

Fig. 1. Layout of hydrological stations in the water area of the Desnogorsk reservoir

Станции 1 и 2 расположены, соответственно, со стороны рек Десны и Соложи в неизменной части водохранилища; станции 3–9 охватывают акваторию водохранилища в рамках области термического воздействия от САЭС. Теплые воды поступали в водохранилище через северный (Трояновский) сброс вблизи станции 4 и южный сброс из р. Сельчанки (станция 8), в которую, в свою очередь, они попадали у станции 9. Максимальное перемешивание теплового стока достигалось в наиболее широкой части водохранилища в районе станции 6, расположенной напротив водозабора САЭС. Работа проводилась с борта катера при его постановке на якорь. На каждой станции проводилось зондирование водной толщи от поверхности до дна СТД-зондами «Гидролаб» MS5 и EXO2 (YSI Incorporated), снабженными датчиками давления (глубины), температуры и электропроводности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Осенняя гомотермия начинает формироваться при устойчивом охлаждении вод. Так, по результатам съемки 25.09.2012, она уже присутствует на большей части исследуемой акватории с температу-

рой перемешанного слоя 18–19°C (рис. 2А). Исключение составляют области, непосредственно прилегающие к местам разгрузки теплового стока, в том числе и вблизи плотины (станция 7).

Далее, по мере охлаждения, сохраняя в областях смешения характер гомотермии, температура воды постепенно падала. Так, в ноябре (съемка 12.11.2015) в наиболее перемешанной части водоема (станция 6) она составила около 12°C (рис. 2Б).

В зимний период (съемка 11.03.2013), когда водохранилище выше по течению от станции 1 было по-

жиме работы САЭС и конкретных гидрологических параметрах Десногорского водохранилища температура перемешанной водной толщи в термически измененной части акватории водохранилища-охладителя не достигает температуры максимальной плотности воды. Иными словами, условия поддержания состояния гомотермии остаются неизменными до смены тренда с сезонного охлаждения на сезонный прогрев водной толщи. В этот момент процесс перемешивания прекращается, и одновременно завершается достаточно долговременный период осенне-зимне-весенней гомотермии. Отдельно необходимо обратить внимание на состояние водной толщи в зимний период в приплотинной части водохранилища (станция 7), расположенной в непосредственной близости от разгрузки теплых вод из р. Сельчанки. Влияние теплового стока со стороны южного сброса из Сельчанки на этом участке достаточно велико, поэтому состояние прямой стратификации здесь может сохраняться и в зимний период. Это явление особенно сильно выражено в условиях теплых зим и даже может способствовать формированию в этой части водохранилища придонной гипоксии [Суздалева, Горюнова, 2014].

Переход к состоянию прямой (летней) стратификации на акватории водохранилища, находящейся под воздействием теплых вод, происходит в водохранилище достаточно резко. При этом естественная тенденция к разрушению гомотермии посредством весеннего прогрева вод дополнительно усиливается двумя факторами, а именно постепенным продвижением вдоль дна более холодных вод со стороны верхней части водохранилища с неизменным режимом, с одной стороны, и растеканием по поверхности теплой воды от мест ее разгрузки со стороны САЭС – с другой.

Стадию завершения длительного периода гомотермии хорошо отражают результаты съемки 13 апреля 2017 г. Фактически перемешанный слой в этот период сохранился только у станции 6 с температурой около 11,5°C (рис. 3А).

Упомянутые выше потоки (холодный у дна и теплые от двух водовыпусков у поверхности) уже практически стратифицировали водную толщу. Съемка годом позже (рис. 3Б), но приблизительно в те же сроки, иллюстрирует картину первых дней установления прямой стратификации всей водной толщи Десногорского водохранилища. Данное состояние сохраняется в водоеме практически на полугодовой период, совпадающий с периодом вегетационной активности в водоеме. В это время плотностной поток у дна отсек (образовал) гипolimнион, ускорив естественный ход процесса стратификации. Перемешанная часть отмечается в этот период только в верхних 8 м водной толщи

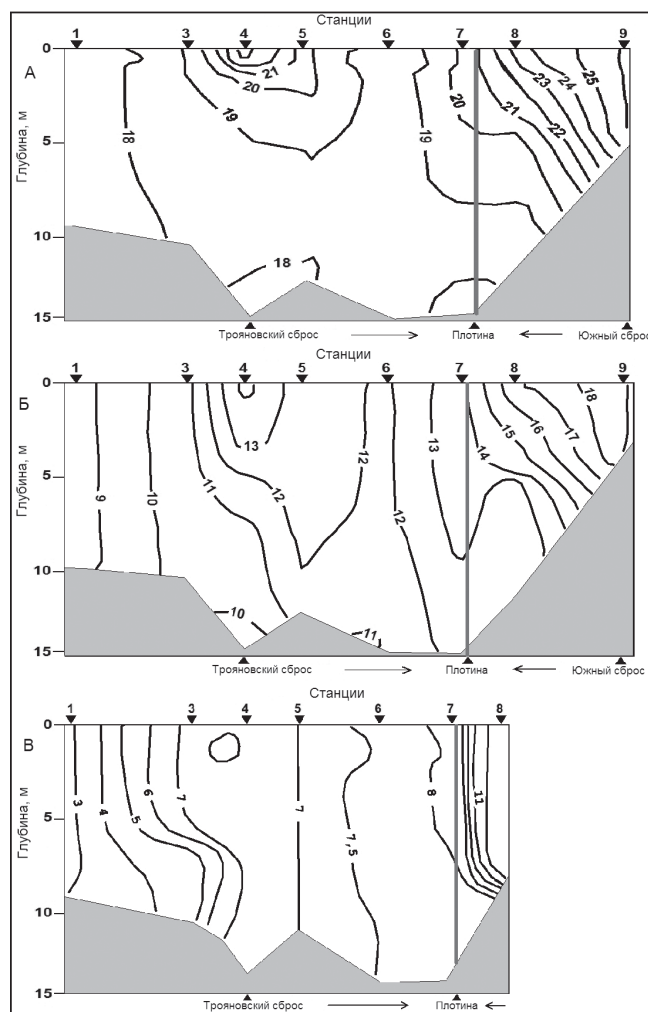


Рис. 2. Продольный температурный профиль Десногорского водохранилища.

Съемки: А – 25.09.2012; Б – 12.11.2015; В – 11.03.2013

Fig. 2. Longitudinal temperature profile of the Desnogorsk reservoir.

Surveys: А – 25.09.2012; Б – 12.11.2015; В – 11.03.2013

крыто льдом, в незамерзающей акватории водоема на большей части перемешанного слоя температура понижалась до 7°C. Это ее минимальное зафиксированное значение в наших исследованиях периода осенне-зимне-весенней гомотермии (рис. 2В). Она может быть и ниже, однако при существующем ре-

в районе станций 5 и 6, сохраняя при этом такую же, как и при съемке ровно год назад, температуру около 11,5°C.

Таким образом, исходя из анализа произведенных съемок, можно утверждать следующее. Установление в наиболее перемешанной части области водохранилища под тепловым воздействием от САЭС состояния осенне-зимне-весенней гомотермии начинается с возникновения процесса устойчивого охлаждения водной толщи, в нашем случае в сентябре. Это состояние остается неизменным и в зимний период с постепенным падением температуры в области перемешивания до значений, близких к 7°C. Далее, с началом постепенного прогрева

вод процесс вертикального перемешивания прекращается, состояние гомотермии начинает разрушаться, а при температуре около 11,5°C, согласно данным наших съемок, уже устанавливается устойчивая прямая стратификация.

По результатам майской съемки 29.05.2012 (рис. 4) водная толща полностью отвечает характерному для лета состоянию с четко определяемыми эпи- и гипolimниом, разделенными слоем скачка на 6–8 м. В целом, прямая стратификация устанавливается на Десногорском водохранилище со второй половины (3-й декады) апреля с ростом поверхностной температуры выше 11°C и до начала устойчивого охлаждения в сентябре ниже 19°C.

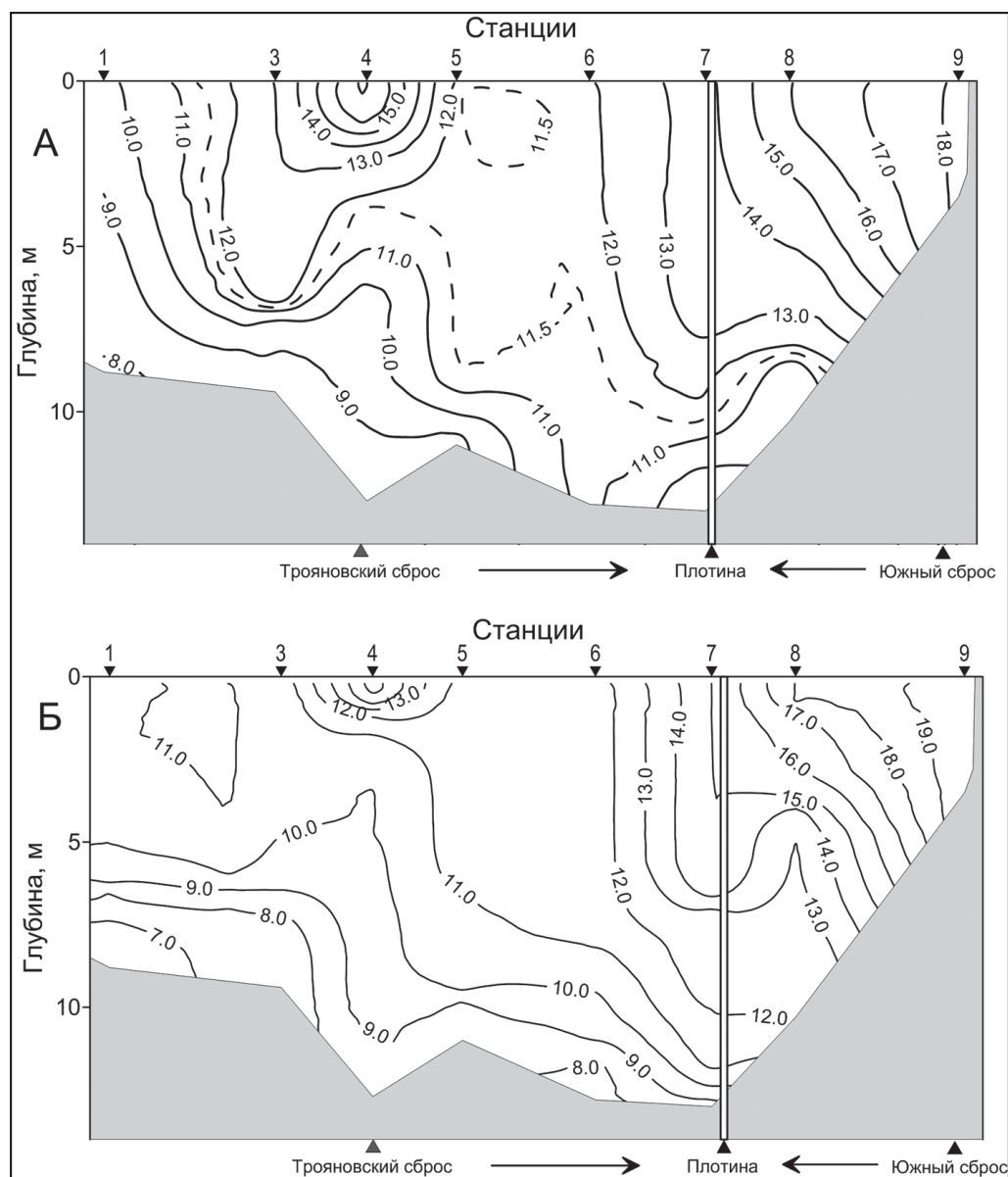


Рис. 3. Продольный температурный профиль Десногорского водохранилища.
Съемки: А – 13.04.2017; Б – 19.04.2018

Fig. 3. Longitudinal temperature profile of the Desnogorsk reservoir.
Surveys: A – 13.04.2017; Б – 19.04.2018

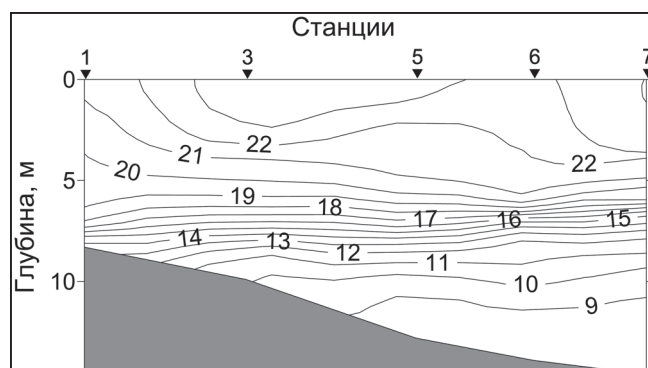


Рис. 4. Продольный температурный профиль Десногорского водохранилища по съемке 29.05.2012

Fig. 4. Longitudinal temperature profile of the Desnogorsk reservoir according to the survey on 29.05.2012

ВЫВОДЫ

Описанный (на примере Десногорского водохранилища) термический режим водоема-охладителя в его части, находящейся под воздействием тепловых стоков от энергообъекта, кардинально отличается от другой его части – вне данного воздействия:

- главное отличие состоит в отсутствии периода обратной (зимней) стратификации водной толщи;
- годовой цикл в области наибольшей перемешанности вод делится на два приблизительно равных периода: весенне-летней прямой стратификации и осенне-зимне-весенней гомотермии;
- в частях акватории, прилегающих к местам разгрузки теплых вод, даже в зимний период может сохраняться прямая стратификация водной толщи.

Этот процесс чаще проявляется в периоды стояния теплых зим;

– весеннее становление прямой стратификации в водохранилище-охладителе наступает быстрее вследствие продвижения по дну более плотных холодных вод со стороны неизменной части водохранилища и растекания теплых вод от энергообъекта по поверхности.

Термически измененный режим для различных схем функционирования водохранилищ-охладителей может существенно отличаться, но описанные процессы разной степени выраженности будут проявляться в каждом из них. Это обстоятельство кардинально меняет весь жизненный цикл и обменные процессы гидробионтов в водохранилищах-охладителях. Длительный период перемешивания вод на значительной акватории предотвращает возникновение здесь характерных для зимнего сезона заморных явлений, создает более благоприятные условия для жизнедеятельности гидробионтов.

Как правило, водоемы-охладители создаются как составная часть крупного энергогенерирующего объекта, однако впоследствии практически всегда используются как комплексные. В этой связи учет особенностей термической структуры водоема-охладителя, в том числе и на стадии проектирования, позволит существенно расширить возможности его использования и для иных целей, прежде всего рыбоборазведения и рекреации, при этом нисколько не противореча решению главной задачи – охлаждения воды для энергообъектов.

Благодарности. Автор благодарит сотрудников лабораторий гидрохимии и пресноводных рыб Росси ВНИРО, принимавших участие в полевых работах на Десногорском водохранилище, а также сотрудников лаборатории биотехнологий водохранилища и цеха обеспечивающих систем САЭС, оказавших необходимую поддержку при проведении исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безносков В.Н., Кучкина М.А., Суздалева А.Л. Исследование процесса термического евтрофирования в водоемах-охладителях АЭС // Водные ресурсы. 2002. Т. 29. № 5. С. 610–615.
- Безносков В.Н., Суздалева А.Л. Экологические последствия техногенных нарушений стратификации водоемов // Инженерная экология. 2000. № 1. С. 14–21.
- Безносков В.Н., Суздалева А.Л. Нарушение стратификации водоемов как источник их загрязнения // Природообустройство и экологические проблемы водного хозяйства и мелиорации. М.: МГУП, 1999. С. 60–61.
- Гидрохимия и гидробиология водоемов-охладителей тепловых электростанций СССР / ред. М.Л. Пидгайко. Киев: Наукова думка, 1971. 249 с.
- Дрижюс М.Р. Гидротермический режим водохранилищ-охладителей. Вильнюс: Мокслас, 1985. 166 с.
- Пряшников Ф.Д., Бейнер Н.В., Бейнер П.С. Анализ организации движения потока в водоемах-охладителях АЭС // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2014. С. 82–88.
- Симагин А.С., Мадоян А.А., Паламарчук А.В. Анализ характерных параметров водоема-охладителя Волгодонской АЭС // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2007. № 4. С. 50–53.
- Суздалева А.Л., Горюнова С.В. Техногенез и деградация поверхностных водных объектов. М.: Энергия, 2014. 456 с.
- Суздалева А.Л. Структура и экологическое состояние природно-техногенных систем водоемов-охладителей АЭС : автореф. дис. ... докт. биол. наук. М.: МГУ, 2002. 53 с.
- Суздалева А.Л., Безносков В.Н. Изменение гидрологической структуры водоемов и сукцессия водных био-

ценозов при их превращении в водоемы-охладители атомной (тепловой) электростанции // Инженерная экология. 2000. № 2. С. 47–55.

Эдельштейн К.К. Гидрология озер и водохранилищ. М.: Перо, 2014. 399 с.

Электронный ресурс

Cooling power plants (Updated September 2020), URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/cooling-power-plants.aspx> (дата обращения 01.10.2020).

Поступила в реакцию 20.07.2020

После доработки 04.06.2021

Принята к публикации 01.11.2021

HOMOTHERMY OF WATER COLUMN IN THE COOLING RESERVOIR

S.A. Lapin

All-Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSBSE "VNIRO"), Department of Climate Dynamics and Aquatic Ecosystems, Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: sal58@mail.ru

Specific features of the thermal regime of a cooling reservoir are considered using the example of the Desnogorsk reservoir. The results of hydrological surveys of the reservoir in different seasons were analyzed to describe the structure of water column and its intra-annual transformation in the area affected by the heat sink from the Smolensk nuclear power plant (SNPP). The reasons of the absence of reverse winter stratification in the most mixed part of heat-affected area are discussed. It was found that the direct stratification of water column could continue in winter in the parts of water area adjacent to the point of heat discharge. The process of formation of a long-lasting autumn-winter-spring homothermy and its transition to spring-summer direct stratification is described for thermally altered part of the reservoir. Its interaction with not-affected water mass of the reservoir is considered. It is noted that the spring transition to direct stratification is significantly accelerated due to the influence of the density (cold) flow at the bottom and the heat one at the surface.

Keywords: thermal regime, stratification, cooling reservoir

Acknowledgments. The author thanks the staff of the laboratories of hydrochemistry and freshwater fish of Russia of the VNIRO, who participated in field work at the Desnogorsk reservoir, as well as the staff of the laboratory of reservoir biotechnology and the workshop of the SNPP support systems, who provided all necessary support during the study.

REFERENCES

- Beznosov V.N., Kuchkina M.A., Suzdaleva A.L. Issledovanie protsessa termicheskogo evtrofirovaniya v vodoemakh-okhladitelyakh AES [Investigation of the process of thermal eutrophication in cooling ponds of nuclear power plants (NPP)], *Vodnye resursy*, 2002, vol. 29, no. 5, p. 610–615. (In Russian)
- Beznosov V.N., Suzdaleva A.L. Ekologicheskie posledstviya tekhnogennykh narushenii stratifikatsii vodoemov [Ecological consequences of technogenic disturbances in stratification of water bodies], *Inzhenernaya ekologiya*, 2000, no. 1, p. 14–21. (In Russian)
- Beznosov V.N., Suzdaleva A.L. Narushenie stratifikatsii vodoemov kak istochnik ikh zagryazneniya [Violation of water bodies stratification as a source of their pollution], *Prirodoobustroistvo i ekologicheskie problemy vodnogo khozyaistva i melioratsii*, Moscow, Moscow St. Univ. of Environmental Engineering Publ., 1999, p. 60–61. (In Russian)
- Gidrokimiya i gidrobiologiya vodoemov-okhladitelei teplovykh elektrostantsii SSSR [Hydrochemistry and hydrobiology of cooling ponds of the USSR thermal power plants], M.L. Pidgaiko (ed.), Kiev, Naukova dumka Publ., 1971, 249 p. (In Russian)
- Drizhyus M.R. *Gidrotermicheskii rezhim vodokhranilishch-okhladitelei* [Hydrothermal regime of cooling reservoirs], Vil'nyus, Mokslas Publ., 1985, 166 p. (In Russian)
- Pryashnikov F.D., Beiner N.V., Beiner P.S. Analiz organizatsii dvizheniya potoka v vodoemakh-okhladitelyakh AES [Analysis of water movement management for water cooling reservoirs at nuclear power plants], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG*, 2014, no. 1, p. 82–88. (In Russian)
- Simagin A.S., Madoyan A.A., Palamarchuk A.V. Analiz kharakternykh parametrov vodoema-okhladitelya Volgodonskoi AES [Analysis of the characteristic parameters of the cooling pond of the Volgodonsk NPP], *Izvestiya vuzov, Severo-kavkazskii region, Tekhnicheskie nauki*, 2007, no. 4, p. 50–53. (In Russian)
- Suzdaleva A.L., Goryunova S.V. *Tekhnogenez i degradatsiya poverkhnostnykh vodnykh ob"ektov* [Technogenesis and degradation of surface water bodies], Moscow, Energiya Publ., 2014, 456 p. (In Russian)
- Suzdaleva A.L. *Struktura i ekologicheskoe sostoyanie prirodno-tekhnogennykh sistem vodoemov-okhladitelei AES* [The structure and ecological state of natural and man-made systems of cooling ponds of nuclear power plants

- (NPP)], D.Sci. Thesis in Biology, Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2002, 53 p. (In Russian)
- Suzdaleva A.L., Beznosov V.N. *Izmenenie gidrologicheskoi struktury vodoemov i suksessiya vodnykh biotsenozov pri ikh prevrashchenii v vodoemy-okhladiteli atomnoi (teplovoi) elektrostantsii* [Changes in the hydrological structure of water bodies and the succession of aquatic biocenoses during their transformation into cooling ponds of a nuclear (thermal) power plant], *Inzhenernaya ekologiya*, 2000, no. 2, p. 47–55. (In Russian)
- Edel'shtein K.K. *Gidrologiya ozer i vodokhranilishch* [Hydrology of lakes and reservoirs], Moscow, Pero Publ., 2014, 399 p. (In Russian)
- Web source*
Cooling power plants (Updated September 2020), URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/cooling-power-plants.aspx> (access date 01.10.2020).

Received 20.07.2020

Revised 04.06.2021

Accepted 22.11.2021