

## ИССЛЕДОВАНИЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ В РАМКАХ МЕЖДУНАРОДНОГО ПРОЕКТА “THE CASPIAN SEA DIGITAL TWIN”

А. Г. Костяной<sup>1, 2, 3</sup>

<sup>1</sup>*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,  
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36;*

<sup>2</sup>*Московский университет им. С. Ю. Витте,  
Россия, 115432, Москва, 2-й Кожуховский проезд, д. 12, стр. 1;*

<sup>3</sup>*Майкопский государственный технологический университет,  
Россия, Республика Адыгея, Майкоп, ул. Первомайская, д. 191,  
e-mail: [Kostianoy@gmail.com](mailto:Kostianoy@gmail.com)*

В статье приводится краткий обзор результатов исследований Каспийского моря за 2022–2023 гг., выполненных в рамках Международного проекта “The Caspian Sea Digital Twin” (Цифровой двойник Каспийского моря), поддержанного МОК ЮНЕСКО и выполняемого в рамках мероприятий, связанных с Десятилетием науки об океане в интересах устойчивого развития (2021–2030) ООН. Поставленные в проекте задачи имеют большое научное, социально-экономическое и образовательное значение как для Российской Федерации, так и для всех других прикаспийских государств. Выполнение этого Проекта с участием представителей многих стран и заинтересованных сторон чрезвычайно важно после подписания 12 августа 2018 г. главами всех пяти прикаспийских государств Конвенции о правовом статусе Каспийского моря. Проект внесет большой вклад в развитие многостороннего сотрудничества в регионе.

**Ключевые слова:** Каспийское море, МОК ЮНЕСКО, ООН, Десятилетие науки об океане в интересах устойчивого развития, цифровой двойник, спутниковые данные, океанографические данные, гидрометеорологические данные, гидродинамические модели, атмосферные реанализы, региональное изменение климата, электронные атласы, электронная библиотека

### Введение

В декабре 2017 г. Организация Объединенных Наций провозгласила Десятилетие науки об океане в интересах устойчивого развития (2021–2030 гг.) (UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021–2030), <https://en.unesco.org/ocean-decade>). По поручению Генеральной Ассамблеи ООН Межправительственная океанографическая комиссия (МОК) ЮНЕСКО занималась процессом подготовки к Десятилетию, приглашая научное сообщество составить план работ на следующие десять лет в области океанологической науки и технологий.

Согласно проекту Плана реализации Десятилетия, подготовленного Секретариатом МОК в консультациях с широким кругом научной общественности, представителей бизнеса, государствами-членами (<https://www.oceandecade.org/resource/108/>

*Version-20-of-the-Ocean-Decade-Implementation-Plan-),* стратегическая цель Десятилетия, посвященного науке об океане, – «Актуализация научных знаний в интересах океана, который нам нужен». Главная задача Десятилетия – «Принятие в сфере морской науки решений в интересах устойчивого развития, способных вызвать изменения и сблизить человека с океаном». Общие задачи Десятилетия сформулированы следующим образом (UNESCO-IOC, 2021; Шаповалов, 2023):

*“Общая задача 1: «Определение знаний, необходимых для устойчивого развития, и укрепление потенциала морской науки по предоставлению требуемых данных и информации о морской среде».*

*Общая задача 2: «Наращивание потенциала, накопление исчерпывающих знаний и формирование всеобъемлющего представления о Мировом океане, в том числе о взаимовлиянии человек–океан, океан–атмосфера, океан–криосфера, суша–море».*

*Общая задача 3: «Расширение применения полученных знаний и представлений об океане, а также повышение способности морской науки содействовать реализации решений в области устойчивого развития»”.*

Проведение Десятилетия науки об океане должно способствовать накоплению информации, знаний и данных, необходимых для перехода от «океана, который мы имеем», к «океану, который нам нужен». В семи сформулированных ниже ожидаемых результатах (Ocean Decade Outcomes) кратко описано состояние «океана, который нам нужен» на момент завершения Десятилетия в 2030 г. (UNESCO-IOC, 2021; Шаповалов, 2023):

«1. Чистый океан с выявляемыми, купируемыми, либо устраняемыми, источниками загрязнения.

2. Экологически благополучный и жизнеспособный океан с изученными, восстановленными, охраняемыми и разумно используемыми морскими экосистемами.

3. Продуктивный океан, способствующий устойчивому обеспечению продовольствием и стабильному развитию морского хозяйства.

4. Предсказуемый океан с обществом, которое осведомлено о происходящих в его состоянии изменениях и способно на них реагировать.

5. Безопасный океан, рядом с которым жизнь людей и источники их дохода защищены от связанных с морской стихией бедствий.

6. Доступный океан, предполагающий открытый и равный доступ к данным, информации, технологиям и инновационным разработкам.

7. Вдохновляющий и влекущий к себе океан, понимаемый и ценимый обществом в качестве источника благосостояния человека и фактора устойчивого развития».

В октябре 2020 г. МОК опубликовала 1-й Запрос (<https://oceandecade.org/news/75/Call-for-Decade-Actions-No-012020->), в котором предлагалось представить свои предложения по проведению Десятилетия, ориентированные на реальные изменения и способствующие достижению стратегической цели Десятилетия. Одной из форм предложений является «Программа», которая должна быть глобальной или региональной по охвату инициативой, направленной на решение одной или нескольких приоритетных задач Десятилетия. Программа должна иметь долгосрочный, многолетний,

междисциплинарный и международный характер и объединять ряд входящих в нее проектов, и может включать вспомогательные мероприятия. Срок подачи предложений в МОК был определен как 15 января 2021 г.

5 ноября 2020 г. в Минобрнауки России состоялось заседание Межведомственной национальной океанографической комиссии Российской Федерации (МНОК), на котором были утверждены темы 9 потенциальных заявок на программы и координаторы по их разработке, одна из которых была посвящена Каспийскому морю.

Консультации с Секретариатом МОК показали, что конечной целью Программы должно быть не проведение очередных исследований, а создание некоторого продукта, системы или службы, которая предоставляла бы данные в открытый доступ и была бы удобной для непрофессиональных пользователей, от студентов до лиц, принимающих решения. Кроме того, в документах МОК сказано, что предлагаемые Программы должны быть сфокусированы на одной или нескольких приоритетных задачах (Ocean Decade Challenges) (UNESCO-IOC, 2021; Шаповалов, 2023):

*«1. Понимание характера и учет наземных и морских источников вредных выбросов и загрязнений и их потенциального воздействия на здоровье человека и состояние морских экосистем, а также выработка решений, направленных на их купирование или устранение.*

*2. Понимание множественных факторов стрессогенного воздействия на морские экосистемы и выработка решений, направленных на сохранение, мониторинг состояния, рациональное использование и восстановление экосистем и их биологического разнообразия в меняющихся экологических, социальных и климатических условиях.*

*3. Накопление знаний, поощрение инноваций и выработка решений, направленных на содействие максимально эффективному выполнению океаном функции устойчивого источника продовольственного обеспечения населения планеты в меняющихся экологических, социальных и климатических условиях.*

*4. Накопление знаний, поощрение инноваций и выработка решений, направленных на содействие сбалансированному и устойчивому развитию морского хозяйства в меняющихся экологических, социальных и климатических условиях.*

*5. Углубление понимания взаимосвязи между океаном и климатом и использование этого понимания для выработки решений, направленных на смягчение последствий изменения климата, адаптацию и повышение устойчивости к ним, а также на совершенствование океанографического обслуживания, включая повышение точности прогнозов и предсказаний в отношении погоды, климата и состояния океана.*

*6. Охват комплексными системами предупреждения о различных угрозах всех связанных с океаном опасных явлений биологического, геофизического, погодного и климатического характера и уделение первостепенного внимания повышению готовности и устойчивости жизнедеятельности населения.*

*7. Обеспечение устойчивого функционирования системы океанографических наблюдений, способной генерировать доступные для всех пользователей актуальные данные и информацию о состоянии морской среды во всех океанических бассейнах.*

8. Создание полноценной цифровой модели Мирового океана, включая динамическую карту океанов, на основе многостороннего сотрудничества заинтересованных сторон с обеспечением неограниченной и беспрепятственной возможности изучения, выяснения и наглядного представления сведений о прежнем, нынешнем и будущем состояниях океана.

9. Обеспечение комплексного развития потенциала и равного доступа всех заинтересованных сторон, вне зависимости от их географического местонахождения, пола, культуры или возраста, к данным, информации, знаниям и технологиям, относящимся к любым аспектам морской науки.

10. Обеспечение признания и понимания широкими слоями общества важных с точки зрения его благополучия, культуры и устойчивого развития многочисленных достоинств океана, а также выявление и преодоление препятствий на пути изменения моделей поведения, необходимого для последовательного улучшения отношения общества к океану».

В связи с этим предлагаемая цель Программы по Каспийскому морю была определена как создание “The Caspian Sea Data Center” (Центра данных по Каспийскому морю), который бы включал постоянно пополняемый архив спутниковой информации (ИК, оптика, радиолокация, альтиметрия), океанографических (физические, химические, биологические параметры) и гидрометеорологических данных, результатов гидродинамических моделей, массивов атмосферных реанализов, прогнозов регионального изменения климата, электронные атласы, электронную библиотеку публикаций по Каспийскому морю и другие материалы. Собранная информация позволит получить оценки антропогенных нагрузок на окружающую среду Каспийского моря, оценки происходящих климатических изменений и экстремальных погодных и климатических событий, влияния изменения климата на природные и социально-экономические системы, а также разработать стратегию и механизмы адаптации к изменению климата и состоянию Каспийского моря. Созданная инфраструктура позволит поддерживать современными информационными ресурсами страны Каспийского моря в создании условий для устойчивого развития региона Каспийского моря. В будущем “The Caspian Sea Data Center” может быть преобразован в “The Caspian Sea Analytical Data Center” с дополнительными консалтинговыми функциями. В связи с вышеизложенным, была подготовлена и подана в МОК Международная программа со следующим названием – “The Caspian Sea Digital Twin” (Цифровой двойник Каспийского моря, руководитель – А. Г. Костяной, ИО РАН).

6 октября 2021 г. МОК ЮНЕСКО одобрил эту заявку в виде Проекта “The Caspian Sea Digital Twin” с номером ID 92 на период 2021–2030 гг. с рекомендацией войти в состав более широкой Программы “Digital Twins of the Ocean – DITTO” (ID 137) в виде самостоятельного проекта. Программа DITTO направлена на создание цифрового двойника всего Мирового океана, и ее руководителем является проф. Мартин Висбек (Martin Visbeck) из ГЕОМАР (GEOMAR, Германия). В связи с рекомендацией МОК, А. Г. Костяной, как руководитель проекта “The Caspian Sea Digital Twin”, вошел в состав научного комитета программы DITTO уже в 2021 г. и присутствовал на всех

его заседаниях. В связи с санкциями, введенными против РФ в феврале 2022 г., сотрудничество с программой DITTO прекратилось по инициативе зарубежной (немецкой) стороны. Таким образом, с января 2022 г. проект “The Caspian Sea Digital Twin” развивается как самостоятельный проект, поддержанный МОК ЮНЕСКО и выполняемый в рамках мероприятий, связанных с Десятилетием науки об океане в интересах устойчивого развития (2021–2030) ООН.

В состав проекта входят 24 команды из 28 организаций из 6 стран (Россия – 16 команд, Азербайджан – 5, Казахстан – 3, Иран – 2, Франция – 1 и Швейцария – 1), общей численностью 190 человек. С российской стороны участвуют как академические институты, так и учреждения Росгидромета, а также государственные и частные университеты. К сожалению, проект не финансируется ни со стороны МОК, ни со стороны Минобрнауки России, впрочем, как и все другие программы и проекты, выполняемые в рамках Десятилетия, что существенным образом сдерживает развитие проекта и ограничивает международное сотрудничество в рамках проекта.

Данная работа посвящена краткому обзору результатов исследований Каспийского моря за 2022–2023 гг., выполненных в рамках Международного проекта “The Caspian Sea Digital Twin”. В нее вошли материалы отчетов, которые ежегодно предоставляются в МОК ЮНЕСКО и в Минобрнауки РФ.

## Результаты исследований

### **1. Создание цифрового двойника в области окружающей среды (Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных – ВНИИГМИ МЦД)**

Подготовлен обзор и проведен анализ результатов исследований по созданию цифровых двойников (ЦД) в области окружающей среды. Впервые в России разработаны подходы по созданию ЦД в области окружающей среды. Разработан примерный состав данных ЦД для развития гидрометеорологического обеспечения потребителей, выработаны требования к ЦД. Цифровые двойники в области окружающей среды должны стать ключевыми компонентами в основе умных зданий, городов, цифровых предприятий, самоуправляемых автомашин, летающей техники, судов и др. объектов, которым требуются комплексные данные о состоянии окружающей среды. ЦД может быть использован для моделирования воздействий окружающей среды, опасных явлений и изменений климата на промышленные предприятия. Определен примерный состав данных ЦД для Каспийского моря (Вязилов, 2021, 2022а, б).

Впервые в рамках реализации нового уровня гидрометеорологического обеспечения предлагается повысить осведомленность руководителей предприятий морской деятельности и населения об опасных гидрометеорологических явлениях с помощью цифрового двойника. Разработаны принципы улучшения осведомленности руководителей предприятий и населения. Выявление опасных гидрометеорологических явлений в потоке оперативных данных на основе установленных локальных пороговых

значений показателей по уровням опасности поможет оперативно реагировать на складывающиеся гидрометеорологические условия. Рассмотрены сервисы для повышения осведомленности об опасных явлениях, которые должны включать мобильные Интернет устройства (телефоны), ftp-серверы или электронную почту. Сервис поддержки решений должен предоставлять руководителю предприятий списки прогноза и возможных воздействий опасных явлений, а также рекомендации по уровням принятия решений (Вязилов, Мельников, 2024).

## **2. Исследование составных частей водного баланса Каспийского моря (Российский государственный гидрометеорологический университет – РГГМУ)**

Исследованы особенности генезиса колебаний уровня Каспийского моря в XX в., возможные причины его резкого падения в XXI в. и его возможные изменения к концу столетия. Показано, что в XX в. сток Волги на две трети определял изменчивость уровня Каспия. С начала 1990-х гг., вследствие глобального потепления, начался рост испарения с поверхности моря и уменьшение стока Волги, что сказалось на увеличении интенсивности падения уровня с 1996 г. Выдвинуто предположение, что основной причиной его падения является сток вод в залив Кара-Богаз-Гол, дающий вклад 72 % в падение уровня, по сравнению с вкладом испарения – 14 % и стоком рек – 10 % (Малинин, 2022).

Показана несостоятельность прогноза уровня Каспийского моря на длительную перспективу (до конца XXI в.) на основе климатических моделей, поскольку они плохо описывают даже современные изменения климата Каспийского моря. С высокой вероятностью стабилизация колебаний уровня может произойти при достижении им отметки –30.6 м БС (Балтийская система высот относительно ноля Кронштадтского футштока), поскольку в этом случае прекращается полностью сток в залив Кара-Богаз-Гол. Кроме того, постепенное уменьшение площади самого моря приведет к сокращению испарения, что может скомпенсировать тренд в испарении при росте регионального потепления. Поэтому маловероятно, что уровень Каспийского моря упадет ниже –31 м БС. Падение уровня моря ниже отметки –29 м грозит огромным экономическим ущербом для прикаспийских стран, поэтому проблема прогноза уровня на перспективу приобретает стратегическое научное и практическое значения. Насущной задачей является установление причин длительных изменений уровня и на этой основе разработка методологии его междекадного прогнозирования (Малинин, 2022).

## **3. Исследование сезонной и межгодовой изменчивости ледяного покрова Каспийского моря (Институт космических исследований РАН – ИКИ РАН, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН – ИО РАН)**

По данным спутникового дистанционного зондирования (РСА и цвет океана), реанализа MERRA-2 и данным Астраханской метеостанции исследована межгодовая изменчивость характеристик ледяного покрова Северного Каспия за 23 зимних сезона (1 ноября – 15 апреля) с зимы 1999/2000 года по 2021/2022 год. Предложена новая комбинация оптических каналов для приборов MSI Sentinel-2 и OLI Landsat-8,

которая позволяет лучше отличать ледяной покров от облаков или суши, чем стандартные RGB-композиции. С помощью этого метода были выявлены максимальная площадь ледяного покрова с высоким пространственным и временным разрешением, даты появления и разрушения ледяного покрова, а также продолжительность ледяного покрова. Для оценки суровости зим в рассматриваемый период рассчитывались индексы суровости зим, представляющие собой сумму градусо-дней мороза (СГДМ) за определенный зимний сезон. Для этого использовались значения суточной минимальной температуры воздуха над Северным Каспием ( $44.46^{\circ}$ – $47.14^{\circ}$  с. ш.,  $46.7^{\circ}$ – $52.9^{\circ}$  в. д.), среднесуточных и минимальных суточных температур над его наиболее холодной восточной частью (с западной границей  $50^{\circ}$  в. д.), полученные из реанализа MERRA-2, а также суточных минимальных температур по данным метеостанции в Астрахани ( $46.35^{\circ}$  с. ш.,  $48.07^{\circ}$  в. д.).

Полученные последовательности СГДМ показали, что до зимы 2011/2012 гг. наблюдался положительный тренд СГДМ (похолодание региона в среднем с заметной межгодовой изменчивостью), тогда как после этой зимы он был отрицательным (потепление) для Астрахани, но практически отсутствовал для Северного Каспия и его восточной части. Заметная межгодовая изменчивость обнаружена для максимальной площади льда и продолжительности ледового периода – оба параметра с максимумами также зимой 2011/2012 гг. Подробно исследовалось соответствие между изменчивостью СГДМ и изменениями характеристик ледяного покрова, а также полученные результаты с предыдущими публикациями. В XXI в. по сравнению с XX в. количество очень суровых и суровых зим уменьшилось, а количество мягких зим увеличилось. Минимумы и максимумы максимальной площади льда имели наилучшую корреляцию с СГДМ (лучшее соответствие было с СГДМ для Астрахани), с увеличением (в среднем) в холодную фазу (до 2012 г.) и снижением (в среднем) далее до 2022 г. Рассмотрены вопросы, связанные с различными методами расчета СГДМ, и их влияние на некоторые расхождения в результатах разных авторов, а также почему иногда максимальные и минимальные пики СГДМ не соответствуют относительным пикам межгодовой изменчивости площади и продолжительности ледяного покрова (Lavrova et al., 2022).

#### **4. Обзор спутниковой аппаратуры и техники мониторинга нефтяного загрязнения (ИКИ РАН, ИО РАН)**

Выполнен краткий обзор спутниковой аппаратуры, техники и методов обнаружения разливов нефти на морской поверхности. Мониторинг нефтяного загрязнения из космоса обычно осуществляется с помощью радаров с синтезированной апертурой (РСА, SAR) и усовершенствованных радаров с синтезированной апертурой (ASAR), установленных на спутниках, запущенных в разные годы США, Европейским космическим агентством, СССР, Японией, Канадой, Германией, Италией. Первый радар SAR был установлен на спутнике SEASAT, запущенном 27 июня 1978 г., и с этого времени РСА показали свою эффективность в обнаружении разливов нефти на поверхности моря. Как и любой дистанционный, натурный или лабораторный

метод, дистанционное зондирование с помощью РСА имеет ряд преимуществ (широкая полоса обзора, всепогодность, день/ночь, суточная периодичность и т. д.), а также недостатков, к которым относятся сходство нефтяных проявлений на поверхности моря с явлениями и эффектами, вызванными естественными океаническими и атмосферными процессами. Применение систем РСА проиллюстрировано примерами обнаружения разливов нефти в различных частях Мирового океана и внутренних морей. Рассмотрение различных оценок общего объема нефтяного загрязнения Балтийского и Средиземного морей показывает, что это сложная задача, и мы до сих пор не знаем реальных величин нефтяного загрязнения морской среды. Крайне актуальной является разработка научных основ и методики количественной оценки экологического состояния морских акваторий и общего объема нефтяного загрязнения Мирового океана и внутренних морей. Это особенно важно для акваторий, наиболее подверженных загрязнению нефтью в связи с масштабной разведкой и добычей нефти и газа на морском шельфе, строительством и эксплуатацией морских добывающих платформ, нефтяных терминалов, хранилищ углеводородов, портов, прокладкой подводных трубопроводов и ростом судоходства (Kostianou, Lavrova, 2022).

##### **5. Обзор спутниковой аппаратуры и техники мониторинга качества морской воды (ИКИ РАН, ИО РАН)**

Выполнен краткий обзор спутниковой аппаратуры, техники и методов мониторинга качества морской воды (загрязнение нефтью, взвешенным веществом и цветение водорослей). Мониторинг нефтяного загрязнения из космоса обычно осуществляется с помощью радара с синтезированной апертурой, но при определенных условиях, например, в зоне солнечного блика, оптическая съемка также весьма эффективна. Сканеры цвета океана – это уникальные приборы для обнаружения и мониторинга концентрации взвеси (мутных вод) и хлорофилла «а» (цветения водорослей) в поверхностном слое океана. Как любой дистанционный, натурный или лабораторный метод, сканеры цвета океана имеют ряд преимуществ (мультиспектральный подход, высокое спектральное разрешение, высокое пространственное разрешение и т. д.), а также недостатков, к которым относится зависимость от солнечного света (отсутствие оптической съемки в ночное время и полярную ночь) и облаков, зависимость полосы обзора и периода повторения от пространственного разрешения датчика и т. д. Применение оптических спутниковых систем дистанционного зондирования проиллюстрировано примерами обнаружения разливов нефти, мутных вод и цветения водорослей в разных частях Мирового океана и внутренних морей. Показано, что природные процессы, такие как ветро-волновое перемешивание в прибрежной зоне, речной сток, сток из мелководных лагун и цветение водорослей, а также антропогенное воздействие, связанное с добычей полезных ископаемых в море, строительством портов и фарватеров, прокладкой подводных трубопроводов и кабелей, существенно влияют на качество морской воды в прибрежной зоне Мирового океана и внутренних морей (Kostianou, Lavrova, Stochkov, 2022).

## **6. Исследование регионального изменения климата Каспийского моря (ИО РАН)**

Данные атмосферных и морских реанализов и дистанционного зондирования Земли, а также сведения из опубликованных литературных источников, были использованы для исследования межгодовых изменений ряда гидрометеорологических параметров Каспийского моря (без залива Кара-Богаз-Гол) – температуры воздуха у поверхности (ТВП), температуры поверхности моря (ТПМ), ледовитости и уровня моря – в период с 1980/1982 по 2020 гг. Анализ межгодовой изменчивости ТВП над Каспийским регионом и ТПМ Каспийского моря в целом и трех его регионов в отдельности свидетельствует о потеплении моря в рассматриваемый период. Линейный тренд ТВП Каспийского региона составил  $+0.030$  °С/год, тренды среднегодовой ТПМ в Северном, Среднем, Южном Каспии и моря в целом составили  $+0.026$ ,  $+0.042$ ,  $+0.034$  и  $+0.035$  °С/год соответственно. Наибольшее потепление вод имело место в западной части Среднего Каспия, наименьшее – на северо-востоке Северного Каспия и вдоль шельфовой зоны Туркменистана. Уменьшение трендов ТВП и ТПМ в 1980–2020 гг., по сравнению с предшествующим периодом – с 1980 г. примерно до 2010 г., и отсутствие роста среднегодовых значений ТПМ после 2010 г. свидетельствуют о замедлении потепления моря во вторую декаду 2000-х годов.

В 2000-е годы увеличились максимальные среднемесячные летние и минимальные среднемесячные зимние значения ТВП и ТПМ Каспия, возросло количество мягких зим. В результате увеличения количества мягких зим наблюдаются отрицательные тренды ( $-0.8\%/10$  лет и  $-1.24\%/10$  лет) среднемесячной и средней за холодное полугодие концентрации льда в Северном Каспии соответственно. По существующим прогнозам, к концу текущего столетия зимы станут в основном мягкими и очень мягкими, а устойчивый ледяной покров сохранится лишь в северо-восточной части моря (Гинзбург и др., 2021; Костяной и др., 2022).

## **7. Исследование сезонной и межгодовой изменчивости уровня Каспийского моря (Геофизический центр РАН – ГЦ РАН, ИО РАН)**

Характер долговременной изменчивости уровня изолированного Каспийского моря исследован на основе данных спутниковых альтиметров, начиная с 1993 г. С зимы 1992/1993 гг. до лета 1995 г. уровень Каспийского моря рос со средней скоростью около 20 см в год до отметки  $-26.4$  м БС, затем он начал снижаться с разной скоростью. Средняя скорость снижения уровня с 1993 по 2020 гг. составила около 5.4 см в год. К концу 2020 г. уровень Каспия достиг отметки  $-28.5$  м, и от минимума 1977 г. ( $-29$  м БС) его отделяло всего полметра. Сравнительный анализ изменений уровня Каспийского моря и стока реки Волги в тот же период показал, что подъем уровня в 1993–1995 гг. и его спад до 1997 г. соответствовали изменениям стока Волги. А в дальнейшем определяющим фактором снижения уровня моря, при уменьшении в среднем речного стока, являлось резкое увеличение испарения с поверхности моря (Chen et al., 2017; Гинзбург, Костяной, 2018; Серых, Костяной, 2020; Гинзбург и др., 2021; Костяной и др., 2022). Согласно данным спутниковой альтиметрии, уровень Каспийского моря продолжал опускаться

со скоростью 25–35 см в год. Так, например, с 18 сентября 2022 г. по 17 сентября 2023 г. уровень моря снизился еще на 35 см, и в настоящее время (февраль 2024 г.) достиг уровня –29.1 м, что подтверждается данными с уровня поста г. Баку, где уровень моря зимой 2024 г. опускался до –29.4 м.

В соответствии с различными климатическими моделями (см. работы Панин и др., 2015; Nandini-Weiss et al., 2020; Prange et al., 2020 и др.), в текущем столетии можно ожидать как снижения уровня Каспийского моря, так и его повышения или стабилизации. По прогнозу Панина и др. (2015), понижение уровня Каспийского моря продолжится в ближайшие 10–15 лет, что подтверждается современными наблюдениями. Малинин (2022) указывает, что маловероятно снижение уровня Каспия ниже –31 м БС. Наибольшее понижение уровня Каспийского моря с 2020 г. до конца столетия дают результаты моделирования, представленные в работах Nandini-Weiss et al. (2020), Prange et al. (2020) и ряда других – на 9 и 18 м или 8 и 16 м (в зависимости от корректного учета испарения с поверхности) для сценариев антропогенных выбросов парниковых газов в атмосферу в будущем RCP4.5 (наиболее вероятного) и RCP8.5 (наихудшего) ИРСС (Межправительственной группы экспертов по изменению климата) соответственно. При падении уровня на 9–18 м поверхность Каспия уменьшится на 23–34 %, главным образом, за счет обмеления всего Северного Каспия (Prange et al., 2020).

#### **8. Исследование водообмена между Северным, Средним и Южным Каспием на основе данных альтиметрии и численного моделирования (ГЦ РАН, Гидрометцентр России, ИО РАН)**

Выполнено комплексное исследование водообмена между Северным, Средним и Южным Каспием на основе данных спутниковой альтиметрии, полученных со спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2/3 за 1993–2019 гг., и трехмерной бароклинной гидродинамической модели со свободной поверхностью Гидрометцентра России (ГМЦ). Границы между этими частями Каспийского моря приняты по наземным трекам 133 и 209 спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2/3, которые относительно близки к географическим границам между Северным, Средним и Южным Каспием. Основные течения в Каспийском море пересекают треки спутников практически перпендикулярно, что позволяет рассчитывать геострофические течения, потоки и общий водообмен между различными частями моря. Полученные результаты сравнивались с результатами моделирования течений в Каспийском море с помощью модели ГМЦ, а именно с расчетом потоков именно через те же наземные трассы спутников. Соответствие было очень хорошим, что свидетельствует о достоверности спутниковых альтиметрических измерений водообмена между различными частями Каспийского моря. Показано, что основной водообмен между Северным и Средним Каспием связан со стоком реки Волги, который сосредоточен вдоль западного побережья Каспийского моря. В этом районе аномалии геострофических скоростей могут превышать 20 см/с. Рассчитана сезонная и межгодовая изменчивость потоков через оба трека спутников, а также суммарный водообмен через эти треки, включающий как течение на юг вдоль

западного побережья моря, так и возвратное течение на север вдоль восточного побережья моря. Полученные результаты показывают, что данные спутниковой альтиметрии могут быть использованы для реконструкции течений и характеристик водообмена в Каспийском море при отсутствии регулярных натуральных гидрографических измерений со стороны прибрежных стран.

#### **9. Исследование динамики вод в заливе Кара-Богаз-Гол (ИО РАН)**

Для исследования структуры трансформированных каспийских вод в заливе Кара-Богаз-Гол, их проявления в поле температуры поверхности моря (ТПМ), путей дальнейшего распространения и возможности вихреобразования в заливе используются оптические спутниковые изображения Sentinel-2 с разрешением 10 м за 2021 г., ИК-изображение OLI Landsat-8 за 20 июля 2021 г. с разрешением 100 м, а также все оптические изображения MODIS\_Terra (разрешение 250 м) за 2021 г. и ИК-изображения спутников NOAA-15, -16, -18 за 2001–2005 гг. (разрешение 1 км). Было установлено, что вода в залив поступает через многочисленные рукава дельты пролива струями, границы которых идентифицируются на расстоянии в несколько километров от пролива. Контраст ТПМ между водой в струях на выходе из пролива и в заливе в летний период, когда вода в заливе теплее воды в Среднем Каспии (особенно в период интенсивного апвеллинга), может достигать 10–11 °С. Распространение каспийских вод в заливе отличается разнообразием. В зависимости от скорости и направления ветра, они могут быть направлены вдоль берега на север или на юго-восток, иметь форму эллиптической линзы с четкими фронтальными границами или грибовидную форму, ориентированную перпендикулярно побережью. Кроме того, в заливе Кара-Богаз-Гол наблюдаются вихревые структуры с масштабом от 7 до 50 км в разных частях акватории, как в видимом диапазоне спектра, так и на ИК-изображениях (Гинзбург, Костяной, Шеремет, 2022).

#### **10. Исследование изменчивости Каспийского моря спутниковыми методами (ИКИ РАН, ИО РАН)**

Проведено обобщение многолетних совместных работ ИКИ РАН и ИО РАН, направленных на изучение изменений экологического состояния Каспийского моря на протяжении первых двух десятилетий XXI века под воздействием природных и антропогенных факторов с помощью средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Главной экологической проблемой Каспия на протяжении многих лет является нефтяное загрязнение моря, которое связано как с добычей и транспортировкой нефти, так и с изменением уровня моря, которое приводит к вторичному загрязнению моря, стоком рек и даже с сейсмической активностью, которая провоцирует естественные сипажи нефти со дна моря. Анализ многолетних данных ДЗЗ позволил оценить пространственно-временную изменчивость нефтяного загрязнения на всей акватории Каспия, что особенно важно и актуально после подписания Конвенции о правовом статусе Каспийского моря в августе 2018 г. (Лаврова, Митягина, Костяной, 2022).

В ходе работ были определены характеристики сезонной, межгодовой и пространственной изменчивости цветения фитопланктона в Каспийском море за период с 1999 по 2022 гг. Спутниковые наблюдения показали, что интенсивное цветение фитопланктона наблюдается как в Северном Каспии, так и в устьевых участках рек. Кроме того, известны случаи масштабного аномального цветения водорослей, например, в Южном Каспии в 2005 г. Было показано, что за период спутниковых наблюдений с 1999 по 2022 гг. аномально интенсивное цветение фитопланктона в Южном Каспии было обнаружено 8 раз. До сих пор остается открытым вопрос, что является причиной таких «вспышек» интенсивного цветения водорослей в Южном Каспии. В наших исследованиях и исследованиях других специалистов отмечены высокие значения температуры морской поверхности и воздуха, низкие значения скорости ветра, высокая концентрация хлорофилла «а» в периоды, предшествующие развитию цветения цианобактерий, атмосферные осадки и даже пыльные бури как факторы, способные спровоцировать интенсивное цветение водорослей в Южном Каспии. К сожалению, четкой корреляции между всеми этими факторами и аномальным цветением вод установить не удалось. Проблема усугубляется тем, что оценить поступление питательных веществ с берега невозможно (Лаврова, Митягина, Костяной, 2022).

Кроме того, была подробно исследована сезонная и межгодовая изменчивость поля ветра над Каспийским морем как основного параметра, определяющего результирующую циркуляцию вод Каспийского моря и динамические процессы в нем. Были рассчитаны линейные тренды межгодовой изменчивости следующих основных гидрометеорологических параметров Каспийского моря: температура поверхности моря (ТПМ), температура воздуха, атмосферные осадки, облачность, уровень моря. Все они прямо или косвенно влияют на экологическое состояние Каспия. Были установлены характеристики межгодовой изменчивости ледяного покрова в Северном Каспии, выявлены межгодовые тренды в сроках льдообразования и очищения ото льда площадей, занятых льдом. По данным ДЗЗ получены изменения в характере типичных для Каспийского моря гидродинамических процессов, например, вихревой активности. Показано, что именно мезомасштабные и субмезомасштабные гидродинамические процессы существенным образом влияют на перенос загрязняющих веществ в Каспийском море, включая трансграничный (Лаврова, Митягина, Костяной, 2022).

Для решения поставленных задач был использован комплексный подход, объединяющий анализ архивных спутниковых изображений различного диапазона спектра за 1999–2018 гг. и данных оперативного спутникового мониторинга, выполненного в 2019–2022 гг. Анализ многосенсорных и мультиплатформных оптических, инфракрасных и радиолокационных спутниковых изображений был сопряжен с анализом ряда гидрометеорологических и климатических данных, что позволило достоверно установить различные причинно-следственные связи в межгодовой изменчивости экологического состояния Каспия. Проведенные исследования и полученные результаты имеют важное значение не только для РФ, но и для всех прикаспийских стран, поскольку региональное изменение климата и снижение уровня Каспия существенным

образом отражаются на прибрежной инфраструктуре, развитии морского транспорта, добыче нефти и газа в море, строительстве новых портов, терминалов и подводных трубопроводов, сельском хозяйстве и урбанизации прибрежной зоны Каспия (Лаврова, Митягина, Костяной, 2022).

**11. Исследование гидрологического режима, экологического состояния и качества вод в прибрежной зоне Казахстана (ИО РАН, Международный Казахско-Турецкий университет им. Ходжи Ахмеда Ясави (г. Туркестан, Республика Казахстан), Каспийский государственный университет технологий и инжиниринга им. Ш. Есенова (г. Актау, Республика Казахстан))**

Сотрудничество с казахстанскими партнерами проекта “The Caspian Sea Digital Twin” развивается в рамках трех казахстанских проектов, в которых участвуют сотрудники ИО РАН:

1. «Гидрофизический режим, экологическое состояние и качество вод прибрежной зоны в казахстанском секторе Каспийского моря» (2022–2024 гг.);
2. «Спутниковый мониторинг акваторий портов Актау и Курык» (2023–2025 гг.);
3. «Комплексные исследования для обеспечения устойчивого развития природных и социально-экономических систем западной части Республики Казахстан (Мангистауский, Атырауский, Западно-Казахстанский регионы и регион Актобе) в контексте “зеленого роста”» (2023–2025 гг.).

В рамках этих проектов были проведены морские прибрежные и сухопутные экспедиции в районе города Актау в октябре 2022 г., апреле, сентябре и декабре 2023 г. Кроме того, в частности, были выполнены следующие работы:

1. Организация ежедневного спутникового мониторинга прибрежной зоны казахстанского сектора Каспийского моря по оптическим данным спутников MODIS-Aqua и MSI Sentinel-2.
2. Сбор и анализ оптических спутниковых изображений среднего пространственного разрешения (спутник MODIS-Aqua, разрешение 250 м) прибрежной зоны казахстанского сектора Каспийского моря.
3. Сбор и анализ оптических спутниковых изображений высокого пространственного разрешения (спутник MSI Sentinel-2, разрешение 20 м) прибрежной зоны казахстанского сектора Каспийского моря.
4. Сбор и анализ ежедневной гидрометеорологической информации по аэропорту Актау с шагом в 30 мин (температура воздуха, скорость и направление ветра, атмосферное давление, влажность воздуха, облачность), необходимой для анализа спутниковых изображений с 1 января по 24 сентября 2023 г.
5. Обеспечение прибрежных экспедиций спутниковой информацией.
6. Предварительный анализ спутниковых изображений с целью изучения пространственно-временных характеристик прибрежного течения и вихревой активности в прибрежной зоне.
7. Исследование изменчивости динамических и термохалинных полей (скорость течения и температура воды в придонном слое) на мангистауском шельфе в

казахстанском секторе Каспийского моря по данным двух заякоренных автоматических буйковых станций, установленных в октябре 2022 г.

8. Проведены комплексные наблюдения, направленные на оценку экологической ситуации в прибрежной зоне города Актау, с упором на биологические особенности экосистем и геоморфологию биотопов. Параллельно выполнен отбор проб биологического материала из биотопов различного типа, с целью оценки качественного состава, количественной структуры и пространственной организации биологических сообществ (Sapozhnikov et al., 2023).

9. Выполнен сбор и анализ радиолокационных и оптических изображений высокого и среднего разрешения акватории между портами Актау и Курык с января 2015 г. по декабрь 2022 г. со спутников Sentinel-1 и Sentinel-2, а также MODIS-Terra. Попутно была собрана соответствующая гидрометеорологическая информация и пробы воды на нефтяное загрязнение (2 раза в год) в прибрежной зоне исследуемого района.

10. Исследована сезонная и межгодовая изменчивость ледяного покрова Северного Каспия.

11. Исследована сезонная и межгодовая изменчивость уровня Каспийского моря с 27 сентября 1992 г. по 16 ноября 2023 г. по данным альтиметрических измерений спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2/3.

## **12. Исследование ветрового режима над Каспийским морем и потенциала ветровой энергии для строительства морских ветропарков (ИО РАН совместно с Университетом Тарбиат Модарес (Tarbiat Modares University), Исламская Республика Иран)**

Для исследования потенциала морской ветровой энергии Каспийского моря использовались данные атмосферного реанализа ERA-Interim с 1980 по 2015 гг. в сочетании с данными дистанционного зондирования QuikSCAT и RapidSCAT. Результаты анализа показали, что плотность ветровой энергии составляет  $173 \text{ Вт/м}^2$  как среднее значение для Каспийского моря. За период 1980–2015 гг. на 57 % площади Каспийского моря наблюдается тенденция снижения плотности энергии ветра со средним уменьшением на  $16.85 \text{ Вт/м}^2$ . Самая высокая отрицательная скорость изменений наблюдается в Северном Каспии, который, по-видимому, больше подвержен влиянию региональных климатических изменений. Было установлено, что Средний Каспий представляется лучшим местом для строительства ветропарков, в особенности, мелководные прибрежные участки вдоль побережья Казахстана от Форт-Шевченко ( $44^{\circ}30' \text{ с. ш.}$ ) на севере до  $42^{\circ}00' \text{ с. ш.}$  на юге, где примерно проходит граница с Туркменистаном. В указанном районе наблюдаются положительные межгодовые тенденции изменения плотности энергии ветра, что также является важным фактором для будущего производства ветровой энергии. Этот участок прибрежной зоны возможно подкрепить соответствующей инфраструктурой, которая может быть создана в городах Форт-Шевченко и Актау (Rahimi et al., 2022).

Что касается других стран Каспийского моря, то прибрежные районы Туркменистана, Ирана, Азербайджана и Дагестана в России не перспективны для морской

ветрогенерации из-за низких значений плотности энергии ветра. Более перспективными являются прибрежные районы России к северу от 44°30' с. ш., но именно здесь появляются проблемы с ледяным покровом, который устанавливается ежегодно. Решением этой проблемы является исследование береговой ветрогенерации вдоль побережья Каспийского моря, что представляется логическим продолжением проведенного исследования. Во многих прибрежных районах топографические особенности порождают локальные сильные ветры, которые можно использовать для эффективного производства ветровой энергии (Rahimi et al., 2022).

### **13. Создание баз данных (ИО РАН)**

В рамках гранта РФФИ № 23-77-00027 «Исследование климатической изменчивости термогидродинамического режима Каспийского моря по данным дистанционного зондирования» (ИО РАН, 2023–2026 гг., <https://rscf.ru/project/23-77-00027/>) были созданы 4 базы данных:

«Основные метеорологические параметры в регионе Каспийского моря по данным береговых метеостанций». Она представляет собой выборку основных метеорологических параметров (атмосферное давление, температура воздуха, скорость ветра, влажность воздуха, сумма осадков) по данным 36 береговых метеостанций для региона Каспийского моря.

«Параметры состояния атмосферы над регионом Каспийского моря по данным реанализа MERRA-2». База данных представляет собой выборку основных параметров состояния атмосферы (атмосферное давление на уровне моря, температура воздуха на высоте 2 м, скорость ветра на высоте 10 м, влажность воздуха на высоте 2 м, сумма осадков) из реанализа MERRA-2 для региона Каспийского моря (45.625° ÷ 55° в. д.; 36° ÷ 48° с. ш., шаг 0.625° по долготе и 0.5° по широте).

«Параметры состояния атмосферы над акваторией Каспийского моря по данным СВЧ-радиометрии». Она представляет собой выборку основных параметров состояния атмосферы (скорость приводного ветра, интегральное содержание водяного пара, содержание водяного пара в облаках) по данным СВЧ-радиометрии для акватории Каспийского моря.

База данных спутника CFOSAT для Каспийского моря. Прибор SWIM (Surface Waves Investigation and Monitoring instrument) специально сконструирован для измерения параметров волнения в широкой полосе обзора (около 150 км) с возможностью восстановления пространственных спектров в диапазоне длин волн 30–500 метров.

### **14. Создание специализированного спутникового информационного сервиса “See the Caspian Sea” (ИКИ РАН, ИО РАН)**

В рамках гранта РФФИ № 23-77-00027 «Исследование климатической изменчивости термогидродинамического режима Каспийского моря по данным дистанционного зондирования» (ИО РАН, 2023–2026 гг., <https://rscf.ru/project/23-77-00027/>) создан специализированный спутниковый информационный сервис “See the Caspian Sea” (<http://caspian.geosmis.ru>), предназначенный для Каспийского моря на

базе существующего сервиса “See the Sea”, входящего в состав ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Специализированный информационный сервис сформирован на базе вычислительных мощностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг» и для его реализации были предоставлены возможности доступа к архивам спутниковой информации ЦКП, а также реализованные в его рамках инструменты анализа спутниковых и метеорологических данных.

**15. Развитие проекта CASPISNET и консорциума с Институтом географии Национальной академии наук Азербайджана (г. Баку, Азербайджанская Республика), Институтом наук об окружающей среде Женевского университета (г. Женева, Швейцария) и Франко-азербайджанским университетом (UFAZ, г. Баку, Азербайджанская Республика)**

После серии симпозиумов и специализированных семинаров, а также рекомендаций междисциплинарного пула экспертов, в мае 2018 г. в Баку была создана Международная рабочая группа по устойчивому развитию региона Каспийского моря – CASPISNET (Каспийская интегрированная научная сеть). К многопрофильной группе ученых из Азербайджана, России, Ирана, Казахстана и Туркменистана 13 мая 2018 г. присоединились эксперты из Франции, Германии, Италии, Швейцарии, Турции, США, Австралии, Чили, Южной Кореи, Пакистана и Узбекистана на специальной встрече, инициированной Институтом географии Национальной академии наук Азербайджана во время международной конференции “Understanding the Problems of Inland Waters: Case Study for The Caspian Sea”, состоявшейся в Баку 12–14 мая 2018 г. Члены CASPISNET обладают опытом в области наук о Земле, естественных и прикладных наук, дистанционного зондирования, ГИС-технологий, социальных наук, управления водными ресурсами, изменения климата, сельского хозяйства, биоразнообразия, морской биологии и рыболовства, прибрежного городского планирования и развития, территориального развития, водной дипломатии, уровня моря, морской геофизики, геологии, термодинамики, археологии, международных перевозок, загрязнения окружающей среды и многих других дисциплин, связанных с развитием Каспийского региона.

Развитие проекта CASPISNET происходит в рамках периодических конференций и совещаний, проводимых в Баку и дистанционно, переговоров с заинтересованными международными, государственными и частными организациями, тренингов молодых ученых по различным дисциплинам наук об окружающей среде. Очередная встреча CASPISNET состоялась в Баку с 3 по 6 июня 2024 г. во время конференции “Caspian Basin in Transition Conference 2024: Bridging Geosciences and Environmental Challenges”, организованной Франко-азербайджанским университетом (UFAZ).

**16. Представление результатов проведенных исследований на научных конференциях**

Участие с приглашенным докладом «Проект “The Caspian Sea Digital Twin” – пример научной дипломатии в Каспийском регионе» на Круглом столе «Право и

научная дипломатия для устойчивого развития Каспийского региона», проведенного в рамках Второго Каспийского экономического форума 5–6 октября 2022 г. в Москве.

Подготовка и проведение Круглого стола “The Caspian Sea Digital Twin” в рамках Всероссийской конференции с международным участием «Россия в Десятилетии ООН наук об океане» 24–28 октября 2022 г. (г. Москва).

### Заключение

В данной статье представлен краткий обзор деятельности по исследованию Каспийского моря, осуществляемой в рамках Международного проекта “The Caspian Sea Digital Twin” в 2022–2023 гг., выполняемого в рамках мероприятий, связанных с Десятилетием науки об океане в интересах устойчивого развития (2021–2030) ООН. Головной организацией является Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (г. Москва), который координирует работу консорциума, объединяющего 24 команды из 28 организаций из России, Азербайджана, Казахстана, Ирана, Франции и Швейцарии. За два года существования проекта выполнен большой объем работ в соответствии с поставленными задачами.

К сожалению, проект не финансируется ни со стороны МОК ЮНЕСКО, ни со стороны Минобрнауки России, что существенно сдерживает развитие проекта и ограничивает международное сотрудничество в рамках проекта. Все работы выполняются за счет собственных средств участников программы, которых явно недостаточно для реализации такого масштабного проекта. В отсутствие целевого финансирования руководители команд вынуждены заниматься поиском средств путем подачи заявок на национальные или международные научные гранты, тематика которых не всегда совпадает с целями “The Caspian Sea Digital Twin”.

Следует отметить, что в рамках реализации Указов Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» и от 21 июля 2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года», в том числе с целью решения задачи по обеспечению ускоренного внедрения цифровых технологий в экономике и социальной сфере, Правительством Российской Федерации сформирована и выполняется национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации». Деятельность в рамках проекта “The Caspian Sea Digital Twin” соответствует мероприятиям этой программы, которые реализуются не только на территории субъектов Российской Федерации, но и в Федеральном центре. Результаты проекта, несомненно, имеют научное, социально-экономическое и образовательное значение как для Российской Федерации, так и для всех других прикаспийских государств.

**Благодарности:** Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 23-77-00027 «Исследование климатической изменчивости термогидродинамического режима Каспийского моря по данным дистанционного зондирования» (2023–2026 гг.), <https://rscf.ru/project/23-77-00027/>.

### Список литературы

1. *Вязилов Е. Д.* Цифровая трансформация гидрометеорологического обеспечения. Том 1: Подходы по реализации. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2021. 356 с.
2. *Вязилов Е. Д.* Цифровая трансформация гидрометеорологического обеспечения. Том 2: Применение в различных отраслях. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2022а. 365 с.
3. *Вязилов Е. Д.* Состав данных для цифрового двойника Каспийского моря // Тезисы доклада, конференция «Россия в Десятилетия наук об океане ООН» РТУ МИРЭА, 25–27 октября, 2022б. 3 с.
4. *Вязилов Е. Д., Мельников Д. А.* Повышение осведомленности руководителей предприятий морской деятельности для адаптации к опасным и экстремальным явлениям // Океанологические исследования. 2024. Т. 52. № 2. С. 169–182. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(2\).9](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(2).9).
5. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г.* Тенденции изменений гидрометеорологических параметров Каспийского моря в современный период (1990-е – 2017 гг.) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 195–207.
6. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Серых И. В., Лебедев С. А.* Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980–2020 гг.) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 277–291. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291>.
7. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А.* О динамике вод в заливе Кара-Богаз-Гол (спутниковая информация) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 265–279. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-4-265-279>.
8. *Костяной А. Г., Еремина Т. Р., Иванов В. В., Лобанов В. Б., Кровнин А. С., Амосова В. М., Афанасьев Д. Ф., Барабанов В. В., Белоусов В. Н., Волощук Е. В., Гинзбург А. И., Гордеева С. М., Долгов А. В., Жукова С. В., Зезера А. С., Зуенко Ю. И., Лардыгина Е. Г., Лебедев С. А., Лучин В. А., Мезенцева Л. И., Михайлова А. В., Разинков В. П., Ростов И. Д., Серых И. В., Трусенкова О. О., Устинова Е. И., Хен Г. В.* Морские природные системы. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова. Росгидромет. Санкт-Петербург: Научно-технологические технологии, 2022. С. 192–238.
9. *Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г.* Спутниковые методы исследования изменчивости Каспийского моря. М.: ИКИ РАН, 2022. 250 с.
10. *Малинин В. Н.* Грозит ли Каспию судьба Арала? // Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 746–760. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2022-69-746-760>.
11. *Панин Г. Н., Выручалкина Т. Ю., Соломонова И. В.* Климатические изменения в Арктике, Северной Атлантике, районе Каспия и их взаимосвязь // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. Т. 1. С. 183–210.
12. *Серых И. В., Костяной А. Г.* О влиянии Атлантического и Тихого океанов на изменение климатических параметров Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 96–107.
13. *Шановалов С. М.* Три года реализации Десятилетия ООН, посвященного науке об океане в интересах устойчивого развития // Океанологические исследования. 2023. № 51 (4). С. 216–231. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(4\).9](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(4).9).
14. *Chen J. L., Pekker T., Wilson C. R., Tapley B. D., Kostianoy A. G., Cretaux J.-F., Safarov E. S.* Long-term Caspian Sea level change // Geophysical Research Letters. 2017. Vol. 44. P. 6993–7001. <https://doi.org/10.1002/2017GL073958>.

15. *Kostianoy A. G., Lavrova O. Yu.* Satellite instrumentation and technique for oil pollution monitoring of the seas. In: *Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle Management.* (Eds.) Anna Di Mauro, Andrea Scozzari, Francesco Soldovieri. Springer Nature, 2022, Cham, Switzerland, 2022. P. 53–77. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7_4).
16. *Kostianoy A. G., Lavrova O. Yu., Strochkov A. Ya.* Satellite instrumentation and technique for monitoring of seawater quality. In: *Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle Management.* (Eds.) Anna Di Mauro, Andrea Scozzari, Francesco Soldovieri. Springer Nature, Cham, Switzerland, 2022. P. 79–109. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7_5).
17. *Lavrova O. Yu., Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Bocharova T. Yu.* Interannual variability of ice cover in the Caspian Sea // *Journal of Hydrology.* X. 2022. Vol. 17. 1 December 2022. 100145. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2022.100145>.
18. *Nandini-Weiss S. D., Prange M., Arpe K., Merkel U., Schulz M.* Past and future impact of the winter North Atlantic Oscillation in the Caspian Sea catchment area // *Int. J. Climatol.*, 2020. Vol. 40. P. 2717–2731. <https://doi.org/10.1002/joc.6362>.
19. *Prange M., Wilke T., Wesselingh F. P.* The other side of sea level change // *Communications Earth & Environment.* 2020. 1:69. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00075-6>.
20. *Rahimi M., Gholamalifard M., Rashidi A., Ahmadi B., Kostianoy A. G., Semenov A. V.* Spatio-Temporal Variability of Wind Energy in the Caspian Sea: An Ecosystem Service Modeling Approach // *Remote Sensing.* 2022. 14. 6263. <https://doi.org/10.3390/rs14246263>.
21. *Sapozhnikov Ph. V., Kostianoy A. G., Zavalov P. O., Kalinina O. Yu., Kurbaniyazov A. K., Kurbaniyazov N. A., Muratov N. B.* Epilithic biofilms of the Eastern Caspian (Aktau Region, Kazakhstan) under conditions of falling sea level // *Ecologica Montenegrina.* 2023. No. 64. P. 247–260. <https://dx.doi.org/10.37828/em.2023.64.9>.
22. *UNESCO-IOC.* The United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021-2030) Implementation Plan. UNESCO, Paris, IOC Ocean Decade Series. 2021. Vol. 20. 56 p. Доступно на сайте: <https://oceandecade.org/publications/ocean-decade-implementation-plan/> (Просмотрено 1 февраля 2024 г.).

Статья поступила в редакцию 27.03.2024, одобрена к печати 18.06.2024.

**Для цитирования:** *Костяной А. Г.* Исследования Каспийского моря в рамках международного проекта “The Caspian Sea Digital Twin” // *Океанологические исследования.* 2024. № 52 (2). С. 234–255. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(2\).12](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(2).12).

**RESEARCH OF THE CASPIAN SEA  
IN THE FRAMEWORK OF THE INTERNATIONAL PROJECT  
“THE CASPIAN SEA DIGITAL TWIN”**

**A. G. Kostianoy** <sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>*Shirshov Institute of Oceanology of RAS,  
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia;*  
<sup>2</sup>*S. Yu. Witte Moscow University,  
12/1, 2<sup>nd</sup> Kojuhovskiy pr-zd, Moscow, 115432, Russia;*  
<sup>3</sup>*Maykop State Technological University,  
191, Pervomaiskaya str., Maykop, 385000, Russia,  
e-mail: [Kostianoy@gmail.com](mailto:Kostianoy@gmail.com)*

The article provides a brief overview of the results of studies of the Caspian Sea in 2022–2023, carried out within the framework of the International Project “The Caspian Sea Digital Twin”, endorsed by the IOC UNESCO and carried out as part of activities related to the UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021–2030). The tasks set in the Project are of great scientific, socio-economic and educational significance, both for the Russian Federation and for all other Caspian states. The implementation of this Project with the participation of representatives of many countries and stakeholders is extremely important after the signing of the Convention on the Legal Status of the Caspian Sea on August 12, 2018 by the heads of all five Caspian states. The scientific results expected from the Project will be widely in demand both by government agencies, business community, and scientific and educational organizations. The Project will make a great contribution to the development of multilateral cooperation in the region.

**Keywords:** Caspian Sea, IOC UNESCO, UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development, digital twin, satellite data, oceanographic data, hydrometeorological data, hydrodynamic models, atmospheric reanalyses, regional climate change, electronic atlases, electronic library

**Acknowledgments:** The research was done with the support of the RSF Grant No. 23-77-00027 “Investigation of the climate variability of thermo-hydrodynamic regime of the Caspian Sea based on remote sensing data”, <https://rscf.ru/en/project/23-77-00027/>.

### References

1. Chen, J. L., T. Pekker, C. R. Wilson, B. D. Tapley, A. G. Kostianoy, J.-F. Cretaux, and E. S. Safarov, 2017: Long-term Caspian Sea level change. *Geophysical Research Letters*, **44**, 6993–7001, <https://doi.org/10.1002/2017GL073958>.
2. Ginzburg, A. I. and A. G. Kostianoy, 2018: Tendentsii izmeneniy gidrometeorologicheskikh parametrov Kaspiyskogo morya v sovremennyy period (1990-e–2017 gg.) (Tendencies of changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea in the modern period (1990s–2017)). *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, **15** (7), 195–207 [in Russian], <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-7-195-207>.
3. Ginzburg, A. I., A. G. Kostianoy, and N. A. Sheremet, 2022: O dinamike vod v zalive Kara-Bogaz-Gol (sputnikovaya informatsiya) (On the dynamics of waters in the Kara-Bogaz-Gol Bay

- (satellite information)). *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, **19** (4), 265–279, <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-4-265-279>.
4. Ginzburg, A. I., A. G. Kostianoy, I. V. Serykh, and S. A. Lebedev, 2021: Klimaticheskiye izmeneniya gidrometeorologicheskikh parametrov Kaspiyskogo morya (1980–2020 gg.) (Climatic changes in the hydrometeorological parameters of the Caspian Sea (1980–2020)). *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, **18** (5), 277–291, <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291>.
  5. Kostianoy, A. G. and O. Yu. Lavrova, 2022: *Satellite instrumentation and technique for oil pollution monitoring of the seas. In: Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle Management.* (Eds.) Anna Di Mauro, Andrea Scozzari, Francesco Soldovieri. Springer Nature, Cham, Switzerland, 53–77, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7_4).
  6. Kostianoy, A. G., O. Yu. Lavrova, and A. Ya. Strochkov, 2022: *Satellite instrumentation and technique for monitoring of seawater quality. In: Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle Management.* (Eds.) Anna Di Mauro, Andrea Scozzari, Francesco Soldovieri. Springer Nature, Cham, Switzerland, 79–109, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7_5).
  7. Kostianoy, A. G., T. R. Eremina, V. V. Ivanov, V. B. Lobanov, A. S. Krovnin, V. M. Amosova, D. F. Afanasiev, V. V. Barabanov, V. N. Belousov, E. V. Voloshchuk, A. I. Ginzburg, S. M. Gordeeva, A. V. Dolgov, S. V. Zhukova, A. S. Zezera, Yu. I. Zuenko, E. G. Lardygina, S. A. Lebedev, V. A. Luchin, L. I. Mezentseva, A. V. Mikhailova, V. P. Razinkov, I. D. Rostov, I. V. Serykh, O. O. Trusenkova, E. I. Ustinova, and G. V. Khen, 2022: Morskiye prirodnye sistemy (Marine natural systems). In: *The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation.* Ed. V. M. Kattsov; Roshydromet, St. Petersburg: Science-intensive technologies, 192–238.
  8. Lavrova, O. Yu., A. I. Ginzburg, A. G. Kostianoy, and T. Yu. Bocharova, 2022: Interannual variability of ice cover in the Caspian Sea. *Journal of Hydrology*, **X**, **17**, 1 December 2022, 100145, <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2022.100145>.
  9. Lavrova, O. Yu., M. I. Mityagina, and A. G. Kostianoy, 2022: *Sputnikovyye metody issledovaniya izmenchivosti Kaspiyskogo morya (Satellite methods for investigation the Caspian Sea variability).* Moscow, Space Research Institute, 250 p.
  10. Malinin, V. N., 2022: Grozit li Kaspiyu sud'ba Arala? (Is the fate of the Aral threatening the Caspian Sea?) *Hydrometeorology and Ecology*, **69**, 746–760, <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2022-69-746-760>.
  11. Nandini-Weiss, S. D., M. Prange, K. Arpe, U. Merkel, and M. Schulz, 2020: Past and future impact of the winter North Atlantic Oscillation in the Caspian Sea catchment area. *Int. J. Climatol.*, **40**, 2717–2731, <https://doi.org/10.1002/joc.6362>.
  12. Panin, G. N., T. Yu. Vyruchalkina, and I. V. Solomonova, 2015: Klimaticheskiye izmeneniya v Arktike, Severnoy Atlantike, rayone Kaspiya i ikh vzaimosvyaz' (Climatic changes in the Arctic, North Atlantic, Caspian region and their relationship). *Fundamental and Applied Climatology*, **1**, 183–210.
  13. Prange, M., T. Wilke, and F. P. Wesseligh, 2020: The other side of sea level change. *Communications Earth & Environment*, **1**, 69, <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00075-6>.
  14. Rahimi, M., M. Gholamalifard, A. Rashidi, B. Ahmadi, A. G. Kostianoy, and A. V. Semenov, 2022: Spatio-temporal variability of wind energy in the Caspian Sea: An ecosystem service modeling approach. *Remote Sensing*, **14**, 6263, <https://doi.org/10.3390/rs14246263>.
  15. Sapozhnikov, Ph. V., A. G. Kostianoy, P. O. Zavialov, O. Yu. Kalinina, A. K. Kurbaniyazov, N. A. Kurbaniyazov, and N. B. Muratov, 2023: Epilithic biofilms of the Eastern Caspian (Aktau Region, Kazakhstan) under conditions of falling sea level. *Ecologica Montenegrina*, **64**, 247–260, <https://dx.doi.org/10.37828/em.2023.64.9>.

16. Serykh, I. V. and A. G. Kostianoy, 2020: O vliyaniy Atlanticheskogo i Tikhogo okeanov na izmeneniye klimaticheskikh parametrov Kaspiyskogo morya (The links of climate change in the Caspian Sea to the Atlantic and Pacific Oceans), *Russian Meteorology and Hydrology*, **45** (6), 430–437, <https://doi.org/10.3103/S1068373920060060>.
17. Shapovalov, S. M., 2023: Tri goda realizatsii Desyatiletiya OON, posvyashchonnogo nauke ob okeane v interesakh ustoychivogo razvitiya (Three years of implementation of the UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development). *Journal of Oceanological Research*, **51** (4), 216–231, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(4\).9](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(4).9).
18. UNESCO-IOC, 2021: *The United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021–2030) Implementation Plan*. UNESCO, Paris, IOC Ocean Decade Series, **20**, 56, <https://oceandecade.org/publications/ocean-decade-implementation-plan/> (Accessed on 1 February 2024).
19. Vyazilov, E. D., 2021: Tsifrovaya transformatsiya gidrometeorologicheskogo obespecheniya. Tom 1: Podkhody po realizatsii (*Digital transformation of hydrometeorological support. Vol. 1: Implementation approaches*). Obninsk, VNIIGMI-MCD, 356 p.
20. Vyazilov, E. D., 2022a: Tsifrovaya transformatsiya gidrometeorologicheskogo obespecheniya. Tom 2. Podkhody po realizatsii (*Digital transformation of hydrometeorological support. Vol. 2: Application in various industries*). Obninsk, VNIIGMI-MCD, 365 p.
21. Vyazilov, E. D., 2022b: *Sostav dannykh dlya tsifrovogo dvoynika Kaspiyskogo morya (Data composition for the digital twin of the Caspian Sea)*. Abstracts, Int. conference “Russia in the UN Decade of Ocean Sciences” RTU MIREA, October 25–27, 3 p.
22. Vyazilov, E. D. and D. A. Melnikov, 2024: Povysheniye osvedomlennosti rukovoditeley predpriyatiy morskoy deyatelnosti dlya adaptatsii k opasnym i ekstremal'nym yavleniyam. (Raising awareness of managers of maritime enterprises to adapt to dangerous and extreme events). *Journal of Oceanological Research*, **52** (2), 169–182, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(2\).9](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(2).9).

Submitted 27.03.2024, accepted 18.06.2024.

**For citation:** Kostianoy, A. G., 2024: Research of the Caspian Sea in the framework of the International Project “The Caspian Sea Digital Twin”. *Journal of Oceanological Research*, **52** (2), 234–255, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(2\).12](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(2).12).