

DOI: <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2026-1-14-23>

## **Многолетняя динамика температуры воды водоёма-охладителя Калининской АЭС**

**Л.С. Рудников**

ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», Тверь

На основе опубликованных и фондовых данных выполнен анализ трендов, тенденций и коэффициентов многолетних изменений температуры воды водоёма-охладителя Калининской АЭС. Наблюдается постепенное увеличение среднесезонных температур и сокращение температурных различий между озёрами Песьво и Удомля. С 2019 г. разница средних температур за зимний, летний и осенний сезоны между озёрами в основном не превышает 1,5 °С, что означает переход к гомеостазу экосистемы водоёма-охладителя при изменённом термическом режиме. Выделены этапы и подэтапы становления современного температурного режима водоёма-охладителя. Отмечено существенное возрастание коэффициентов температурных изменений в годы включения новых энергоблоков.

***Ключевые слова:** динамика температуры воды, термический режим, тепловое воздействие, водоём-охладитель, атомная станция.*

**Введение и постановка проблемы.** Температура является значимой характеристикой водных масс аквальных комплексов водохранилищ, определяющей их термический режим, водный баланс, а также условия существования гидробионтов. Она зависит, главным образом, от положения водоёма в определённом климатическом поясе и области, а также метеорологических условий.

Основным антропогенным фактором влияния атомных станций на водоёмы-охладители выступает сброс тёплых вод, использованных в системе охлаждения технологического оборудования. Степень теплового воздействия в определённый момент времени зависит от количества, мощности и режима работы включённых энергоблоков, а также эффективности функционирования системы охлаждения.

Температура воды, формирующаяся под воздействием природных и антропогенных факторов, во многом определяет экологическое состояние аквальных комплексов водоёмов-охладителей [7]. Закономерные изменения (сезонные, многолетние) экологического состояния аквакомплексов зависят, в том числе, от интенсивности теплового воздействия. В этой связи изучение многолетней динамики

© Рудников Л.С., 2026

температуры воды водохранилищ-охладителей представляет научный интерес и является актуальной задачей.

Цель настоящей работы заключается в установлении трендов и тенденций многолетних изменений среднесезонных температур воды водоёма-охладителя Калининской АЭС.

Калининская АЭС является крупнейшим производителем электроэнергии в Центральной России, что определяет необходимость регулярного слежения за температурой воды её водоёма-охладителя и анализа сезонных и многолетних изменений температурных показателей. На долю атомной станции приходится 80% всей вырабатываемой электроэнергии в Тверской области. В состав Калининской АЭС входят четыре энергоблока с водо-водяными ректорами (ВВЭР-1000) мощностью 1000 МВт каждый. Основную роль в системе охлаждения ректоров играет водоём-охладитель, образованный озёрами Песьво и Удомля [2].

**Материалы и методика.** В работе рассматриваются среднесезонные (зимние, летние и осенние) температуры воды оз. Песьво и оз. Удомля за время существования водоёма-охладителя. Начальная точка – период до ввода в строй первого энергоблока (1971–1981 гг.). Основной массив используемых данных – за 2000–2024 гг. Результаты наблюдений, положенные в основу работы, представлены в опубликованных [1, 3, 4, 5, 6, 9] и фондовых материалах.

Водоёмы-охладители являются природно-антропогенными объектами, проходящими последовательные этапы смены их динамических состояний от становления экосистем до гомеостаза и даже критического состояния как по экологическим показателям, так и по дальнейшей возможности использовать их в качестве охладителей. Состояние водоёмов-охладителей оценивается, в том числе, и по уровню подогрева воды [8]. Концепция стадийности развития водохранилищ-охладителей может быть использована для анализа многолетних изменений температуры воды водоёма-охладителя Калининской АЭС.

Для водохранилища-охладителя Калининской АЭС установлены этапы становления термического режима под воздействием тёплых вод атомной станции [6]. Настоящая работа является попыткой дополнить имеющиеся результаты исследований.

Анализ полученных рядов данных выполнен в программе MS Excel: построены линии трендов и определены тенденции временной динамики температур воды, рассчитаны коэффициенты их изменений. Под трендом температур понимается общее устойчивое направление их изменений, описываемое математической функцией с наибольшим коэффициентом детерминации.

Тенденция изменения температур – направление их изменений за определённое время. Возможные варианты представления тенденции

температурных показателей: рост, падение, без изменений. Коэффициент изменения температур воды представляет собой отношение средней за сезон температуры текущего года к предыдущему году (изменяется от 0 до 1). Результаты анализа позволили выделить подэтапы формирования термического режима водоёма-охладителя.

**Результаты и обсуждение. Анализ трендов температур воды.** В течение 1971–2024 гг. наблюдается рост средних за зимние сезоны температур воды в водоёме-охладителе (степенные функции с коэффициентами детерминации 0,62 для оз. Песьво и 0,83 для оз. Удомля) (рис. 1).

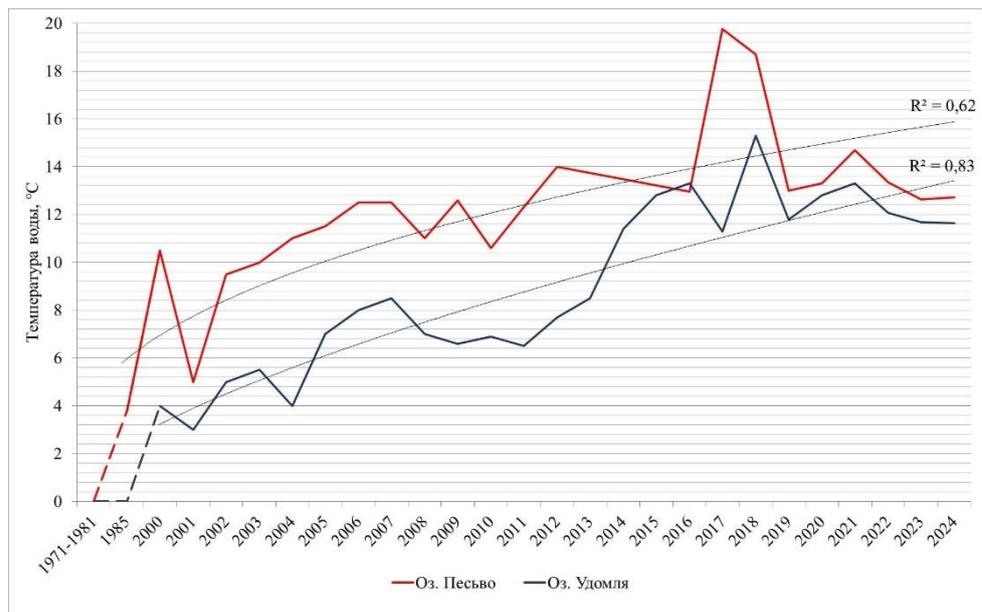


Рис. 1. Многолетние изменения температуры воды водоёма-охладителя Калининской АЭС в зимние сезоны 1971–2024 гг.

Оценка данных мониторинга температур воды и дешифрирования космических снимков спутника Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м показала, что ледостав на основной акватории в последние годы не устанавливается. Лёд формируется преимущественно в литоральных защищённых аквальных комплексах.

Анализ позволяет выделить чередование периодов роста и снижения средних за зимний сезон температур воды. Графики температурных показателей для водной массы озёр достаточно согласованы между собой. Большая изменчивость температур отмечена в оз. Песьво. Воды оз. Песьво несколько «теплее» оз. Удомля. Наблюдается сглаживание температурных различий между озёрами, особенно заметное с 2019 г. Разница средних за зимние сезоны

температур в 2019 – 2024 гг. не превысила 1,5 °С, в то время как в 2000–2014 гг. она составила в среднем 4,76 °С.

Общее направление многолетних температурных изменений **летних сезонов** в озёрах-охладителях характеризуется ростом температур, описываемым экспоненциальной функцией для оз. Песьво (коэффициент детерминации 0,53) и линейной для оз. Удомля (0,62) (рис. 2).



Рис. 2. Многолетние изменения температуры воды водоёма-охладителя Калининской АЭС в летние сезоны 1971–2024 гг.

Для летних сезонов характерны более выраженные периоды увеличения и снижения температур воды по сравнению с зимними. Наиболее заметны пики температур в 1988 г. и 2011 г., связанные, по-видимому, с вводом в строй новых энергоблоков. В течение всего времени средняя температура воды в оз. Песьво выше по сравнению с оз. Удомля. С 2019 г. также отмечено сокращение разницы показателей между озёрами. Температурные различия не превышают 2°С (исключения – 2020 г. и 2024 г.), в то время как в 2000–2012 гг. средняя разница температур составила 3,65 °С.

Анализ средних за осенние периоды температур воды свидетельствует об их увеличении (см. рис. 3). Рост температур может быть описан степенной функцией для оз. Песьво с коэффициентом детерминации 0,67 и логарифмической для оз. Удомля (0,91).

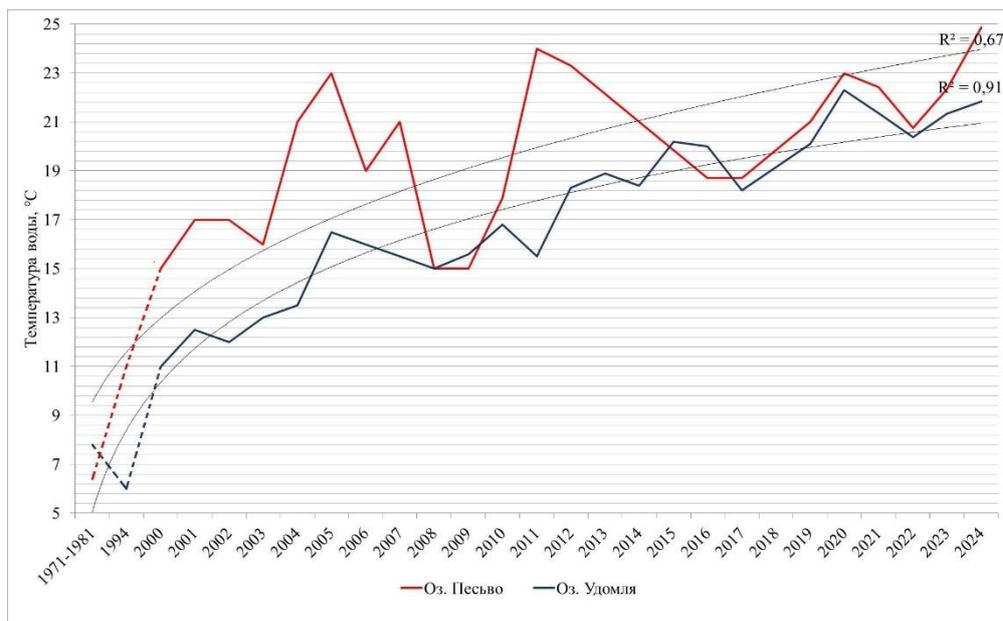


Рис. 3. Многолетние изменения температуры воды водоёма-охладителя Калининской АЭС в осенние сезоны 1971–2024 гг.

Средняя температура воды в оз. Песьво выше по сравнению с оз. Удомля. Однако в некоторые годы температурные показатели в оз. Удомля выше, чем в оз. Песьво или они практически не отличаются. В оз. Песьво наблюдаются более выраженные колебания температуры. Наиболее заметный рост температур наблюдается в оз. Песьво в годы включения 3-го и 4-го энергоблоков (2004 г. и 2011 г.). В оз. Удомля тепловая нагрузка нарастала постепенно. С 2019 г. разница температур между озёрами в осенние сезоны не превышает  $1,1^{\circ}\text{C}$  (исключение – 2024 г.) в отличие от периода 2000–2012 гг., когда температурные различия составили в среднем  $4,08^{\circ}\text{C}$ .

Исследование многолетних изменений среднесезонных температур воды водоёма-охладителя Калининской АЭС за 1971–2024 гг. позволяет сделать вывод об их увеличении до настоящего времени. Наблюдается постепенное сокращение температурных различий между озёрами Песьво и Удомля. С 2019 г. разница температур уменьшилась и в основном не превышает  $1,5^{\circ}\text{C}$ . Согласно представлениям о стадийности развития водохранилищ-охладителей, это означает переход к гомеостазу экосистемы на новом уровне. Стабилизация температур произошла через 35–40 лет после ввода в эксплуатацию 1-го энергоблока и начала использования водоёма в качестве охладителя. Температурный режим основной акватории водоёма не соответствует его местоположению, прослеживаются признаки, характерные для субтропических озёр [8] (например, в течение года температура основной

части акватории не опускается ниже 4°C). Дальнейшее изменение температуры воды водоёма-охладителя в значительной степени зависит от регулирующего воздействия человека: режима работы электростанции, вывода из эксплуатации (или ввода) энергоблоков, совершенствования системы охлаждения.

**Оценка температурных тенденций.** В формировании современного термического режима водоёма-охладителя Калининской АЭС прослеживаются 4 этапа, соответствующие постепенному нарастанию тепловой нагрузки в связи с вводом в эксплуатацию новых энергоблоков [6]. В то же время проводились технические мероприятия, направленные на снижение теплового воздействия атомной станции на водную массу с помощью перераспределения и уменьшения тепловой нагрузки: сооружение дамб и отводящих каналов, создание градирен.

Анализ графиков температур (рис. 1–3) и коэффициентов температурных изменений, рассчитанных на основе среднесезонных температур воды (табл.), позволил выделить подэтапы становления термического режима водоёма-охладителя Калининской АЭС.

Таблица

Коэффициенты температурных изменений в водоёме-охладителе Калининской АЭС (фрагмент таблицы)

ЗИМА	Оз. Удомля	Оз. Песьюво
1971 – 1981	Естественные условия	
1985	1,0	3,8
2000	4,0	2,8
2001	0,8	0,5
2002	1,7	1,9
2003	1,1	1,1
2004	0,7	1,1
2005	1,8	1,0
2006	1,1	1,1
2007	1,1	1,0
2008	0,8	0,9
2009	0,9	1,1
2010	1,0	0,8
2011	0,9	1,2
2012	1,2	1,1

*Примечание.* В таблице выделены коэффициенты изменения температур в годы начала (окончания) временных этапов, описанных в тексте.

**Первый этап становления термического режима водоёма-охладителя (1984–1986 гг.)** связан со строительством плотины на р. Съеже, созданием водохранилища и становлением нового гидрологического режима водоёма. На этом этапе начинаются

первичные изменения термического режима основного объёма водохранилища, связанные с началом работы первого энергоблока АЭС и поступлением потока подогретой воды в водоём-охладитель [6]. Оз. Песьво перестало полностью покрываться льдом, коэффициент прироста температуры воды относительно естественных условий в зоне подогрева зимой увеличился более чем в 38 раз. Большая часть оз. Удомля в зимний период осталась в условиях, близких к естественным.

**Второй этап (1986–2004 гг.).** На этом этапе введён в строй 2-й энергоблок. Наблюдается некоторая стабилизация температурных показателей, заметно отличающихся от естественных условий [6].

**Подэтап 1 (1986–2001 гг.).** В этот период зимой наблюдается значительное возрастание температур воды, а затем их резкое снижение: температура увеличилась к 2000 г. относительно 1985 г. в 4 раза в оз. Удомля и в 8 раз в оз. Песьво, затем снизилась к 2001 г. Летние температуры вначале заметно возросли (в летний сезон 1988 г. наблюдается превышение естественных значений в 1,4 раза в оз. Удомля и в 1,6 раза в оз. Песьво), затем несколько снизились. Осенью прогрев водохранилища увеличился (тенденция – рост температуры воды).

**Подэтап 2 (2001–2004 гг.).** Отмечена стабилизация значений температуры воды во все сезоны. Высокие коэффициенты прироста характерны для зимнего сезона 2002 г. (1,9 для оз. Песьво и 1,7 для оз. Удомля), связанные с возвратом к среднему уровню теплового воздействия.

**Третий этап (2004–2011 гг.). Подэтап 1 (2004–2008 гг.).** Наблюдается увеличение средних температур воды, особенно заметное зимой. Коэффициенты изменения температур возросли в связи с вводом в строй 3-го энергоблока: в основном прирост составил 1,1 – 1,3. Максимальное увеличение температуры отмечено в зимний сезон 2005 г. в оз. Удомля (1,8). Летний период 2007 г. отличается значительными коэффициентами прироста температур воды – 1,2 для обоих озёр.

**Подэтап 2 (2008–2011 гг.).** Для зимы 2008 г. характерно снижение температур в водоёме-охладителе. В дальнейшем в оз. Удомля наблюдается снижение, затем стабилизация температуры воды. В оз. Песьво ситуация иная: температура сначала растёт, затем снижается. Летом и осенью 2008 г. также наблюдается существенное уменьшение температур. Коэффициенты их снижения для озёр составили 0,9. В дальнейшем вновь отмечена тенденция роста температур до конца периода.

**Четвёртый этап (с 2011 г.). Подэтап 1 (2011–2016 гг.).** После достижения определённого максимума температур воды, связанного с вводом в строй 4-го энергоблока (прирост в 2011–2012 гг. составил 1,1–1,3), в оз. Песьво наблюдается некоторое снижение температурных показателей. Летом в оз. Удомля температура воды почти не меняется,

осенью наблюдается медленное увеличение температуры. В зимний период в оз. Удомля произошло существенное возрастание температурных показателей, прирост в 2014 г. составил 1,3. Вероятно, увеличение средней температуры воды и коэффициентов её прироста связаны с влиянием сбросного канала от градирен 3 и 4, введенного в эксплуатацию вместе с четвертым энергоблоком. Средние температуры в озёрах возросли, особенно существенно в оз. Удомля.

**Подэтап 2 (с 2016 г.).** Температура воды в водохранилище-охладителе вновь увеличилась. Наибольший прирост характерен для оз. Удомля. В зимние сезоны 2017–2018 гг. в оз. Песьво и зимой 2018 г. в оз. Удомля отмечено существенное увеличение средних температур воды (скачок температур): коэффициенты их прироста составили 1,4–1,5. Затем ситуация стабилизируется и график становится более плавным.

Летом сохраняется тенденция постепенного увеличения температур воды. В 2021 г. для оз. Удомля прирост составил 1,2. Осенью температура воды также постепенно возрастает.

Таким образом, оценка температурных тенденций и коэффициентов изменения температур воды позволяет сделать вывод о значительном приросте температур в годы введения в эксплуатацию новых энергоблоков. Коэффициенты их прироста в основном составили 1,1–1,3. В оз. Удомля в большинстве случаев эти изменения наблюдаются с запаздыванием в один год, что может быть обусловлено большей площадью акватории и перераспределением тепловой нагрузки между озёрами Песьво и Удомля.

### **Выводы**

1. Анализ трендов температурных изменений в водохранилище-охладителе Калининской АЭС за время его использования в качестве охладителя свидетельствует о постепенном увеличении среднесезонных температур воды в связи с последовательным нарастанием тепловой нагрузки на водную массу, обусловленным вводом в строй новых энергоблоков. При этом термический режим водоёма не соответствует его местоположению и приближается к субтропическому типу.

2. Температурные различия между озёрами Песьво и Удомля постепенно сглаживались. Разница температур с 2019 г. в основном не превышает 1,5°C, что означает переход к гомеостазу экосистемы водоёма-охладила на новом уровне. Стабилизация температур произошла спустя 35–40 лет после ввода в эксплуатацию 1-го энергоблока и начала использования водоёма для охлаждения технологического оборудования АЭС, а также через 8–13 лет с момента пуска последнего энергоблока.

3. На основе оценки температурных тенденций и коэффициентов изменения температур воды предложено выделение 4 этапов (и 6 подэтапов) становления термического режима водоёма-охладила

Калининской АЭС. В годы включения новых энергоблоков наблюдается закономерное возрастание температур в связи с увеличением тепловой нагрузки на водную массу. Коэффициенты прироста температур составили в основном 1,1–1,3.

4. В долгосрочной перспективе изменения температуры воды водоема-охладителя будут определяться метеорологическими процессами (поступлением солнечной радиации, колебаниями температуры воздуха и количества осадков) и регулирующим воздействием человека (режимом работы электростанции, выводом из эксплуатации энергоблоков и вводом новых, совершенствованием системы охлаждения). Для снижения теплового воздействия на водоем-охладитель следует обратить особое внимание на мероприятия по модернизации системы охлаждения технологического оборудования Калининской АЭС.

#### Список литературы

1. Обязов В.А., Виноградов А.Ю., Кучмин А.В. Оценка влияния Калининской АЭС на термический режим водоема-охладителя и климат прибрежных территорий // Атомная энергия. Т. 127. Вып. 3. 2019. С. 158–163.
2. Отчет по экологической безопасности Калининской АЭС за 2024 год. СПб, «Сфера». 2025. 48 с.
3. Предварительные материалы по оценке воздействия на окружающую среду эксплуатации энергоблоков №2, 3 Калининской АЭС на мощности реакторной установки 104% от номинальной. ООО «НПО «Гидротехпроект». Удомля, Тверь. 2013. 333 с.
4. 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. 559 с.
5. Суздалева А.Л. Структура и экологическое состояние природно-техногенных систем водоемов-охладителей: автореферат дис. ... доктора биол. наук. М., 2002. 53 с.
6. Тихомиров О.А. Основные этапы влияния Калининской атомной станции на термический режим водоема-охладителя // Вестник Тверского гос. университета. Серия: «География и геоэкология». 2023. № 1. С. 5–15.
7. Тихомиров О.А. Теоретические и методологические проблемы исследования формирования и экологического состояния аквальных комплексов равнинных водохранилищ // Вестник Тверского гос. университета. Серия: «География и геоэкология». 2018. № 4. С. 6–20.
8. Шилькрот Г.С., Ясинский С.В. Стадийность развития водоемов-охладителей атомных электростанций // Известия РАН. Сер. географ. 2005. №3. С. 63–75.
9. Эрнестова Л.С., Чионов В.Г. Воздействие АЭС на некоторые показатели водоемов-охладителей // Теплоэнергетика. 2004. №8. С. 39–43.

*Об авторе:*

РУДНИКОВ Леонид Сергеевич – аспирант второго 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.

## **Long-term dynamics of the water temperature of the cooling reservoir of the Kalinin nuclear power plant**

**L.S. Rudnikov**

Tver State University, Tver

Based on the published and file materials, an analysis of trends, tendency and coefficients of long-term changes in the water temperature of the cooling reservoir of the Kalinin NPP was performed. There is a gradual increase in seasonal average temperatures and a decrease in temperature differences between Lakes Pesvo and Udomlya. Since 2019, the difference in average seasonal temperatures has generally not exceeded 1.5 ° C, which means a transition to the homeostasis of the ecosystem of the cooling reservoir. The stages and sub-stages of the formation of the modern temperature regime of the cooling reservoir are highlighted. A significant increase in the coefficients of temperature changes was noted during the years when new power units were switched on.

**Keywords:** *dynamics of water temperature, thermal regime, thermal effect, cooling reservoir, nuclear power plant.*

Рукопись поступила в редакцию 4.02.2026

Рукопись принята к печати 11.02.2026