

DOI [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.19\(1\)-7](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.19(1)-7)

EDN <https://elibrary.ru/rpiwuv>

УДК 551.468



© А. Ю. Дворников^{1*}, В. А. Горчаков¹, С. Н. Лоза^{1,2}, 2026

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36

²Институт Альфреда Вегенера, Центр полярных и морских исследований им. Гельмгольца,
г. Бремерхафен, Германия

*dvornikov.ayu@spb.ocean.ru

Моделирование нерадиоактивного загрязнения водоемов-охладителей сбросными водами АЭС в исследованиях последнего десятилетия

Статья поступила в редакцию 29.12.2025, после доработки 16.02.2026, принята в печать 19.02.2026

Аннотация

В обзоре систематизированы исследования последнего десятилетия по моделированию нерадиоактивного воздействия АЭС на водоемы-охладители. Рассмотрены современные подходы численного моделирования, включая адаптированные гидродинамические модели и оригинальные отечественные разработки для оценки теплового и химического влияния. На основе анализа сформулированы перспективные направления развития модельного аппарата в данной области, такие как: включение обратных связей с атмосферными процессами для повышения точности прогнозов в прибрежных зонах со сложной ветровой циркуляцией; развитие моделей взаимодействия с донными отложениями; интеграция с моделями экологического риска для перехода от оценки абиотических параметров к прямому прогнозу воздействия на конкретные виды и популяции гидробионтов; создание детальных прогнозов для экстремальных гидрометеорологических сценариев в условиях меняющегося климата для оценки устойчивости экосистем; а также активное применение моделей на прединвестиционных этапах проектирования новых АЭС для оптимизации размещения и конфигурации сбросных и водозаборных сооружений с целью минимизации потенциального экологического воздействия.

Ключевые слова: АЭС, атомная электростанция, водоем-охладитель, тепловое загрязнение, математическое моделирование

© А. Ю. Дворников¹, В. А. Горчаков¹, С. Н. Лоза^{1,2}, 2026

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia

²Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Bremerhaven, Germany

*dvornikov.ayu@spb.ocean.ru

Modeling of non-radioactive contamination of cooling ponds by NPP discharge waters in research of the last decade

Received 29.12.2025, Revised 16.02.2026, Accepted 19.02.2026

Abstract

The review systematizes research from the last decade on modeling the non-radioactive impact of nuclear power plants (NPPs) on cooling water bodies. It examines modern approaches to numerical modeling, including adapted hydrodynamic models and original domestic developments for assessing thermal and chemical impacts. Based on the analysis, promising directions for the development of modeling tools in this field are formulated, such as: incorporating feedback with atmospheric processes to improve forecast accuracy in coastal zones with complex wind circulation; developing models of interaction with bottom sediments; integrating with ecological risk models to transition from assessing abiotic parameters to direct forecasting of

Ссылка для цитирования: Дворников А.Ю., Горчаков В.А., Лоза С.Н. Моделирование нерадиоактивного загрязнения водоемов-охладителей сбросными водами АЭС в исследованиях последнего десятилетия // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2026. Т. 19, № 1. С. 87–97. EDN RPIWUV. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.19\(1\)-7](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.19(1)-7)

For citation: Dvornikov A. Yu., Gorchakov V.A., Losa S.N. Modeling of non-radioactive contamination of cooling ponds by NPP discharge waters in research of the last decade. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2026;19(1):87–97.

[https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.19\(1\)-7](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.19(1)-7)

impacts on specific species and populations of aquatic organisms; creating detailed forecasts for extreme hydrometeorological scenarios under changing climate conditions to assess ecosystem resilience; and actively applying models at pre-investment stages of designing new NPPs to optimize the siting and configuration of discharge and water intake structures to minimize potential environmental impact.

Keywords: nuclear power plant (NPP), cooling water body, thermal pollution, mathematical modeling

1. Введение

В современном мире ядерная энергетика рассматривается как один из ключевых способов решения энергетических и экологических проблем XXI века. В условиях растущего спроса на электроэнергию и необходимости сокращения выбросов парниковых газов АЭС представляют собой важную альтернативу традиционным тепловым электростанциям, поскольку обеспечивают стабильную генерацию без прямых выбросов CO₂ в атмосферу [1]. Согласно данным Международного энергетического агентства [2], атомные электростанции обеспечивают около 10 % мировой генерации электроэнергии, а в некоторых странах, таких как Франция, эта доля внутреннего производства атомной энергии достигает 75 % [3]. В России, по информации госкорпорации Росатом [4], доля АЭС в общем объеме генерации электроэнергии составляет около 20 %, достигая 30–37 % в европейской части страны, что подчеркивает значимость ядерной энергетики для энергосистемы и экономики в целом.

Россия активно развивает атомную энергетику в рамках долгосрочной стратегии [5], предусматривающей не только модернизацию существующих мощностей, но и строительство новых энергоблоков, включая инновационные проекты, такие как Курская АЭС-2 и плавучую АЭС «Академик Ломоносов». Однако расширение парка АЭС требует решения ряда экологических задач, связанных с их эксплуатацией, в частности — с использованием водоемов-охладителей. Эти водоемы играют ключевую роль в отводе избыточного тепла от энергетических установок, но их работа сопровождается термальным и химическим загрязнением. Сброс подогретых вод изменяет естественный гидрологический режим, воздействуя на живые организмы, а различные химические примеси снижают качество воды, накапливаются в донных отложениях, создавая долгосрочные риски для экосистем. Особую сложность представляют зимние условия, когда ледяной покров нарушает процессы перемешивания, что может приводить к локальному повышению концентрации загрязняющих веществ.

Современные методы контроля состояния водоемов-охладителей можно разделить на три основные группы. Это мониторинг характеристик водного объекта путем выполнения контактных измерений, методы удаленного зондирования и численное моделирование.

Мониторинг характеристик водного объекта путем выполнения контактных измерений представляет собой классический подход в гидрологии и гидрохимии, обеспечивающий получение репрезентативных и точных данных. В его рамках производится прямой отбор проб воды, донных отложений и проведение инструментальных замеров на заранее определенных створах с использованием специализированного оборудования (батометров, расходомеров, мультипараметровых зондов и т. д.). Данная методика позволяет с высокой достоверностью определять широкий спектр физико-химических показателей, таких как температура, растворенный кислород, содержание биогенных элементов и загрязняющих веществ. Несмотря на свои неоспоримые преимущества в виде точности, метод характеризуется существенными ограничениями, включая высокую трудоемкость, а также зачастую значительные финансовые затраты, что делает его малоприменимым для оперативного картирования обширных акваторий.

Сегодня космические снимки стали практически обязательным инструментом в исследованиях, связанных с водными объектами. Возможность дистанционной регистрации теплового излучения объектов земной поверхности делает тепловую космическую съемку ценным источником географической информации. Использование снимков высокого разрешения со спутников дает возможность детального изучения пространственных неоднородностей теплового следа сбросных вод на поверхности водоема. Повышение качества съемки, а также алгоритмов дешифрирования снимков позволяют получать качественную и достоверную информацию. Вместе с тем потенциал метода имеет существенные ограничения, обусловленные физическими принципами дистанционных измерений и влиянием внешней среды. Ключевым ограничением является принципиальная невозможность получения данных о вертикальной структуре водной толщи — информация ограничивается характеристиками поверхностного слоя. Кроме того, значительное влияние атмосферных помех, прежде всего облачности, приводит к нерегулярности поступления пригодных для анализа данных, что затрудняет проведение непрерывного мониторинга.

Интенсивное развитие вычислительных мощностей послужило катализатором подлинной революции в области математического моделирования. Это в полной мере относится к гидрологии и экологии, где численное моделирование утвердилось в качестве одного из наиболее перспективных направлений для комплексного изучения водных объектов и их динамичных экосистем. В контексте атомной энергетики значимость математического моделирования невозможно переоценить. Численные методы, основанные на системах уравнений гидродинамики, тепломассопереноса и переноса трассера, позволяют с высокой степенью достоверности диагностировать и прогнозировать пространственно-временное распределение тепла и химических примесей в акваториях водоемов-охладителей АЭС. Моделирование дает возможность охватить широкий спектр сценариев — от штатных режимов эксплуатации до гипотетических аварийных ситуаций, включая экстремальные природные воздействия. Кроме того, методы математического моделирования становятся незаменимыми на стадии проектирования новых объектов атомной энергетики и модернизации существующих, минимизируя риски и будущие затраты.

К неоспоримым достоинствам численных методов относятся их гибкость и сравнительная экономическая эффективность. Гибкость проявляется в возможности исследовать произвольное количество сценариев, варьируя исходные параметры и граничные условия, что часто недостижимо в условиях натурального эксперимента. Относительная дешевизна проведения расчетов по сравнению с масштабными натурными исследованиями делает глубокий и всесторонний анализ доступным.

Опыт безопасной работы современных АЭС, накопленный за десятилетия, и данные многочисленных экологических мониторингов свидетельствуют, что при штатной работе станций в пределах установленных нормативов радиационное воздействие на экосистемы является минимальным. Системы многоуровневой защиты, жесткое регулирование и постоянный контроль свели радиационные выбросы до уровней, значительно ниже природного фона. В то же время тепловое (через сброс подогретых вод) и химическое (выбросы нерадиоактивных веществ вследствие использования реагентов и т. д.) воздействия носят постоянный и более масштабный характер, формируя основную антропогенную нагрузку на прилегающие акватории. Эти выводы основаны на заключениях международных организаций — Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), Агентства по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР/АЯЭ), — а также на национальных отчетах по мониторингу и материалах по оценке воздействия на окружающую среду (ОВОС), где признается приоритет теплового и химического воздействия при нормальной эксплуатации АЭС.

Актуальность прогнозирования нерадиоактивного (теплового и химического) воздействия атомных электростанций на водные объекты напрямую связана с принципами устойчивого развития атомной энергетики, которое требует надежной оценки и минимизации экологических рисков. Постоянный сброс значительных объемов подогретых и потенциально химически загрязненных вод в водоемы-охладители представляет собой ключевой фактор антропогенной нагрузки, способный вызывать устойчивые изменения термического и гидрохимического режимов, что, в свою очередь, может приводить к трансформации водных экосистем и снижению экологической емкости акваторий. В этой связи математическое моделирование процессов формирования, переноса и рассеивания сбросных шлейфов становится незаменимым инструментом для прогнозной оценки последствий воздействия АЭС на водные объекты, оптимизации технологических решений и обоснования природоохранных мероприятий. Целью настоящей работы является проведение систематического анализа и обобщения результатов исследований за период 2013–2025 гг., посвященных математическому моделированию процессов нерадиоактивного загрязнения в водоемах-охладителях АЭС. В рамках обзора ставится задача выявления и классификации современных подходов и методов численного моделирования, применяемых для оценки теплового и химического воздействия, анализа определяющих это воздействие факторов, а также формулирования перспективных направлений развития модельного аппарата в данной научно-практической области.

Принципы отбора публикаций для анализа. Методология настоящего обзора основана на системном анализе современных подходов к численному моделированию гидротермических процессов в водоемах-охладителях АЭС. В рамках исследования проведен критический анализ рецензируемых научных работ, посвященных разработке, использованию и верификации трехмерных гидродинамических моделей, учитывающих специфику теплового воздействия атомных станций. Основное внимание уделено моделям, описывающим пространственно-временное распределение температурных полей и формирование зон тепловых шлейфов. Особый акцент сделан на работах, посвященных исследованиям на замерзающих водоемах-охладителях.

Для поиска публикаций были использованы научная электронная библиотека e-library¹ и поисковая система научных публикаций Google Scholar². Анализ выполнен на основе 20-ти публикаций в российских и зарубежных рецензируемых журналах за период 2016–2025 гг. Критерии отбора:

- применимость к водоемам, используемым в качестве водоемов-охладителей в цикле работы АЭС;
- наличие оригинальных результатов численного моделирования.

2. Применяемые модели и подходы: хронологическая эволюция

Анализ публикаций показывает, что методологической основой подавляющего большинства исследований остается численное решение системы уравнений гидродинамики с учетом переноса тепла и примесей. Наблюдаемая хронологическая эволюция проявляется не в смене парадигм, а в значительном расширении методологического арсенала, увеличении сложности и детализации моделей, а также в смещении фокуса от изучения исключительно физики переноса к комплексной оценке экологических последствий.

В качестве универсального физического каркаса используются трехмерные уравнения Навье-Стокса в гидростатическом приближении, дополненные уравнениями переноса тепла и соли, и, что характерно для более поздних работ, уравнениями переноса различных трассеров [6].

Для замыкания систем уравнений по-прежнему широко применяются двухпараметрические модели турбулентности, в частности, стандартная $k-\varepsilon$ модель и ее модификации [7, 8], а также модель $k-\omega$ [9], демонстрирующие устойчивую надежность для широкого класса инженерных задач.

Параллельно, в исследованиях, нацеленных на углубленное изучение тонкой структуры течений в зоне начального разбавления, находит применение модель крупных вихрей (LES), несмотря на сопряженные с ней высокие вычислительные затраты и необходимость тщательной калибровки [8].

Характерной чертой всего рассматриваемого периода является параллельное и взаимодополняющее использование подходов различной пространственной размерности. Выбор между двумерной (2D) и трехмерной (3D) постановкой определяется конкретными целями, стоящими перед исследователями. Двумерные модели в приближении «мелкой воды» сохраняют свою актуальность для быстрой оценки, долгосрочных сценариев и задач, где вертикальная стратификация не является определяющей, например, для первоначальной оценки площади поверхностного теплового влияния в реках и слабо стратифицированных водоемах [9–11]. Однако именно развитие и повсеместное внедрение трехмерного моделирования стало ключевым драйвером прогресса в области изучения плавучих струй. Только 3D-подход позволяет корректно описать фундаментальную физику плавучего теплового шлейфа: формирование термоклина, вертикальное распределение и перенос пассивных примесей в толще воды [6, 8, 12].

В этом контексте наиболее значимым трендом второй половины периода (примерно с 2020 г.) стало становление 3D бароклинного моделирования в качестве нового стандарта для комплексных исследований. Эти модели учитывают влияние на плотность воды не только температуры, но и солености, что критически важно для морских и эстуарных акваторий [6, 13]. Более того, произошел качественный переход от чисто термогидродинамических расчетов к интеграции термогидродинамических блоков с биогеохимическими модулями (например, экосистемная модель NPZD [14]) для прямой оценки воздействия на фито- и зоопланктон [10], а также с моделями переноса химических трассеров и радионуклидов [6; 12]. Таким образом, современные 3D-модели превратились в основу для прогнозирования многокомпонентного экологического воздействия.

Реализация этих сложных математических подходов опирается на широкий спектр программных комплексов. Исследователи активно используют как универсальные CFD (Computational Fluid Dynamics) пакеты, так и специально разработанные модельные комплексы для решения задач морской динамики. Коммерческие системы, такие как MIKE3 [15], которая применялась в работах [16, 17] и Delft3D-FLOW [18], которая использовалась для сравнительного анализа схем турбулентности [8], часто служат для расчетов на короткие сроки с высокой детализацией в сложных прибрежных зонах, поскольку требуют значительных ресурсов вычислительной техники. Для задач, требующих расчетов на долгие сроки и на больших акваториях, в которых не требуется получение столь же детального разрешения, востребованы специализированные морские модели, например, SCHISM [19], POM, ECOMSED [20] и STREAM-3D [21]. Эти модели нашли применение в работах [6, 12, 13, 22]. Более подробно последовательность развития подходов к моделированию в последнее десятилетие представлена в таблице.

¹ Научная электронная библиотека. URL: <https://elibrary.ru/> (дата обращения: 20.09.2025)

² Поисковая система научных публикаций. URL: <https://scholar.google.com/> (дата обращения: 25.09.2025)

Неизменно высокие требования к достоверности результатов моделирования привели к стандартизации и усложнению процедур верификации и валидации. Современные исследования опираются на комбинацию данных различного масштаба и природы. Это результаты лабораторных экспериментов и эталонных тестов [23], данные полевых измерений с помощью различных гидрометрических комплексов [24, 25], и, что особенно характерно для последнего десятилетия, — регулярное использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Спутниковые снимки, предоставляющие информацию о температуре поверхности воды и ледовой обстановке, стали незаменимым инструментом для калибровки моделей в масштабах всей акватории и валидации долгосрочных расчетов [13, 26, 27]. Подобная многоуровневая система проверки обеспечивает высокий уровень доверия к результатам моделирования [8].

Таблица
Table

Хронологическая последовательность развития подходов к моделированию в последнее десятилетие
Chronological sequence of the development of modeling approaches in the last decade

Период	Ключевые тенденции и технологические сдвиги	Характерные примеры из обзора
~2016–2019 гг.	Параллельное использование 2D и 3D моделей. Активное применение 2D-подходов для быстрых предварительных оценок. Развитие и валидация 3D-моделей для учета стратификации. Необходимость в большом количестве натурных данных для верификации	2D-моделирование речных сбросов [23]; анализ теплового рассеивания в озере с полевой верификацией [24]; применение 2D-модели для предварительной оценки воздействия АЭС во Вьетнаме [11]; разработка 3D-модели для глубоководного водохранилища [7]
~2020–2022 гг.	Развитие 3D моделирования бароклининой жидкости как стандарта. Учет влияния солёности на циркуляцию. Начало интеграции гидродинамики с экосистемными моделями. Массовое использование данных ДЗЗ для калибровки моделей	Исследование влияния географии на распространение сбросов с учетом бароклинности [28]; моделирование экосистемного отклика залива на тепловые сбросы [10]; комплексное моделирование Белоярского водохранилища с валидацией по спутниковым данным [27]
~2023–2025 гг.	Доминирование комплексного 3D моделирования. Интеграция переноса тепла, соли, биогенов и специфических загрязнителей (химические примеси). Использование моделей с неструктурированными сетками высокого разрешения. Сравнительный анализ модельных алгоритмов (турбулентность, теплообмен)	Долгосрочное моделирование рассеивания трассера в заливе с помощью SCHISM [6]; детальное 3D-моделирование залива Даявань [13]; исследование влияния угла водовыпуска с применением MIKE3 [17]; сравнительный анализ модулей теплопереноса в MIKE [16]; оценка совместного теплового и химического воздействия [12]

3. Ключевые аспекты моделирования: от физических факторов до практического применения

3.1. Детерминанты распространения теплового шлейфа

Моделирование процессов рассеивания тепловых сбросов АЭС основывается на учете комплекса взаимосвязанных физических и технологических факторов, формирующих уникальную картину теплового шлейфа для каждого конкретного случая. Ключевыми внешними детерминантами выступают гидрометеорологические условия. На перенос и трансформацию шлейфа в краткосрочной перспективе решающее влияние оказывает ветер: его скорость и направление определяют дрейф нагретого поверхностного слоя, деформируя шлейф и изменяя площадь его распространения, что подтверждается как натурными наблюдениями, так и модельными расчетами [9, 24]. В прибрежных морских акваториях доминирующую роль в долгосрочной динамике играют приливные явления. Исследования демонстрируют, что режим приливов — будь то реверсивные течения в защищенных бухтах или вращательные в открытом море — задает основную ось распространения тепла, влияя на дальность переноса и конфигурацию зон повышенной температуры [13, 28]. При этом на разной фазе приливного цикла (сизигийный или квадратурный прилив) масштабы и направленность теплового воздействия могут существенно различаться [13, 17].

Не менее важным, а часто и определяющим, фактором является морфометрия самого водоема-охладителя. Топография дна (батиметрия) и конфигурация береговой линии формируют поле течений, создают зоны рециркуляции и застойные области, которые могут способствовать аккумуляции тепла [23]. Сравнительные исследования показывают фундаментальные различия в поведении теплового шлейфа в глубоких стратифицированных водохранилищах, где влияние сброса может быть локализовано у поверхности [7], в мелководных озерах [24], в полузамкнутых заливах с ограниченным водообменом [10], а также в открытых акваториях с активной динамикой [28]. От типа водоема напрямую зависит способность акватории к ассимиляции тепловой нагрузки без критических последствий для экосистемы.

К управляемым параметрам, представляющим практический интерес для инженерной оптимизации, относятся характеристики самого сброса. Модельные эксперименты доказывают, что угол наклона выпускного устройства относительно основного течения или береговой линии является мощным инструментом управления шлейфом. Так, например, изменение угла водовыпуска может обеспечить наилучший компромисс между эффективным разбавлением и минимизацией площади значительного теплового воздействия [17]. Исходные расход и температура сбрасываемой воды задают начальный тепловой импульс и плотностные характеристики струи, от которых в конечном итоге зависят максимальная площадь изотермических зон и градиенты температур вблизи выпуска [7, 23]. Таким образом, распространение шлейфа представляет собой результат нелинейного взаимодействия управляемых технологических параметров с неуправляемыми, но поддающимися прогнозированию с помощью моделей, природными условиями.

3.2. Анализ воздействия и инженерная оптимизация

Установление взаимосвязей между факторами и процессами распространения является основой для следующего ключевого этапа — количественной оценки воздействия на водоем и разработки мер по его снижению. Современные численные модели позволяют проводить детальный анализ изменений термического режима водоема-охладителя, прогнозируя не только пространственное распределение аномалий температуры, но и их сезонную динамику. Особое внимание уделяется моделированию влияния на ледовый покров, поскольку образование обширных полыней в зимний период и сдвиги сроков ледостава и ледохода являются одними из наиболее значимых визуальных и экологических последствий теплового сброса [9, 29]. Эти прогнозы служат прямой основой для инженерной оптимизации.

Наиболее изученным и широко применяемым пассивным методом является проектирование и оценка эффективности отводящих каналов и струенаправляющих дамб. Моделирование подтверждает, что такие сооружения, увеличивая длину и время пути воды от точки сброса до водозабора, способствуют ее естественному охлаждению и значительному снижению температуры на входе в систему охлаждения станции [9, 22]. В случаях, когда гидродинамическая емкость водоема оказывается недостаточной, моделирование обосновывает необходимость более радикальных технологических решений. К ним относится переход с прямоточной системы охлаждения на использование градиен, что кардинально сокращает тепловую нагрузку на водоем, или замена энергоблоков на более современные (например, реакторы ВВЭР вместо РБМК), которые характеризуются значительно меньшим удельным тепловыделением в сбросных водах [12, 27].

Важнейшим прикладным результатом моделирования в этой сфере является разработка методик и выполнение расчетов по определению предельно допустимой тепловой нагрузки (ПДТН) на конкретный водоем. Такие расчеты, учитывающие его гидродинамические и термические характеристики, позволяют установить научно обоснованные лимиты сброса, предотвращающие необратимый перегрев и деградацию экосистемы [27].

3.3. Комплексное моделирование экологических последствий

Современный этап развития подхода характеризуется преодолением узкой инженерно-физической направленности и активной интеграцией гидродинамических моделей с инструментами экологического прогнозирования. Это позволяет перейти от анализа физических параметров шлейфа к прямой оценке его биологических и биохимических последствий. Наиболее продвинутым направлением является связывание расчетных полей температуры, солености и течений с биогеохимическими моделями морских и пресноводных экосистем, такими как NPZD (Nutrients, Phytoplankton, Zooplankton, Detritus). Подобная интеграция дает возможность количественно оценить, как тепловой сброс влияет на рост фитопланктона, динамику зоопланктона, сезонные «цветения» воды и процессы эвтрофикации, предоставляя тем самым прогноз изменений на уровне экосистемы [10].

Параллельно развивается направление совместного моделирования теплового и химического загрязнения, когда в составе сбросных вод учитываются специфические химические примеси (например, биоциды, продукты коррозии), и оценивается их совместное с теплом воздействие на качество воды [12]. Особую актуальность, особенно в контексте эксплуатации АЭС, приобретает задача долгосрочного прогноза рассеивания и возможного накопления консервативных или долгоживущих трассеров, например, ряда металлов из коррозионных продуктов, поступающих со стоками (никель, хром, цинк, железо, кобальт). Применение для этой цели трехмерных бароклинических моделей высокого разрешения, способных воспроизводить слож-

ную циркуляцию в слабопромываемых заливах, позволяет оценить потенциал кумулятивного накопления таких веществ в воде, донных отложениях и биоте, что критически важно для оценки долгосрочных экологических рисков [6].

3.4. Региональные исследования на конкретных примерах

Практическая значимость, адаптивность и эффективность рассмотренных методов и подходов наглядно подтверждается их широким применением в многочисленных региональных исследованиях по всему миру, охватывающих разнообразные климатические и гидрологические условия. Моделирование активно используется для анализа воздействия на внутренние континентальные водоемы, такие как озеро Балхаш в Казахстане, где оценивались перспективы строительства АЭС [9], Белоярское водохранилище в России, для которого выполнены детальные расчеты влияния действующих и проектируемых энергоблоков [26, 27] и проект АЭС «Ханхикиви-1» [29].

Довольно обширный опыт накоплен в Китае, где бурное развитие прибрежной атомной энергетики стимулировало проведение масштабных исследовательских программ. Здесь проводятся детальные трехмерные моделирования в заливах Даявань [13] и Лююань [25], сравнительные исследования для электростанций, расположенных в принципиально разных географических условиях (открытое море и защищенная бухта) [28], а также работы по оптимизации конструктивных параметров сбросных устройств [17].

Аналогичные комплексные исследования выполняются и в других регионах мира: в акватории Мексиканского залива для АЭС «Лагуна-Верде» [8], в Персидском заливе для недавно введенной АЭС «Баракка» в ОАЭ [6], в Финском заливе для оценки модернизации Ленинградской АЭС [12], а также для оценки потенциального воздействия проектируемой АЭС «Ханхикиви-1» [29] на побережье Ботнического залива Балтийского моря. Это разнообразие ситуаций демонстрирует универсальность методологии численного моделирования и ее способность предоставлять научно обоснованные ответы на конкретные прикладные вопросы в различных природных и технологических контекстах.

Работы исследователей Санкт-Петербургского филиала ИО РАН, представленные в статьях [12, 27], отличаются от большинства исследований в данной области формированием целостного прогнозного контура оценки воздействия АЭС, который выходит за рамки чисто гидродинамического моделирования и интегрируется в инженерно-экологическую практику. Их подход основан на создании каскада взаимосвязанных и верифицированных моделей — от общей циркуляции водоема до детального учета технологических каналов и ледового режима, — что позволяет перейти к количественным, нормативно обоснованным прогнозам.

Особенностью методологии является системное применение сценарного сравнительного анализа, направленного не только на оценку текущего или будущего воздействия, но и на обоснование конкретных технологических решений. Так, в случае с ЛАЭС моделирование позволило количественно доказать значительное снижение тепловой и химической нагрузки при вводе новых энергоблоков с реакторами ВВЭР и выводе из эксплуатации старых блоков с РБМК, а для Белоярской АЭС — определить предельную емкость водоема-охладителя и обосновать необходимость перехода на систему с градирнями для нового энергоблока. Таким образом, эти исследования служат прямым связующим звеном между фундаментальной гидрофизикой и практическими задачами проектирования, экологической экспертизы и оптимизации эксплуатации атомных станций, обеспечивая научную базу для управленческих решений в области экологической безопасности.

4. Заключение

Проведенный анализ исследований за период 2016–2025 гг. позволяет сформулировать ряд ключевых выводов о современном состоянии и тенденциях в области моделирования нерадиоактивного загрязнения водоемов-охладителей АЭС.

Основные тенденции последнего десятилетия четко обозначили вектор развития методологии. Во-первых, произошло окончательное утверждение трехмерного моделирования с учетом бароклинности жидкости и высоким пространственным разрешением в качестве «золотого стандарта» для фундаментальных и прикладных исследований. Этот подход, учитывающий влияние на циркуляцию градиентов плотности, вызванных температурой и соленостью, позволяет с максимальной достоверностью воспроизводить сложную пространственную структуру теплового шлейфа, включая стратификацию и придонные процессы. Во-вторых, значительно выросли требования и стандарты верификации и валидации моделей, при этом данные дистанционного зондирования Земли превратились в обязательный и незаменимый инструмент.

Спутниковый мониторинг температуры поверхности воды и ледовой обстановки обеспечивает калибровку и оценку адекватности моделей в масштабах всей акватории. В-третьих, намечился явный переход от чисто физических расчетов к комплексной оценке экологического воздействия. Интеграция гидродинамических ядер с биогеохимическими модулями позволяет перейти от моделирования распространения теплового пятна к моделированию последствий для экосистемы, что в полной мере соответствует принципам комплексной экологической оценки.

Несмотря на значительный прогресс, сохраняется ряд проблем и методологических ограничений. Результаты моделирования остаются чувствительными к выбору параметризаций ключевых физических процессов. Это, в первую очередь, касается выбора модели турбулентности для замыкания уравнений гидродинамики и, что особенно критично, алгоритмов расчета теплообмена на границе раздела вода-атмосфера. Сравнительные исследования показывают, что различные подходы могут давать существенно различающиеся оценки площади теплового воздействия [8, 16]. Также острой остается проблема обеспечения баланса между детализацией модели, учитывающей локальные особенности, и вычислительными затратами, необходимыми для долгосрочных и региональных расчетов.

В связи с выявленными тенденциями и проблемами можно обозначить следующие перспективные направления исследований:

1. Включение обратных связей с атмосферными процессами. Для повышения точности моделей, особенно в прибрежных зонах со сложной ветровой циркуляцией, требуется использование атмосферных моделей более высокого разрешения или создание полностью связанных модельных комплексов океан-атмосфера. Это позволит более реалистично учитывать форсирующее воздействие на гидродинамику водоема.

2. Развитие моделей взаимодействия с донными отложениями. Для оценки долгосрочной судьбы загрязняющих веществ (особенно тяжелых металлов) необходимо развитие и внедрение модулей, описывающих сорбцию-десорбцию, а также седиментацию и повторное вовлечение в циркуляцию загрязнителей в системе «вода-донные осадки». Это критически важно для прогноза вторичного загрязнения и оценки общих рисков.

3. Интеграция с моделями экологического риска. Следующим логическим шагом является переход от оценки изменений абиотических параметров и состояния экосистемы в целом к прямому прогнозу рисков для конкретных видов и популяций гидробионтов. Интеграция с моделями, учитывающими толерантность организмов к температуре и токсинам, их миграционное поведение и жизненные циклы, позволит давать более адресные рекомендации по охране биоразнообразия.

4. Создание детальных прогнозов для экстремальных сценариев. В условиях меняющегося климата возрастает важность моделирования воздействия в периоды экстремальных гидрометеорологических явлений: аномальной жары, засух, штормовых нагонов, маловодья. Такие прогнозы необходимы для оценки устойчивости как самой АЭС (риск перегрева водозабора), так и экосистемы водоема к стрессовым нагрузкам.

5. Активное применение моделей на прединвестиционных этапах. Математическое моделирование должно активнее использоваться не только для оценки существующих объектов, но и как инструмент оптимизации на стадии выбора площадки и концептуального проектирования новых АЭС. Это позволит заранее, на основе сравнительного моделирования различных вариантов, выбирать расположение, конфигурацию сбросных и водозаборных сооружений, минимизирующее потенциальное экологическое воздействие.

Таким образом, дальнейшее развитие области будет определяться движением в сторону создания высоко детализированных, многокомпонентных и связанных модельных систем, способных предоставлять не только описательный, но и прогнозно-превентивный инструмент для обеспечения экологической безопасности атомной энергетики.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0028).

Funding

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for IO RAS (theme No. FMWE-2024-0028).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Литература

1. Nuclear Power in a Clean Energy System. International Energy Agency. 2019. URL: <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-in-a-clean-energy-system> (дата обращения: 12.02.2025).
2. World Energy Outlook 2023. International Energy Agency. 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023> (дата обращения: 22.11.2025).
3. France — Energy Mix. International Energy Agency. 2023. URL: <https://www.iea.org/countries/france/energy-mix> (дата обращения: 12.02.2025).
4. Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». Атомная генерация. 2025. URL: https://www.rosatom.ru/production/generation/index.php?sphrase_id=6606620 (дата обращения: 22.11.2025).
5. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523-р. URL: <http://government.ru/docs/all/128340/> (дата обращения: 09.12.2025).
6. Nesterov O., Addad Y., Bilal S., et al. A numerical assessment of the dispersion of dissolved pollutants in the Arabian Gulf associated with the Barakah nuclear power plant // Ocean Modelling. 2023. Vol. 186, 102274. EDN BDZJWV. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2023.102274>
7. Wang S., Chen F., Zhang W. Numerical investigation of temperature distribution of thermal discharge in a river-type reservoir. // Polish Journal of Environmental Studies. 2019. Vol. 28, Iss. 5. P. 3909–3917. EDN OSCKCJ. <https://doi.org/10.15244/pjoes/99238>
8. Laguna-Zarate L., Barrios-Piña H., Ramírez-León H., et al. Analysis of thermal plume dispersion into the sea by remote sensing and numerical modeling // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. T. 9, № 12, 1437. EDN LHLUYK. <https://doi.org/10.3390/jmse9121437>
9. Issakhov A., Mustafayeva A. Numerical simulation of the thermal pollution zones formation from the power plant for different weather conditions // International Journal of Environmental Science and Technology. 2022. T. 19, № 12. C. 12249–12278. EDN ONBPLQ. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-03935-0>
10. Jiang R., Wang Y.S. Modeling the ecosystem response of the semi-closed Daya Bay to the thermal discharge from two nearby nuclear power plants // Ecotoxicology. 2020. Vol. 29. P. 736–750. EDN BHEPHV. <https://doi.org/10.1007/s10646-020-02229-w>
11. Hai T.H., Tri D.Q. Modeling the effect of thermal diffusion process from nuclear power plants in Vietnam // Energy and Power Engineering. 2017. Vol. 9. P. 403–418. <https://doi.org/10.4236/epe.2017.98027>
12. Dvornikov A. Yu., Ryabchenko V.A., Isaev A.V., et al. Assessment of the impact of thermal and chemical loading on the Koporye Bay of the Gulf of Finland with the full commissioning of the Leningrad Nuclear Power Plant-2 // Environmental Modeling & Assessment. 2025. EDN MVGFQH. <https://doi.org/10.1007/s10666-025-10062-w>
13. Geng B., Lu L., Cao Q., et al. Three-dimensional numerical study of cooling water discharge of Daya Bay Nuclear Power Plant in southern coast of China during summer // Frontiers in Marine Science. 2023. Vol. 9. 1012260. EDN LMTWZD. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1012260>
14. Heinle A., Slawig T. Internal dynamics of NPZD type ecosystem models // Ecological Modelling. 2013. Vol. 254. P. 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.01.012>
15. MIKE3 Powered by DHI. DHI Group. URL: <https://www.dhigroup.com/technologies/mikepoweredbydhi> (дата обращения: 22.12.2024).
16. Zhang X., Shi H., Zhan C., et al. Numerical simulation calculation of thermal discharge water diffusion in coastal nuclear power plants // Atmosphere. 2023. Vol. 14, Iss. 9. 1371. EDN LZXIAK. <https://doi.org/10.3390/atmos14091371>
17. Li L., Shi H., Xue H., et al. Numerical investigation of jet angle effects on thermal dispersion characteristics in coastal waters. // Journal of Marine Science and Engineering. 2025. Vol. 13, Iss. 5. 931. EDN MOCHBA. <https://doi.org/10.3390/jmse13050931>
18. Delft3D-FLOW: User Manual. Deltares. URL: <https://oss.deltares.nl/web/delft3d> (дата обращения: 12.02.2025).
19. Zhang Y.J., Ye F., Stanev E.V., et al. Seamless cross-scale modelling with SCHISM // Ocean Modelling. 2016. Vol. 102. P. 64–81. EDN WVDZCV. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.05.002>
20. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. // Three-Dimensional Coastal Ocean Models. 1987. P. 1–16. <https://doi.org/10.1029/CO004p0001>
21. Беликов В.В., Румянцев А.Б., Кочетков В.В. Программный комплекс STREAM_3D. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014612186. 2014.
22. Беликов В.В., Румянцев А.Б., Кочетков В.В. и др. Исследование вариантов оптимизации температурных режимов охладительных прудов АЭС численными методами. // Энергомашиностроение. 2018. Т. 51, № 6. С. 653–659. EDN PBFZBC. <https://doi.org/10.1007/s10749-018-0887-3>

23. Issakhov A., Zhandaulet Y. Numerical simulation of thermal pollution zones' formations in the water environment from the activities of the power plant // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2019. Vol. 13, Iss. 1. P. 279–299. EDN WUJSVM. <https://doi.org/10.1080/19942060.2019.1584126>
24. Shah V., Dekhatwala A., Banerjee J., et al. Analysis of dispersion of heated effluent from power plant: a case study // Sādhanā. 2017. Vol. 42. P. 557–574. EDN DESOFQ. <https://doi.org/10.1007/s12046-017-0625-9>
25. Zeng Z., Luo Y., Chen Z., et al. Impact assessment of thermal discharge from the Kemen Power Plant based on field observation and numerical simulation // Journal of Coastal Research. 2020. Vol. 104(sp1). P. 351–361. EDN PIHEWX. <https://doi.org/10.2112/JCR-SI104-064.1>
26. Вережагина Т.А., Аверьянов С.Я., Извеков И.Я. и др. К вопросу об оценке возможного изменения ледового режима Белоярского водохранилища в связи со строительством нового энергоблока Белоярской АЭС // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. Т. 5. С. 93–104.
27. Nikulenkova A.M., Makarova M.V., Vlasova V.V., et al. Assessment of allowable thermal load for a river reservoir subject to multi-source thermal discharge from operating and designed Beloyarsk NPP Units. // Environmental Modeling & Assessment. 2017. Vol. 22, Iss. 6. P. 609–623. EDN XNDMDV. <https://doi.org/10.1007/s10666-017-9562-6>
28. Chen Z., Li Y., Wang H., et al. Comparative study on the diffusion of thermal discharge from coastal power plants in different geographical environments // Journal of Marine Science and Engineering. 2025. Vol. 13, Iss. 2. 383. EDN HBASLL. <https://doi.org/10.3390/jmse13020383>
29. Dvornikov A.Y., Martyanov S.D., Ryabchenko V.A., et al. Assessment of extreme hydrological conditions in the Bothnian Bay and the impact of the nuclear power plant Hanhikivi-1 on the local thermal regime // Earth System Dynamics. 2017. Vol. 8. P. 265–282. EDN YVJFZP. <https://doi.org/10.5194/esd-8-265-2017>

References

1. Nuclear Power in a Clean Energy System. International Energy Agency. 2019. URL: <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-in-a-clean-energy-system> (date of access: 12.02.2025).
2. World Energy Outlook 2023. International Energy Agency. 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023> (date of access: 22.11.2025).
3. France — Energy Mix. International Energy Agency. 2023. URL: <https://www.iea.org/countries/france/energy-mix> (date of access: 12.02.2025).
4. Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». Атомная генерация. 2025. URL: https://www.rosatom.ru/production/generation/index.php?sphrase_id=6606620 (date of access: 22.11.2025).
5. Government of the Russian Federation. Decree of the Government of the Russian Federation No. 1523-r of June 09, 2020 “On approval of the Energy Strategy of the Russian Federation for the period until 2035”. 2020. URL: <http://government.ru/docs/all/128340/> (date of access: 09.12.2025).
6. Nesterov O., Addad Y., Bilal S., et al. A numerical assessment of the dispersion of dissolved pollutants in the Arabian Gulf associated with the Barakah nuclear power plant. Ocean Modelling. 2023;186:102274. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2023.102274>
7. Wang S, Chen F, Zhang W. Numerical investigation of temperature distribution of thermal discharge in a river-type reservoir. Polish Journal of Environmental Studies. 2019;28(5):3909–3917. <https://doi.org/10.15244/pjoes/99238>
8. Laguna-Zarate L, Barrios-Piña H, Ramírez-León H., et al. Analysis of thermal plume dispersion into the sea by remote sensing and numerical modeling. Journal of Marine Science and Engineering. 2021;9(12):1437. <https://doi.org/10.3390/jmse9121437>
9. Issakhov A, Mustafayeva A. Numerical simulation of the thermal pollution zones formation from the power plant for different weather conditions. International Journal of Environmental Science and Technology. 2022;19(12):12249–12278. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-03935-0>
10. Jiang R, Wang YS. Modeling the ecosystem response of the semi-closed Daya Bay to the thermal discharge from two nearby nuclear power plants. Ecotoxicology. 2020;29:736–750. <https://doi.org/10.1007/s10646-020-02229-w>
11. Hai TH, Tri DQ. Modeling the effect of thermal diffusion process from nuclear power plants in Vietnam. Energy and Power Engineering. 2017;9:403–418. <https://doi.org/10.4236/epe.2017.98027>
12. Dvornikov AYu, Ryabchenko VA, Isaev AV, et al. Assessment of the impact of thermal and chemical loading on the Koporye Bay of the Gulf of Finland with the full commissioning of the Leningrad Nuclear Power Plant-2. Environmental Modeling & Assessment. 2025. <https://doi.org/10.1007/s10666-025-10062-w>
13. Geng B, Lu L, Cao Q, et al. Three-dimensional numerical study of cooling water discharge of Daya Bay Nuclear Power Plant in southern coast of China during summer. Frontiers in Marine Science. 2023;9:1012260. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1012260>
14. Heinle A, Slawig T. Internal dynamics of NPZD type ecosystem models. Ecological Modelling. 2013;254:33–42. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.01.012>

15. MIKE3 Powered by DHI. DHI Group. URL: <https://www.dhigroup.com/technologies/mikepoweredbydhi> (date of access: 22.12.2024).
16. Zhang X, Shi H, Zhan C, et al. Numerical simulation calculation of thermal discharge water diffusion in coastal nuclear power plants. *Atmosphere*. 2023;14(9):1371. <https://doi.org/10.3390/atmos14091371>
17. Li L, Shi H, Xue H, et al. Numerical investigation of jet angle effects on thermal dispersion characteristics in coastal waters. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025;13(5):931. <https://doi.org/10.3390/jmse13050931>
18. Delft3D-FLOW: User Manual. Deltares. URL: <https://oss.deltares.nl/web/delft3d> (date of access: 12.02.2025).
19. Zhang YJ, Ye F, Stanev EV, et al. Seamless cross-scale modelling with SCHISM. *Ocean Modelling*. 2016;102:64–81. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.05.002>
20. Blumberg AF, Mellor GL. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*. 1987;1–16. <https://doi.org/10.1029/CO004p0001>
21. Belikov VV, Rumyantsev AB, Kochetkov VV. Software package for calculating hydrothermal regimes and pollutant transport in watercourses, reservoirs and on the shelf (STREAM_3D). Certificate of official registration of a computer program No. 2014612186. 2014. (In Russ.).
22. Belikov VV, Rumyantsev AB, Norin S.V. Investigation of options for optimizing the temperature regimes of nuclear power plant cooling ponds by numerical methods. *Power Technology and Engineering*. 2018;51(6):653–659. <https://doi.org/10.1007/s10749-018-0887-3>
23. Issakhov A, Zhandaulov Y. Numerical simulation of thermal pollution zones' formations in the water environment from the activities of the power plant. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2019;13(1):279–299. <https://doi.org/10.1080/19942060.2019.1584126>
24. Shah V, Dekhatwala A, Banerjee J, et al. Analysis of dispersion of heated effluent from power plant: a case study. *Sādhanā*. 2017;42:557–574. <https://doi.org/10.1007/s12046-017-0625-9>
25. Zeng Z, Luo Y, Chen Z, et al. Impact assessment of thermal discharge from the Kemen Power Plant based on field observation and numerical simulation. *Journal of Coastal Research*. 2020;104(sp1):351–361. <https://doi.org/10.2112/JCR-SI104-064.1>
26. Vereshchagina TA, Averyanov SY, Izvekov IY, Sudakova AN. On the assessment of possible changes in the ice regime of the Beloyarsk Reservoir in connection with the construction of a new power unit at the Beloyarsk NPP. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2013;5(5):93–104. (In Russ.).
27. Nikulenkova AM, Makarova MV, Vlasova VV, et al. Assessment of allowable thermal load for a river reservoir subject to multi-source thermal discharge from operating and designed Beloyarsk NPP Units. *Environmental Modeling & Assessment*. 2017;22(6):609–623. <https://doi.org/10.1007/s10666-017-9562-6>
28. Chen Z, Li Y, Wang H, et al. Comparative study on the diffusion of thermal discharge from coastal power plants in different geographical environments. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025;13(2):383. <https://doi.org/10.3390/jmse13020383>
29. Dvornikov AY, Martyanov SD, Ryabchenko VA, et al. Assessment of extreme hydrological conditions in the Bothnian Bay and the impact of the nuclear power plant Hanhikivi-1 on the local thermal regime. *Earth System Dynamics*. 2017;8:265–282. <https://doi.org/10.5194/esd-8-265-2017>

Об авторах

ДВОРНИКОВ Антон Юрьевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник СПбФ ИО РАН, ORCID: 0000-0002-9334-3138, Scopus AuthorID: 7006072591,

WoS ResearcherID: B-5971-2017, SPIN-код (РИНЦ): 6863-5988, e-mail: dvornikov.ayu@spb.ocean.ru

ГОРЧАКОВ Виктор Анатольевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник СПбФ ИО РАН, ORCID: 0009-0003-3270-4539, Scopus AuthorID: 36892327800, AuthorID: 70653,

e-mail: vikfioran@yandex.ru

ЛОЗА Светлана Николаевна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник СПбФ ИО РАН, ORCID: 0000-0003-2153-1954, Scopus AuthorID: 6602226066, WoS ResearcherID: E-3099-2019, AuthorID: 13821, e-mail: svetlana.loza@awi.de