

УДК 504.455:504.45.058

DOI: <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2025-1-41-58>

## **Изученность проблемы трофического состояния водоемов-охладителей тепловых и атомных электростанций**

**Л.С. Рудников**

ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», г. Тверь

В статье представлен обзор научных публикаций по проблеме трофического состояния водоемов-охладителей тепловых и атомных электростанций, выполненный на основе анализа публикаций электронных систем и библиотек. Сделан вывод о преобладании биоэкологического подхода в ходе исследований.

*Ключевые слова:* трофическое состояние водоёма, эвтрофикация, водоём-охладитель, географический подход.

**Введение и постановка проблемы.** В XX в. развитие тепловой и атомной энергетики в странах мира сопровождалось строительством водохранилищ-охладителей, необходимых для охлаждения конденсаторов турбин ТЭС и АЭС. Часть из них создавалась путём зарегулирования естественных водоемов, при этом их гидрологический, гидротермический и гидрохимический режимы были преобразованы. Изменились условия существования водных растений и животных, качественные и количественные показатели их развития и трофическое состояние водоемов.

Согласно современным представлениям [13], избыточное поступление биогенных элементов служит главной причиной антропогенного эвтрофирования водоемов. В определённый момент избыток биогенов приводит к нарушению баланса между продукцией и деструкцией органического вещества в воде, его накоплению в экосистеме. При этом активно развивается автотрофное звено экосистемы (фитопланктон и макрофиты). Следствием эвтрофирования является снижение содержания растворённого кислорода и рН воды. Накопление неразложившегося органического вещества в донных отложениях и дальнейший переход соединений азота и фосфора в воду ведёт к усилению эвтрофикации и вторичному загрязнению воды [13].

Антропогенная эвтрофикация водоёма является причиной нарушения естественного развития экосистемы, упрощения её структуры, что делает её более уязвимой к внешним воздействиям. Водоём утрачивает экономическую и рекреационную ценность. Для системы водоснабжения электростанций возрастает угроза

чрезвычайной техногенной ситуации по причине образования биопомех и биообрастаний.

Отечественные лимнологи считают, что оценка трофического состояния водохранилищ в целом не отличается от таковой для естественных водоёмов [13]. Однако в водохранилищах-охладителях важным фактором, изменяющим среду обитания, является сброс отработанной подогретой воды. Он может способствовать повышению трофического состояния воды вследствие ускорения биогенных процессов и удлинения вегетационного периода.

Общий анализ вопроса трофического состояния водоёмов изложен в статье Т.Я. Ашихминой, Т.И. Кутявиной, Е.А. Домниной «Изучение процессов эвтрофикации природных и искусственно созданных водоёмов (литературный обзор)» [1]. В работе рассмотрены основные индексы трофности и предложен обзор методов математического моделирования процесса эвтрофикации водоёмов-охладителей. Практически не уделено внимание оценке гидрохимических и физических параметров водных масс и высшей водной растительности водохранилищ-охладителей.

Цель настоящей работы – проанализировать направления и содержание современных исследований трофического состояния водоёмов-охладителей тепловых и атомных электростанций.

**Методика.** В ходе работы отобраны научные статьи и материалы конференций в электронных системах и библиотеках Google Академия, Elibrary, Lens.org. Поиск проводился по ключевым словам: «трофическое состояние водоёма-охладителя» и «эвтрофикация водоёма-охладителя».

Трофическое состояние водной массы является интегральной характеристикой среды обитания организмов, так как отражает взаимоотношения организмов разных трофических уровней с учётом гидродинамических, гидротермических и гидрохимических условий. В публикациях рассмотрение трофического состояния водоёмов-охладителей проводится по следующим направлениям:

1. Специфические особенности водоёмов-охладителей, влияющие на их трофическое состояние.
2. Гидротермический режим водоёмов-охладителей как фактор формирования трофического состояния водной массы.
3. Смена трофического состояния воды вследствие изменения гидрохимического режима водоёмов-охладителей.
4. Показатели развития фитопланктона, зоопланктона и зообентоса как параметры трофического состояния водной массы.
5. Высшая водная растительность – индикатор трофического состояния водоёмов-охладителей.

б. Предложения и опыт практического применения мер по снижению эвтрофикации водоёмов-охладителей.

**Результаты и обсуждение.** Анализ материалов платформы Lens.org показал, что до 1960-х гг. исследования по теме проводились нерегулярно. Интерес учёных к вопросу трофического состояния водоёмов-охладителей возрастал с 1980 по 2010-е гг., наибольшее количество публикаций приходится на 2006 г. После 2010 г. наблюдается уменьшение исследований (рис. 1).

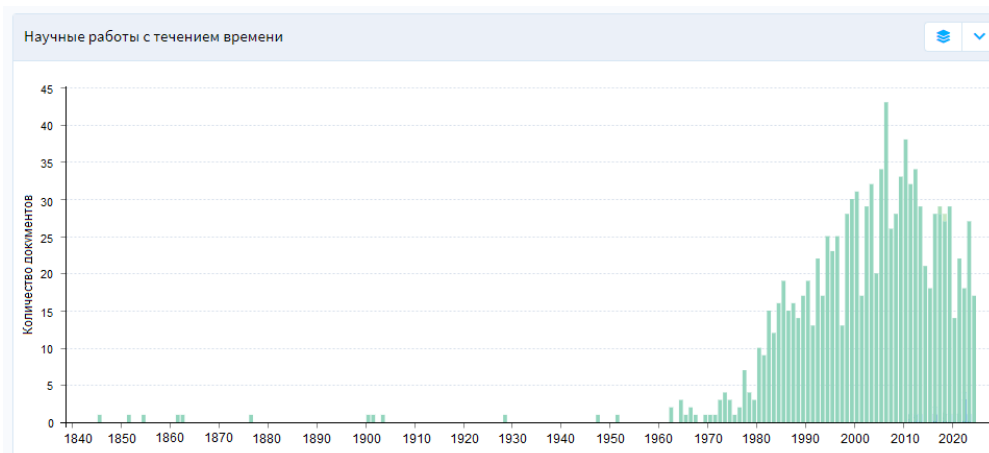


Рис. 1. Динамика публикационной активности по теме исследования (рисунок с экрана: Lens.org)

Автоматическая генерация «облака слов» на платформе Lens.org показала, что наибольший интерес к теме наблюдается в экологии, биологии и науках об окружающей среде (рис. 2). Тема носит междисциплинарный характер, так как ей занимаются также специалисты других наук и научных направлений. Кроме того, по трофическому состоянию водоёмов-охладителей защищён ряд диссертаций, наибольшее количество – в период 2000-2005 гг. (Суздалева, 2002 [37], Морозова, 2003 [23], Солохина, 2003 [36], Кацман, 2004 [16], Кучкина, 2004 [18]), написаны монографии (Морозова, Пен, 2011 [25], Сибирина, 2012 [35]), что свидетельствует о фундаментальном характере темы исследования.



Рис. 2. Науки и научные направления, изучающие трофическое состояние водоёмов-охладителей (рисунок с экрана: Lens.org)

Анализ свидетельствует о недостаточной научной проработанности рассматриваемого вопроса с географических позиций.

Следует отметить, что ведущая роль в исследованиях по данным платформы Lens.org принадлежит учёным из США и России (табл.).

Таблица

Страны-лидеры по числу публикаций по трофическому состоянию водоёмов-охладителей (указано количество найденных документов)

<b>268</b>	<b>184</b>	<b>111</b>	<b>44</b>	<b>43</b>
United States	Russia	China	United Kingdom	Canada

Исследования, по которым выполнен литературный обзор, проводились на водоёмах-охладителях атомных электростанций России: Калининская АЭС, Смоленская АЭС, Курская АЭС, Балаковская АЭС, Ростовская АЭС. Объектами изучения выступили водохранилища-охладители тепловых электростанций: Конаковская ГРЭС – Тверская обл., Верхнетагильская ГРЭС – Свердловская обл., Среднеуральская ГРЭС – Свердловская обл., Беловская ГРЭС – Кемеровская обл., Берёзовская ГРЭС-1 – Красноярский край, Гусиноозёрская ГРЭС – Республика Бурятия. Исследования на территории бывшего СССР

представлены водоёмами Литвы (оз. Друкшяй – Игналинская АЭС), Республики Беларусь (оз. Лукомское – Лукомльская ГРЭС) и Молдавии (Кучурганское водохр. – Молдавская ГРЭС).

**Специфические особенности водоёмов-охладителей, влияющие на их трофическое состояние.** В работе (Безносков и др. [2]) изложена точка зрения, согласно которой водоёмы-охладители обладают несколькими специфическими особенностями, отличающими их от других водных объектов. Помимо химического эвтрофирования для них характерно термическое и дестратификационное эвтрофирование, связанное с забором воды из глубинных слоёв. Ранние процессы эвтрофирования проходят незаметно, но затем последствия эвтрофикации принимают «залповый» характер, что вызывает ухудшение условий существования живых организмов и создаёт угрозу возникновения чрезвычайной экологической ситуации в водоёме и техногенной чрезвычайной ситуации в системе водоснабжения АЭС [2].

Авторы последовательно рассматривают возможность использования традиционных показателей для оценки трофического состояния водоёмов-охладителей. По мнению учёных, кислородное насыщение воды вследствие аэрации и перемешивания не может использоваться для оценки трофности воды. Оценка дефицита кислорода в придонных слоях также не даёт адекватной картины трофического состояния воды, так как в результате сброса подогретых вод происходит увеличение продолжительности летней стратификации и подавление процесса конвекции, вследствие чего наблюдается дефицит кислорода в придонных слоях, но это не связано с эвтрофикацией [2].

Анализируя возможность использования показателей содержания биогенных элементов в воде для определения трофического состояния водных масс, авторы приводят аргумент равномерного распределения по всей водной массе циркуляционного течения поступающих в воду веществ, что сглаживает пространственные различия в их содержании. Объяснение этого утверждения заключается в том, что в водоёмах-охладителях с оборотной системой водоснабжения основная часть водной массы движется по более или менее замкнутому кругу. Так как объём воды достаточно большой, определить достоверное увеличение содержания биогенов можно только при высоких их концентрациях, когда процесс эвтрофикации примет большой масштаб [2]. Также при рассмотрении содержания биогенных элементов в водохранилище-охладителе для определения его трофического состояния необходимо учитывать подвижность вод циркуляционного течения, увеличение вегетационного периода на части акватории в результате сброса подогретых вод и другие особенности [2].

Перманганатная окисляемость отражает содержание в воде органического вещества, поэтому увеличение значений перманганатной окисляемости исследователи рассматривают как признак эвтрофикации водоёма-охладителя [2]. Показатель «увеличение численности и биомассы нефотосинтезирующих микроорганизмов» не является индикатором эвтрофикации. Увеличение общей численности бактериопланктона и численности гетеротрофных бактерий на участках циркуляционного течения связано в основном с разном биобрастаний, образующихся на внутренней поверхности теплообменников [2].

Изменение качественных и количественных показателей развития фитопланктона, часто используемое для изучения трофности озёр и водохранилищ, не всегда является показателем эвтрофикации. Так, интенсивное перемешивание воды и её сильный подогрев в районе сброса АЭС тормозят развитие синезелёных водорослей<sup>3</sup> [2].

Особый интерес в статье [2] представляет раздел «Изменение качественного состава, количественных показателей и пространственного распределения макрофитов». Оценка трофического состояния воды зачастую проводится по показателям состава и биомассы фитопланктона. Высшая водная растительность как фактор, влияющий на трофическое состояние, не всегда учитывается.

В водоёме-охладителе Курской АЭС увеличение биомассы роголистника и рдеста гребенчатого, возрастание площади сплошных зарослей являются свидетельствами эвтрофикации [2].

Макрофиты в водоёме выступают фильтром на пути движения биогенов, конкурентом синезелёных водорослей за биогенные вещества. В этой связи их удаление из водоёма должно производиться осознанно, как тактическое мероприятие [2].

**Гидротермический режим водоёмов-охладителей как фактор формирования трофического состояния водной массы.** В изученных работах (Безносков, Кучкина, Суздалева [3], Власов, Самойленко [6], Григорьева и др. [10], Гунин, Серпокровлов, Лейкин [12], Еремкина и др. [14], Кириллов и др. [17], Лубенцова, Верещагина, Дмитриев [19], Морозова и др., 2017 [24], Самойленко, Свирид [34], Танайлова, Грищенко, Воронин [38], Щур [41]) приводятся данные по изменённому гидротермическому режиму водоёмов-охладителей. Изменения заключаются в повышении среднегодовой температуры воды, формировании зон разной степени подогрева, уменьшении площади

---

<sup>3</sup> Здесь и далее понятие «синезелёные водоросли» (цианопрокариоты, цианобактерии) употребляется как отдел фитопланктона (в соответствии с авторскими материалами), однако согласно современным научным представлениям эта группа организмов выделена как отдел царства бактерий [40].

акватории, покрытой льдом, сокращении продолжительности ледостава и толщины льда. Авторы отмечают, что наибольшее изменение гидротермического режима воды по сравнению с естественным характерно для холодного времени года [12, 17], однако есть водоёмы, в которых подогрев распространяется на большую площадь акватории летом [14]. Сброс тёплой воды способствует уменьшению уровня кислородного насыщения воды, что приводит к снижению интенсивности процессов самоочищения воды и сокращению численности стада рыб, ценные виды промысловых рыб замещаются сорными [24].

Особое место при рассмотрении теплового воздействия АЭС на продукцию и деструкцию органического вещества в водоёме-охладителе занимает вопрос термической эвтрофикации водоёма. Под термической эвтрофикацией понимают процесс увеличения трофности водоёма вследствие ускорения круговорота биогенных элементов при повышении температуры водной среды [4]. В.Н. Безносков, М.А. Кучкина, А.Л. Суздалева в результате исследования водоёмов-охладителей Курской и Смоленской АЭС [3], пришли к следующим выводам: «В длительно существующем водоёме-охладителе с оборотной системой водоснабжения подогрев воды в технических агрегатах может вызывать заметное увеличение концентрации биогенных элементов только при поступлении на водозабор АЭС вод из акватории, обычно не включающихся в циркуляционное течение, или в результате попадания в систему охлаждения взмученных частиц грунта с «необогреваемых» участков. Такие явления периодически наблюдаются во всех исследованных водоёмах-охладителях во время нагонов, паводков и дноуглубительных работ» [3]. Также возрастание температуры способствует повышению уровня первичной продукции, особенно ранней весной, и деструкции, главным образом в холодное время года [3].

**Смена трофического состояния вследствие изменения гидрохимического режима водоёмов-охладителей.** Гидрохимические параметры и их связь с трофическим состоянием водохранилищ-охладителей изучены в работах (Безносков и др. [2], Власов, Самойленко [6], Горюнова [9], Митрахович [20], Митрахович, Бурко [21], Морозова и др. [24], Мухутдинов, Фоминых, Бутакова [26], Салицкайте-Буникене [32], Самойленко, Свирид [34]).

Гидрохимические показатели (соединения фосфора и азота) и режим водоёмов-охладителей в процессе их использования претерпели некоторые изменения. Источники поступления биогенных элементов не связаны с работой системы охлаждения электростанций. Мощное воздействие на гидрохимические параметры водоёмов-охладителей оказывают садковые комплексы по разведению рыбы, так как в воду

поступают остатки комбикорма и экскременты рыб [6, 20, 26, 34]. Вблизи водоёмов-охладителей находятся населённые пункты, и сброс сточных вод городских коллекторов ведёт к загрязнению воды и эвтрофикации [2, 9, 24, 32]. Дополнительные источники органического вещества – комплекс крупного рогатого скота [26], неорганизованное рекреационное использование прибрежной зоны [9], дноуглубительные работы [2].

Динамика содержания биогенных показателей (общего фосфора, минерального фосфора, минерального азота) в водоёмах-охладителях рассмотрена в зависимости от работы садковых комплексов. Ввод в эксплуатацию садков способствовал возрастанию концентрации биогенов в воде, после сокращения их мощностей и ликвидации комплексов содержание биогенов закономерно снизилось, приводятся соответствующие количественные данные [6, 21, 26, 34]. Изменения концентраций соединений фосфора в воде связаны также с многолетней и сезонной динамикой уровня воды в водохранилище, а увеличение поступления азота в водную экосистему объясняется усилением его фиксации из атмосферы некоторыми видами синезелёных водорослей [20].

Трансформация гидротермического режима за счёт теплового загрязнения и гидрохимического режима за счёт поступления в воду дополнительного количества биогенных элементов ведёт к качественным и количественным изменениям фитопланктона, зоопланктона и зообентоса. Динамике видового состава и количественных показателей развития фитопланктона в изученных работах уделяется наибольшее внимание.

**Показатели развития фитопланктона, зоопланктона и зообентоса как параметры трофического состояния водной массы.** Изменения биоты (фитопланктона, зоопланктона и зообентоса) в водоёмах-охладителях проанализированы в работах (Безносов, Кучкина, Суздалева [3], Власов, Самойленко [6], Горская [8], Григорьева и др. [10], Еремкина и др. [14], Кириллов и др. [17], Лубенцова, Верещагина, Дмитриев [19], Митрахович [20], Митрахович, Бурко [21], Мухутдинов, Фоминых, Бутакова [26], Самойленко, Вежновец [33], Самойленко, Свирид [34], Щур [41]).

Изменения видового состава фитопланктона в водоёмах-охладителях изучены в связи с ролью дрейссены: при высокой фильтрационной способности моллюска-фильтратора дрейссены преобладали диатомовые водоросли, снижение численности дрейссены привело к всё более частому доминированию в летнем максимуме цианопрокариот [6, 33]. Большое влияние на развитие фитопланктона оказала и внешняя фосфорная нагрузка: при развитии садкового комплекса – источника биогенных соединений – фитопланктон



развивался более интенсивно. Аналогично изменялась биомасса фитопланктона – возрастала с увеличением биогенной нагрузки и снижалась с её уменьшением [6, 26].

Зависимость фитопланктона от изменённых температурных условий воды описана в работе [17]. В связи с подогревом воды число видов не сильно варьирует в течение вегетационного периода, разнообразие и обилие фитопланктона значительное в зимне-весенний период в отличие от естественных водоёмов. Синезелёные водоросли в отдельные периоды перешли в разряд массовых [14, 20], внешнее проявление их развития – цветение воды – наблюдается в летний период [8, 20, 33, 41]. Численность фитопланктона при эвтрофикации достоверно увеличивается [14].

В статьях [33, 34] рассмотрены этапы развития фитопланктона в водоёме-охладителе Лукомльской ГРЭС. Подробно описаны изменения численности и биомассы доминирующих отделов водорослей в связи с тепловым воздействием и внешней фосфорной нагрузкой от садкового комплекса, фильтрационной ролью дрейссены и погодными условиями. Смена видов цианобактерий в 2003–2011 гг. свидетельствует об эвтрофировании водоёма-охладителя [34]. Авторы подчёркивают нестабильность экосистемы водохранилища и делают вывод о росте уровня трофии по наблюдаемой сукцессии массовых видов фитопланктона [34]. В статье [41] использован подход оценки трофности водоёма по разнообразию представителей зелёных водорослей порядка хлорококковых.

Пространственная неоднородность в распределении водорослей по акватории водоёма-охладителя описана в статье [41] (географический аспект). В водоёме-охладителе Берёзовской ГРЭС-1 (Красноярский край) в июне на мелководье и в сбросном канале доминировали зелёные водоросли, в глубоководной и приплотинной частях – диатомовые.

В работах [3, 19, 20, 21] показано увеличение первичной продукции, что свидетельствует о повышении трофического уровня экосистем водоёмов-охладителей.

Зоопланктон и зообентос также реагируют на изменение трофического состояния воды. Сокращение общей численности зоопланктона за счёт коловраток и рост биомассы за счёт крупных ракообразных – показатель снижения темпов эвтрофирования водоёма-охладителя [6]. Свидетельствами эвтрофикации в одних водоёмах являются увеличение биомассы зоопланктона и зообентоса [19, 20], в других, напротив, при эвтрофикации биомасса зоопланктона и зообентоса снижается [14], уменьшается также видовое разнообразие зообентоса.

**Высшая водная растительность – индикатор трофического состояния водоёмов-охладителей.** В работах (Безносков и др. [2], Власов, Самойленко [6], Горюнова [9], Григорьева и др. [10], Грищенко и др. [11], Еремкина и др. [14], Кириллов и др. [17], Митрахович [20], Мухутдинов, Фоминых, Бутакова [26], Танайлова, Грищенко, Воронин [38], Филипенко [39]) изучено развитие высшей водной растительности как показателя трофического состояния водоёмов-охладителей. Приведены данные по видовому составу макрофитов (в том числе указаны растения-доминанты) и его динамике [2, 11, 14, 17, 39]. В связи с повышением температуры воды в водоёмах-охладителях появляются и расселяются адвентивные виды растений [10].

Результаты исследований включают установление степени зарастания водоёмов-охладителей и её временных изменений, отмечено увеличение площадей отдельных видов растений [2, 6, 9, 11, 14, 17, 26, 39], определены фитомасса и продуктивность сообществ [2, 11, 14, 20, 38, 39]. Распространение высших водных растений по акватории водоёмов-охладителей ограничивается перечислением участков зарастания различными экологическими группами растений и их отдельными представителями [9, 10, 14, 17, 39].

Причины зарастания водоёмов-охладителей: низкий уровень воды, снижение проточности в зонах кольцевых течений сбросных вод, увеличение концентрации биогенных элементов, снижение численности растительноядных рыб в водоёме, особенно белого амура [39]. Зарастанию способствуют изрезанность береговой линии, малые колебания уровня воды в вегетационный период, низкая мутность воды, малые скорости течения, хорошая прогреваемость водной толщи и грунтов дна, обезвоживание и уплотнение илистых донных и прибрежных отложений во время засушливого периода или сработки водохранилища [16].

Инвазивные виды высшей водной растительности (валлиснерия спиральная, элодея зубчатая) развиваются в водохранилищах-охладителях в условиях изменённого гидротермического режима. Они отличаются от адвентивных видов хорошей адаптивностью и возможностью вытеснения местных видов растений. В зимний период при отсутствии теплового воздействия ледовый покров, впервые установившийся за время существования водоёма-охладителя Верхнетагильской ГРЭС, привёл к вымерзанию вегетативных органов инвазивных растений, сокращению ареалов их распространения и биомассы [26].

Отдельного внимания заслуживает статья «Роль макрофитов в зарастании водоёма-охладителя Молдавской ГРЭС» [39]. В результате исследования обобщены данные по положительным и отрицательным изменениям и последствиям зарастания высшими водными растениями

акватории водоёма-охладителя. К сожалению, негативных последствий зарастания больше, чем позитивных.

Умеренное зарастание водоёмов (до 20%) считается допустимым и благоприятно влияет на развитие его прибрежной флоры и фауны [31]. В.А. Мовчан полагает, что зарастание до 25% площади акватории считается терпимым [22]. В рассматриваемых водоёмах-охладителях этот показатель не превышает допустимых значений, за исключением водоёма-охладителя Лукомльской ГРЭС (Беларусь). Так, в 1971-1981 гг. до 30% площади зеркала озера было покрыто макрофитами, с начала 2000-х годов этот показатель сократился до 15% [6].

**Предложения и опыт практического применения мер по снижению эвтрофикации водоёмов-охладителей.** В работах (Горская [8], Грищенко и др. [11], Гунин, Серопкрылов, Лейкин [12], Митрахович [20], Мухутдинов, Фоминых, Бутакова [26], Самойленко, Свирид [34]) описаны предложения по регулированию трофического состояния водоёмов-охладителей и опыт осуществления подобных мероприятий. В большинстве случаев предлагаются и используются методы биомелиорации (искусственное вселение хищных и детритоядных рыб для предотвращения эвтрофикации). С этой целью используют белого толстолобика, белого амура, пиленгаса, толстолобика, карпа [8, 11, 12, 26]. Метод альголизации – вселение штамма ИФР №С-111 *Chlorella vulgaris* – биоингибитора развития синезелёных водорослей (имеется успешный опыт на Волгоградском и Цимлянском водохранилищах) приводится в работах [8, 12]. Уничтожение прибрежных макрофитов как тактическая задача рассматривается в работе [2]. Для этой цели могут применяться различные методики: выкашивание (общее, прибрежное), выжигание, разреживание, вытаптывание, боронование, разведение ондатры, нутрии, растительноядных рыб [16]. Уменьшение мощности садкового комплекса и совершенствование технологического процесса кормления рыбы на оз. Лукомское способствовали снижению уровня трофического состояния водоёма-охладителя [20, 34].

**Анализ публикаций.** Изучение публикаций по проблеме трофического состояния водоёмов-охладителей позволяет уточнить некоторые авторские выводы и определить актуальные направления дальнейших исследований.

Утверждение о равномерном распределении по всей водной массе циркуляционного течения поступающих в воду веществ (в первую очередь, биогенов) (Безносков и др. [2]), по нашему мнению, является верным для водоёмов-охладителей относительно несложной формы, каким является Курчатовское водохранилище (водоём-охладитель Курской АЭС). Так, Удомельское водохранилище (водоём-охладитель Калининской АЭС) имеет более сложную форму и, соответственно, более медленный водообмен.

Форму водоёма можно оценить при помощи индекса развития береговой линии (коэффициента формы):

$$D_L = \frac{L}{2\sqrt{\pi A}} \quad (1)$$

где  $D_L$  – индекс развития береговой линии,  $L$  – длина береговой линии озера,  $A$  – площадь озера [42]. Индекс развития береговой линии идеально круглого озера равен 1, по мере усложнения формы озера и изрезанности береговой линии индекс возрастает [5].

При НПУ=156,25 м БС площадь зеркала Удомельского водохранилища составляет 20,2 км<sup>2</sup> [29], длина береговой линии оз. Песьво – 15,125 км, оз. Удомля – 21,465 км (измерены по карте-схеме масштаба 1:25000 [28]). Соответственно, индекс развития береговой линии составляет 2,3. Полученные данные согласуются с данными [27] – индекс развития береговой линии оз. Песьво – 2,06, оз. Удомля – 2,5, поэтому в целом форму водохранилища можно оценить как усложнённую.

Площадь зеркала Курчатовского водохранилища при НПУ составляет 21,5 км<sup>2</sup> [7], длина береговой линии – 22,75 км (измерена по карте-схеме масштаба 1:25000), соответственно индекс развития береговой линии – 1,39. На водохранилище построена дамба, разделяющая большую часть акватории на две примерно равные части. Островов нет.

Озеро Удомля вытянуто с севера на юг, имеет несколько крупных островов, часть которых (на западе) соединена серией дамб, отделяющей протоку в верховья озера. Благодаря протоке в верховья оз. Удомля, антропогенно созданным каналам в оз. Песьво и оз. Удомля, вода поступает в основную часть акватории оз. Удомля с изменённым химическим составом. Так, сравнение данных гидрохимических измерений содержания нитрат-иона, фосфат-иона, сульфат-иона, хлорид-иона в воде в июне-августе 2020 г. между станциями в центральной части оз. Удомля и в прорези между оз. Удомля и оз. Песьво показало существенные отличия в течение всего летнего сезона или отдельных месяцев. Протока в верховья оз. Удомля отделяет большую часть его акватории от прямого поступления сбросных вод по кругу, как это происходило ранее. Время прохождения воды до основной части акватории оз. Удомля и водозабора увеличилось, что является причиной различий в гидрохимических характеристиках водных масс.

Исследование трофического состояния тестовых участков Удомельского водохранилища по сочетанию результатов лабораторного анализа содержания в воде неорганических форм азота и фосфора, pH воды и хлорофилла, определённого на основе данных спутника Landsat

8 [30], показало пространственные различия и разную интенсивность эвтрофикации на тестовых участках.

Форма Курчатовского водохранилища значительно более простая, чем Удомельского водохранилища, что подтверждает меньший индекс развития береговой линии. Водообмен для водоёма-охладителя Курской АЭС оказывает большее влияние на химический состав воды, чем для водоёма-охладителя Калининской АЭС. Равномерное распределение по всей водной массе циркуляционного течения веществ на наш взгляд относится не ко всем водоёмам-охладителям и должно быть подтверждено анализом формы водоёма и сравнением гидрохимических параметров водных масс станций мониторинговых наблюдений, расположенных в разных частях акватории водоёма-охладителя.

Значительная часть рассмотренных исследований носит *биоэкологический характер с элементами географического подхода*. Основной подход исследования – биоэкологический, в центре изучения находятся отдельные организмы и их группы. При таком взгляде основное внимание уделяется их характеристикам, условиям существования, взаимоотношениям между собой и со средой обитания как показателям трофического состояния. Зачастую упускается пространственный характер и временные изменения трофического состояния.

Изучение пространственно-временных закономерностей трофического состояния водоёмов-охладителей представляется недостаточным. Авторы приводят карты-схемы объектов исследования, расположение на них пунктов наблюдения, однако не отображают на картах температуру воды, гидрохимические параметры, показатели фитопланктона, зоопланктона, макрофитов на поверхности водохранилищ, отсутствуют также карты трофического состояния водной массы. Временная динамика в изученных работах исследуется по отдельным направлениям (гидрохимические характеристики, фитопланктон, макрофиты), практически не рассмотрены этапы изменения трофического состояния водоёмов-охладителей.

**Заключение.** В результате анализа научных публикаций, посвящённых трофическому состоянию водоёмов-охладителей, выделены направления и проанализировано содержание современных исследований. Полученные в ходе исследования результаты позволили сделать следующие выводы:

1. Форма водоёмов-охладителей и движение воды по более или менее замкнутому кругу определяют водообмен и влияют на трофическое состояние участков акватории водоёма-охладителя, однако их влияние не всегда является решающим.
2. Анализ показывает недостаточную изученность пространственных и

временных закономерностей трофического состояния водоёмов-охладителей. В этой связи сформулированы следующие научные задачи дальнейших исследований для водоёмов-охладителей Калининской АЭС и Конаковской ГРЭС:

***Теоретические:***

1. Установление закономерностей формирования зон различного трофического состояния водной массы в условиях аквальных комплексов водоёмов-охладителей.
2. Выявление сезонной и многолетней динамики зон различного трофического состояния Удомельского и Ивановского водохранилищ.
3. Выявление многолетней динамики зарастания водоёмов-охладителей.

***Практические:***

1. Определение степени зарастания высшей водной растительностью водоёмов-охладителей по космическим снимкам с верификацией результатов в полевых условиях.
2. Оценка трофического состояния аквальных комплексов водоёмов-охладителей.
3. Создание карт трофического состояния Удомельского и Ивановского водохранилищ.
4. Разработка формулы определения трофического состояния водоёма на основе данных дистанционного зондирования.
5. Создание базы данных результатов мониторинга трофического состояния Удомельского водохранилища за многолетний период на основе данных дистанционного зондирования.
6. Создание подсистемы мониторинга трофического состояния водоёма-охладителя в рамках существующего экологического мониторинга на основе эколого-географического подхода.

**Список литературы**

1. Ашихмина Т.Я., Кутявина Т.И., Домнина Е.А. Изучение процессов эвтрофикации природных и искусственно созданных водоёмов (литературный обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 3. С. 6–13.
2. Безносков В.Н., Горюнова С.В., Кацман Е.А., Кучкина М.А., Суздалева А.Л. Особенности эвтрофирования водоема-охладителя АЭС // Актуальные проблемы экологии и природопользования. Сборник научных трудов Российского университета дружбы народов. Вып.5. Ч.2. Экологические исследования природно-техногенных систем. М., 2004. С.176–186.
3. Безносков В.Н., Кучкина М.А., Суздалева А.Л. Исследование процесса термического эвтрофирования в водоемах-охладителях АЭС // Водные ресурсы. 2002. Т.29. №5. С.610–615.

4. Веригин Б.В. О явлении термического евтрофирования водоемов // Гидробиол. журнал. 1977. Т. 13. № 5. С. 98–105.
5. Виноградов Б.К., Архангельский Н.А., Коробков А.Г. и др. География Удомельского района Тверской области / Под ред. Б.К. Виноградова. Тверь: РИУ Твер. госуниверситета, 1999. 356 с.
6. Власов Б.П., Самойленко В.М. Влияние тепловой электростанции на экосистему водоема-охладителя Лукомское // География: развитие науки и образования: Сборник статей по материалам ежегодной международной научно-практической конференции LXXIV Герценовские чтения. В 2 томах. Том 2 / Отв. редакторы С.И. Богданов, Д.А. Субетто, А.Н. Паранина. СПб, 2021. С. 31–35.
7. Вода России – Курчатовское водохранилище. URL: [https://water-ru.ru/Водные\\_объекты/3422/Курчатовское\\_водохранилище](https://water-ru.ru/Водные_объекты/3422/Курчатовское_водохранилище)
8. Горская О.И. Совершенствование методов альголизации и биомелиорации водоема-охладителя Ростовской АЭС и приплотинной части Цимлянского водохранилища // Глобальная ядерная безопасность. 2023. № 2(47). С. 14–24.
9. Горюнова С.В. Антропогенное эвтрофирование водоема – охладителя АЭС как возможная причина чрезвычайной ситуации техногенного характера // Вестник РУДН. Серия: Агрономия и животноводство. 2009. №2. С. 35–42.
10. Григорьева И.Л., Комиссаров А.Б., Кузовлев В.В., Чекмарева Е.А. Изменение гидроэкологического состояния водоемов-охладителей под влиянием сброса теплых вод объектами теплоэнергетики Тверской области // Третьи виноградовские чтения. Грани гидрологии: Сборник докладов международной научной конференции памяти Ю.Б. Виноградова / Под редакцией О.М. Макарьевой. СПб, 2018. С. 338–342.
11. Грищенко К.Г., Седова О.В., Воронин М.Ю., Ионова Е.А., Рязанов С.В. Современное состояние высшей водной растительности водоема-охладителя Балаковской АЭС под воздействием растительоядных рыб // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2016. Т. 16, № 2. С. 231–236.
12. Гунин П.А., Серпокрылов Н.С., Лейкин Ю.А. Анализ влияния Волгодонской АЭС на водоем-охладитель // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2010. № 3. С. 93–103.
13. Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.
14. Еремкина Т.В., Изиметова М.Ф., Климова Н.Б., Силивров С.П., Цурихин Е.А., Чечулина Н.В. Экология Исетского водохранилища – водоема-охладителя Среднеуральской ГРЭС // Экология водоемов - охладителей энергетических станций: сб. материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / отв. ред. Г.Ц. Цыбекмитова. Чита, 2017. С. 109–116.
15. Казимурук В.Д. Гидроэкологические процессы и реконструкция зарастающих водных объектов: автореф. дисс. ... доктора геогр. наук: 1.6.21. М., 2024. 42 с.

16. Кацман Е.А. Развитие высшей водной растительности в водоемах-охладителях АЭС: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.18. Москва, 2004. 28 с.
17. Кириллов В.В. Зарубина Е.Ю., Митрофанова Е.Ю., Яныгина Л.В., Крылова Е.Н. Биологическая оценка последствий термического загрязнения водоема-охладителя Беловской ГРЭС // Ползуновский вестник. 2004. № 2. С. 133–141.
18. Кучкина М.А. Особенности процессов эвтрофирования в водоемах-охладителях АЭС: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16. Москва, 2004. 28 с.
19. Лубенцова А.С., Верещагина Е.А., Дмитриев В.В. Оценка состояния водных экосистем, испытывающих влияние предприятий атомной энергетики, на примере Калининской АЭС // Экология водоемов – охладителей энергетических станций: Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. Чита, 2017. С. 185–193.
20. Митрахович П.А. Природные процессы и антропогенная трансформация экосистемы водоема многоцелевого использования - оз. Лукомское // Вестник БГУ. Серия 2: Химия. Биология. География. 2009. № 3. С. 70–76.
21. Митрахович П.А., Бурко Л.Д. Многолетняя динамика продуктивности экосистемы озера Лукомское // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: Материалы III международной научной конференции. Минск, Нарочь, 2007. С. 64–65.
22. Мовчан В.А. Жизнь рыб и их разведение. М.: Колос, 1966. 349 с.
23. Морозова О.Г. Факторы эвтрофикации экосистемы водоемов-охладителей и принципы оптимизации качества воды для технологических целей и аквакультуры: автореф. дис. ... доктора биол. наук: 03.00.16. Красноярск, 2003. 40 с.
24. Морозова О.Г., Камоза Т.Л., Коюпченко И.Н., Савельев А.С., Пен Р.З., Веселкова Н.С., Кудрявцев М.Д. Проблемы эксплуатации водоема-охладителя на примере Березовской ГРЭС-1 // Теплоэнергетика. 2017. № 8. С. 81–88.
25. Морозова О.Г., Пен Р. Эвтрофикация водоемов-охладителей ТЭС. Принципы оптимизации качества воды: Монография. Красноярск, 2011. 148 с.
26. Мухутдинов В.Ф., Фоминых А.С., Бутакова Е.А. Гидробиологическая оценка состояния Верхнетагильского водоема-охладителя // Экология водоемов - охладителей энергетических станций: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Чита, 2017. С. 210–217.
27. Предварительный вариант материалов «Оценка воздействия на окружающую среду деятельности по эксплуатации энергоблока №4 Калининской АЭС в 18-месячном топливном цикле на уровне мощности реакторной установки 104% от номинальной». Книга 1. ООО «НПО «Гидротехпроект», 2017. 560 с.
28. Предварительный вариант материалов «Оценка воздействия на окружающую среду деятельности по эксплуатации энергоблока №4 Калининской АЭС в 18-месячном топливном цикле на уровне мощности



- реакторной установки 104% от номинальной». Книга 2. ООО «НПО «Гидротехпроект», 2017. 94 с.
29. Приказ Федерального агентства водных ресурсов от 19 марта 2024 г. N 64 "Об утверждении Правил использования водных ресурсов водохранилища Калининской АЭС". URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202406190002?ysclid=m6opstr8bx102542165&index=10>.
30. Рудников Л.С. Оценка трофического состояния тестовых участков акватории Удомельского водохранилища // Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология. 2024. № 1(45). С. 23–35.
31. Садчиков А.П., Кудряшов М.А. Экология прибрежно-водной растительности: учебное пособие для студентов. М.: НИИ-Природа, РЭФИА, 2004. 220 с.
32. Салицкайте-Буникене Л. Влияние антропогенных факторов на трофический статус озера Друкшай – водохранилища-охладителя Игналинской АЭС // Научно-технические проблемы водохозяйственного и энергетического комплекса в современных условиях Беларуси: Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. В 2 частях. Часть 2. Брест, Республика Беларусь, 2011. С. 65–68.
33. Самойленко В.М., Вежновец Г.Г. Изменения фитопланктона водоема-охладителя Лукомской ТЭС // Environment. Technology. Resources: труды 2-й Международной научно-практической конференции. 1999. Том 1. С. 170–176.
34. Самойленко В.М., Свирид А.А. Фитопланктон водоема-охладителя Лукомльской ГРЭС в условиях изменяющейся антропогенной нагрузки // Вопросы современной альгологии. 2020. № 2(23). С. 33–39.
35. Сибирина Т.Ф. Эвтрофикация природно-техногенной системы водоемов-охладителей Средней Сибири: Монография. Красноярск, 2012. 114 с.
36. Солохина Т.Ф. Определение факторов эвтрофикации природно-техногенной системы водоема-охладителя на примере Березовской ГРЭС-1: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16. Красноярск, 2003. 20 с.
37. Суздалева А.Л. Структура и экологическое состояние природно-техногенных систем водоемов-охладителей АЭС: автореф. дис. ... доктора биол. наук: 03.00.16, 05.26.02. Москва, 2002. 40 с.
38. Танайлова Е.А., Грищенко К.Г., Воронин М.Ю. Состояние высшей водной растительности и фотосинтетических пигментов тростника южного (*Phragmites australis*) водоема-охладителя Балаковской АЭС // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2014. Т. 14, № 2. С. 101–105.
39. Филипенко Е.Н. Роль макрофитов в зарастании водоема-охладителя Молдавской ГРЭС // Чтения памяти кандидата биологических наук, доцента Л.Л. Попа. Тирасполь, 2015. С. 153–160.
40. Цианобактерии. Большая российская энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: <https://bigenc.ru/c/tsianobakterii-05f5ce>.

41. Щур Л.А. Фитопланктон как индикатор состояния экосистемы водоема-охладителя Березовской ГРЭС-1 (Красноярский край) // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 5. С. 597–605.
42. Wetzel Robert.G. Limnology: Lake and River Ecosystems. Academic Press, 2001. 1006 с.

*Об авторе:*

РУДНИКОВ Леонид Сергеевич – аспирант первого года обучения по специальности 1.6.12 Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов. ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» (170021, г. Тверь, ул. Прошина, д. 3, корп. 2); e-mail: leon.sergeewitch@yandex.ru, ORCID: 0009-0006-0112-2642, SPIN-код: 8847-4030. Научный руководитель: д.г.н., профессор О.А. Тихомиров.

## **The study of the problem of the trophic state of cooling reservoirs of thermal and nuclear power plants**

**L.S. Rudnikov**

Tver State University, Tver

The article presents an overview of scientific publications on the problem of the trophic state of cooling reservoirs of thermal and nuclear power plants, based on the analysis of publications of electronic systems and libraries. The conclusion is made about the predominance of the bioecological approach in the course of research.

**Keywords:** *trophic state of the reservoir, eutrophication, cooling reservoir, geographical approach.*

Рукопись поступила в редакцию 24.02.2025

Рукопись принята к печати 26.02.2025