СТРУКТУРА, ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ И ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ

УДК 502.1

DOI: 10.21072/eco.2026.11.1.05

ФОРМИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМНЫХ УСЛУГ ЧЁРНОГО И АЗОВСКОГО МОРЕЙ: ТАКСОНОМИЧЕСКАЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ГИДРОБИОНТОВ, МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И ЭКОСИСТЕМНОЕ УПРАВЛЕНИЕ *

Андреенко Т. И.

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,

г. Севастополь, Российская Федерация,

e-mail: andreenko@ibss-ras.ru

Аннотация: Полузамкнутые морские экосистемы Чёрного и Азовского морей отличаются высокой чувствительностью к антропогенным и климатическим воздействиям и представляют собой модельные объекты для изучения взаимосвязей между таксономической структурой, функциональной организацией сообществ и формированием экосистемных услуг. На основе анализа литературных источников 2015–2025 гг. систематизированы подходы к качественной и количественной оценке экосистемных услуг и проанализирована роль таксономических и функциональных компонентов биоты в их обеспечении. Выделены основные лимитирующие факторы: эвтрофирование, биологические инвазии, зарегулирование речного стока и военные действия, а также рассмотрены пути снижения их влияния в рамках экосистемного подхода к управлению морскими ресурсами. Особое внимание уделено глубоководным сообществам аноксической зоны Чёрного моря, биотурбационной активности макрозообентоса и особенностям формирования экосистемных услуг в Азовском море в контексте реализации «Стратегии устойчивого развития Приазовья до 2040 года». Показано, что функциональная организация донных сообществ является определяющим фактором в поддержании регулирующих и поддерживающих услуг. Эволюционно закреплённая эвригалинность и эвритермность аборигенных видов обеспечивает высокий восстановительный потенциал экосистем. Выявлены значительные пробелы в данных: отсутствие унифицированных региональных методик оценки услуг и фрагментарность сведений о функциональной организации пелагиали и абиссали. Обоснована необходимость перехода от охраны отдельных биотопов к управлению потоками экосистемных услуг на основе количественных характеристик функциональной активности сообществ.

Ключевые слова: Чёрное море, Азовское море, полузамкнутые моря, экосистемные услуги, классификация CICES, функциональные признаки, макрозообентос, биотурбация, биологические инвазии, экосистемный подход, обзор

Введение

Чёрное и Азовское моря принадлежат к бассейну Атлантического океана и представляют собой одну из наиболее изолированных континентальных полузамкнутых морских систем. Связь Чёрного моря с открытым океаном осуществляется через каскад проливов (Босфор — Мраморное море — Дарданеллы) и внутриконтинентальные моря (Эгейское и Средиземное), что обусловливает затруднённый водообмен с океаническими водами. Азовское море, являясь мелководным шельфовым водоёмом, соединяется с Чёрным морем через Керченский пролив. Общей особенностью обоих морей выступает сочетание ограниченного водообмена с Мировым

*Работа выполнена в рамках государственного задания «Функциональные, метаболические и молекулярно-генетические механизмы адаптации морских организмов к условиям экстремальных экотопов Чёрного и Азовского морей и других акваторий Мирового океана» (2024–2026 гг., регистрационный номер: 124030100137-6).

океаном и обширной площади водосбора, принимающего речной сток с обширной территории Восточной Европы. Для Чёрного моря ключевым системообразующим фактором служит устойчивое сероводородное заражение водной толщи ниже горизонтов 150–200 м, определяющее резкую вертикальную стратификацию биогеохимических и экосистемных процессов. Совокупность указанных факторов обусловливает специфику функционирования биоты, трофической структуры и пространственной организации экосистем Черноморско-Азовского бассейна.

Азовское море характеризуется минимальными глубинами (средняя — около 7,5 м, максимальная — до 13–14 м) и пониженной солёностью. Согласно данным многолетних наблюдений, солёность Азовского моря возросла до 14–15 ‰ и сохраняется на этом уровне последние годы [Матишов, Григоренко, 2021], что выделяет его среди других морей Средиземноморско-Черноморского региона. Исторически Азовское море отличалось высокой биологической продуктивностью и играло ключевую роль в формировании рыбных запасов южных морей России и сопредельных акваторий [Matishov et al., 2005].

Таксономическое разнообразие биоты Чёрного моря существенно уступает средиземноморскому, что связано с его геологической историей и длительной изоляцией от океана. Вместе с тем по величинам биомассы и годовой продукции автотрофного и гетеротрофного звеньев черноморская экосистема в отдельные периоды сопоставима с экосистемами более открытых морей либо превосходит их. В ихтиофауне прибрежной зоны Крыма отмечено возрастание доли видов атлантическо-средиземноморского происхождения, что интерпретируется как проявление медитерранизации и адаптивной перестройки сообществ [Болтачев, Карпова, 2018]. Доля эндемичных видов в составе ихтиофауны Чёрного моря, по различным оценкам, достигает 20–25 %, что связано с плейстоцен-голоценовыми колебаниями солёности и уровня моря. Ряд эндемичных таксонов, включая черноморскую сельдь *Alosa immaculata* (Bennett, 1835), сохраняет важное промысловое значение, формируя потенциальный конфликт между задачами сохранения биоразнообразия и эксплуатацией ресурсных экосистемных услуг.

Фауна Азовского моря, как и Чёрного, образована Понто-Каспийским и Средиземноморским комплексами, но в Азовском море резко преобладают эвригалинные Понто-Каспийские виды, адаптированные к пониженной солёности и высокой гидрологической изменчивости. Несмотря на относительно низкое таксономическое богатство донных и пелагических сообществ, плотность поселений эвригалинных видов, включая промысловых рыб и беспозвоночных, в историческом прошлом достигала исключительно высоких значений, что определяло ключевую роль Азовского моря в региональной системе рыбного хозяйства [Матишов, Григоренко, 2021].

Концепция экосистемных услуг, получившая концептуальное оформление в докладе «Оценка экосистем на пороге тысячелетия» [Ecosystems and Human ... , 2005], в настоящее время является одной из ключевых теоретических основ экосистемно-ориентированного управления природопользованием и развития «голубой экономики», нацеленной на устойчивое использование морских ресурсов. Экономическая интерпретация экосистемных услуг и попытки их интегральной оценки восходят к фундаментальным работам по глобальной оценке вклада экосистем в благосостояние общества [Costanza et al., 1997], которые заложили основу для последующего развития прикладных и региональных подходов.

В качестве методологического инструмента количественной оценки экосистемных услуг в последние годы широко применяется Международная классификация экосистемных услуг (Common International Classification of Ecosystem Services — CICES), обеспечивающая иерархическую систематизацию услуг и сопоставимость результатов между различными регионами и странами [Haines-Young, Potschin, 2018]. Использование данной классификации рассматривается как необходимое условие интеграции результатов научных исследований в практику управления морскими социально-экологическими системами.

Несмотря на наличие обширной эмпирической базы по биологическим ресурсам Чёрного и Азовского морей, включающей данные о таксономическом составе, пространственном распределении и трофической структуре сообществ, исследования, обеспечивающие прямую количественную оценку экосистемных услуг в системе CICES, для данных морей практически отсутствуют. Немногочисленные оценки, выполненные для отдельных районов северо-западной части

Чёрного моря, характеризуются высокой степенью экспертной неопределённости, отсутствием унифицированных протоколов картографирования экосистемных услуг и ограниченным использованием концептуальных схем типа «давление — состояние — ответ», а также методов переноса стоимостных оценок, позволяющих адаптировать результаты исследований сходных акваторий. Для Азовского моря исследования экосистемных услуг в системе CICES до настоящего времени практически не проводились.

Цель настоящего обзора заключается в обобщении и систематизации публикаций 2015–2025 гг., посвящённых роли таксономической структуры и функциональной организации биотических сообществ в формировании и устойчивом воспроизводстве потоков экосистемных услуг в Чёрном и Азовском морях, а также в выявлении наименее изученных аспектов данной проблематики и обосновании направлений внедрения полученных результатов в практику экосистемно-ориентированного управления морским природопользованием в пределах Черноморско-Азовского бассейна.

Материалы и методы

Настоящий обзор основан на анализе научных публикаций, посвящённых структуре и функционированию экосистем, биоразнообразию и экосистемным услугам Чёрного и Азовского морей. Основной временной охват составил период 2015–2025 гг., что обусловлено активным развитием экосистемного подхода и совершенствованием методологии оценки экосистемных услуг в морских и прибрежных акваториях. Для обеспечения концептуальной преемственности дополнительно привлечены фундаментальные работы более ранних десятилетий, заложившие основы современных представлений о структуре, продуктивности и функционировании биоценозов Черноморско-Азовского бассейна. Всего было проанализировано более 150 публикаций, включая статьи в рецензируемых журналах, монографии, материалы конференций и официальные отчёты международных проектов.

В обзор включены публикации, посвящённые таксономической и функциональной структуре морских сообществ, пространственной организации и продуктивности экосистем, концепции и классификации экосистемных услуг, методологическим подходам к их количественной и качественной оценке. Отбор источников осуществлялся с приоритетом работ, опубликованных в рецензируемых международных и отечественных журналах, а также в официальных отчётах международных научных программ.

Методологическую основу анализа экосистемных услуг составили ключевые концептуальные и классификационные работы, включая фундаментальные исследования по экономической интерпретации экосистемных функций [Costanza et al., 1997], материалы «Оценки экосистем на пороге тысячелетия» [Ecosystems and Human ... , 2005], инициативу TEEB, а также современные разработки в области стандартизации оценки экосистемных услуг, прежде всего Международная классификация экосистемных услуг (Common International Classification of Ecosystem Services — CICES) [Haines-Young, Potschin, 2018].

В ходе исследования применялись следующие методы анализа:

- аналитический обзор литературы использовался для выявления основных направлений исследований и обобщения данных о категориях экосистемных услуг, характерных для Чёрного и Азовского морей;

- сравнительно-географический анализ позволил сопоставить особенности формирования и обеспеченности экосистемными услугами в пределах двух морских бассейнов с учётом различий их гидрологического режима, морфометрических характеристик и степени антропогенной нагрузки;

- метод научной систематизации применялся для группировки литературных источников по тематическим блокам: теоретические основания концепции экосистемных услуг, методологические подходы к их оценке, категориальный состав экосистемных услуг и факторы, лимитирующие их устойчивое воспроизводство;

- критический анализ литературы был направлен на выявление противоречий в существующих оценках экосистемных услуг, а также на определение наименее изученных аспектов проблемы, связанных с отсутствием унифицированных методических подходов и недостаточной сопоставимостью результатов для различных районов Черноморско-Азовского бассейна.

Результаты и обсуждение

Генезис и эволюция концепции экосистемных услуг. Концепция экосистемных услуг формировалась поэтапно, отражая углубление научных представлений о взаимосвязи между состоянием природных систем и благосостоянием человека. На ранних этапах развитие данной идеи опиралось на эмпирические и прикладные представления о полезности природных компонентов. Ещё в середине XX века экологи, включая Ю. Одума [Odum, 1959] и отечественных исследователей [Куражковский, 1969], заложили основы представлений о «работе» природы и «полезных функциях» экосистем, однако лишь во второй половине XX века начался переход к их систематическому теоретическому и количественному осмыслению. Современный этап развития концепции характеризуется наличием формализованных классификаций и интеграцией экосистемных услуг в системы международного эколого-экономического учёта.

Ключевым этапом институционализации концепции экосистемных услуг стала работа Costanza с соавторами (1997), в которой впервые предпринята масштабная глобальная экономическая оценка вклада экосистем в благосостояние общества. Авторами была рассчитана совокупная среднегодовая ценность экосистемных услуг биосферы в размере 33 трлн долл. США (в ценах 1995 г.) при диапазоне оценок от 16 до 54 трлн долл., что существенно превышало величину мирового валового продукта того периода. Несмотря на последующую критику методологических допущений и высокой степени неопределённости стоимостных оценок, именно эта работа стала отправной точкой для формирования самостоятельного междисциплинарного научного направления, ориентированного на интеграцию экологических и экономических подходов.

Основополагающим этапом развития концепции стала реализация международного проекта «Оценка экосистем на пороге тысячелетия» (Millennium Ecosystem Assessment, 2001–2005, MA), выполненного под эгидой ООН с участием более 1300 экспертов из 95 стран. В рамках MA была предложена четырёхчастная классификация экосистемных услуг, включающая обеспечивающие, регулирующие, поддерживающие и культурные категории. Принципиальным теоретическим результатом MA можно считать формализованное установление причинно-следственных связей между изменениями состояния экосистем и параметрами человеческого благосостояния, что придало концепции прикладную значимость и обеспечило её широкое внедрение в практику природоохранной политики и управления.

Дальнейшее развитие методологического аппарата экосистемных услуг в Российской Федерации связано с инициативой TEEB-Russia, реализованной при поддержке Федерального агентства по охране природы Германии (BfN) и Минприроды РФ [Bukvareva, Zamolodchikov, Grunewald, 2019]. В рамках TEEB-Russia был разработан методологический подход к национальной оценке экосистемных услуг, адаптированный к российским условиям и задачам принятия управленческих решений. Апробированы методы прямой и косвенной количественной оценки экосистемных услуг в биофизических показателях, а также балльной оценки, что способствовало практическому применению экосистемного подхода в региональном и национальном планировании [Bukvareva, Zamolodchikov, Grunewald, 2019].

Важным этапом развития концепции стало создание в 2012 г. Межправительственной научно-политической платформы по биоразнообразию и экосистемным услугам (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services — IPBES). В рамках её концептуальной модели была предложена альтернативная система категоризации — «вклад природы людям» (Nature's Contributions to People — NCP), ориентированная на учёт множественности систем ценностей, культурных контекстов и форм знаний. Сохраняя преемственность с подходами MA, концепция IPBES сместила акцент с преимущественно экономической интерпретации экосистемных услуг на их более широкий социокультурный смысл. Критики классического экосистемного подхода указывают на его излишнюю антропоцентричность и коммодификацию природы, т. е. сведение ценности природы исключительно к рыночным категориям. Подход NCP, напротив, признаёт множественность способов взаимодействия человека и природы, включая духовные, эстетические и культурные аспекты, что, с одной стороны, расширило аналитические возможности, а с другой — значительно усложнило её количественную формализацию и применение в стандартизированных оценках [Díaz et al., 2015; Díaz et al., 2018].

В настоящее время в международных статистических и прикладных исследованиях наиболее широко применяется Международная классификация экосистемных услуг (Common International Classification of Ecosystem Services — CICES), разрабатываемая с 2008 г. под эгидой Европейского агентства по окружающей среде. CICES представляет собой иерархическую таксономическую систему, обеспечивающую сопоставимость оценок экосистемных услуг между различными странами и типами экосистем. Принципиальным преимуществом CICES является её методологическая совместимость с системой эколого-экономического учёта (System of Environmental-Economic Accounting — SEEA), что позволяет интегрировать показатели потоков экосистемных услуг во вспомогательные счета национальной статистики и формирует основу для практической реализации принципов зелёной экономики [Haines-Young, Potschin, 2018; Ecosystem Accounting].

Таким образом, эволюция концепции экосистемных услуг отражает переход от обобщённых глобальных оценок к стандартизированным и операционализируемым классификационным системам, что создаёт необходимую методологическую основу для анализа роли гидробионтов в формировании потоков экосистемных услуг в Чёрном и Азовском морях.

Методологические подходы к оценке экосистемных услуг и их применимость в Черноморско-Азовском регионе. Современная методология количественной оценки экосистемных услуг основывается на нескольких группах методов, различающихся по типу используемой информации и степени вовлечённости субъективных предпочтений. К числу базовых относятся экономические методы, использующие наблюдаемые цены товаров и услуг, обращающихся на рынке, включая продукцию рыболовства в качестве обеспечивающей услуги и плату за рекреационное использование прибрежных территорий как проявление культурных услуг. Применимость данных методов ограничена тем, что они отражают лишь узкий спектр экосистемных функций, имеющих прямые рыночные аналоги.

Методы выявленных предпочтений, включая анализ транспортно-путевых затрат и гедонистическое ценообразование, позволяют реконструировать неявную ценность экосистемных услуг на основе анализа поведения пользователей на смежных рынках. Эти подходы используют преимущественно при оценке рекреационных и эстетических услуг, однако требуют значительных массивов эмпирических данных, а результаты их применения существенно зависят от пространственной неоднородности исследуемых акваторий. Методы заявленных предпочтений, такие как условная оценка и моделирование выбора, основаны на анализе гипотетических сценариев и предоставляют возможность оценки нематериальных и нерыночных экосистемных услуг, включая поддержание биоразнообразия и экосистемную устойчивость [Barbier, 2017].

Дополнением к указанным подходам выступают методы переноса стоимостных оценок, предполагающие адаптацию ранее полученных результатов для экосистем со сходными природными и социально-экономическими характеристиками. Несмотря на практическую привлекательность, применение данных методов в морских экосистемах сопряжено с высокой степенью неопределённости, обусловленной ограниченной сопоставимостью гидрологических режимов, трофической структуры и уровня антропогенной нагрузки [Benefit Transfer … , 2015]. Потенциальным ресурсом для повышения надёжности адаптации существующих оценок могут служить специализированные базы данных, такие как EVRI (Environmental Valuation Reference Inventory). Вместе с тем, по имеющейся информации, использование таких баз данных для оценки экосистемных услуг Чёрного и Азовского морей пока не получило широкого распространения.

Принципиальное значение для корректной оценки морских экосистемных услуг имеет разграничение потоков услуг и ресурсных запасов. Так, ежегодный вылов рыбы представляет собой поток обеспечивающей услуги, тогда как биомасса промыслового стада является запасом природного капитала, лимитирующим устойчивый уровень изъятия. Смешение указанных категорий приводит к систематическим ошибкам в экономических и управленческих оценках, формируя предпосылки для превышения воспроизводственного потенциала популяций, последующего сокращения численности промысловых видов и деградации трофической структуры экосистем. Данное разграничение является принципиальным в рамках классификации CICES, ориентированной на учёт именно потоков экосистемных услуг, и согласуется с подходами, принятыми в системе эколого-экономического учёта (SEEA) [Ecosystem Accounting].

Наряду с экономическими методами, существенное значение для оценки экосистемных услуг, особенно регулирующих и поддерживающих категорий, имеет подход, основанный на прямых измерениях экосистемных процессов (биофизических индикаторах). В морских экосистемах к таким измерениям относятся оценка первичной продукции фитопланктона как основы формирования всех трофических цепей, определение интенсивности деструкции органического вещества в донных отложениях, количественная характеристика биотурбационной активности макрозообентоса, влияющей на биогеохимические циклы, а также оценка ёмкости местообитаний для промысловых видов [Haines-Young, Potschin, 2018]. Данные методы позволяют перейти от декларативных описаний потенциальных услуг к их количественной характеристике в физических единицах (тонны углерода, объём профильтрованной воды, площадь зарослей макрофитов), что создаёт основу для последующей экономической оценки либо для непосредственного использования в управленческих решениях.

Существенный вклад в осмысление роли биоразнообразия в формировании экосистемных услуг внесли Масе с соавторами (2012), показавшие, что биоразнообразие может одновременно выступать в роли регулятора экосистемных процессов, конечной услуги, непосредственно потребляемой человеком, и самостоятельного ресурса, обладающего внутренней ценностью. Дальнейшее развитие данный подход получил в рамках концептуальной модели IPBES, где биоразнообразие рассматривается как один из ключевых компонентов «вклада природы людям» (Nature's Contributions to People — NCP), а акцент смещается с единственной экономической системы ценностей на их множественность [Díaz et al., 2015; Díaz et al., 2018]. При этом расширение концептуальной схемы сопровождается усложнением количественной операционализации результатов, что особенно критично для морских экосистем, характеризующихся высокой пространственно-временной изменчивостью и труднодоступностью для прямых наблюдений.

Применительно к Чёрному и Азовскому морям методологическая база оценки экосистемных услуг в настоящее время остаётся фрагментарной и не в полной мере соответствует требованиям, предъявляемым к современным международным исследованиям. В регионе не сформированы унифицированные протоколы картографирования экосистемных услуг, адаптированные

к специфике полузамкнутых морей, ограничено применение индикаторов состояния экосистем в рамках концепции «давление — состояние — ответ» (DPSIR), а исследования, направленные на оценку готовности населения платить за сохранение морского биоразнообразия, носят эпизодический характер. К причинам сложившейся ситуации относятся: отсутствие регулярных программ комплексного гидробиологического мониторинга, охватывающих всю акваторию обоих морей, методические различия между национальными научными школами (российской, украинской, турецкой, румынской, болгарской), а также сокращение межгосударственного научного сотрудничества в последние годы.

Для Азовского моря исследования экосистемных услуг в системе CICES до настоящего времени практически не проводились, что в сочетании с высокой скоростью трансформации его экосистем (осолонение, эвтрофирование, биологические инвазии) [Матишов, Григоренко, 2021] формирует критический пробел в знаниях и определяет необходимость разработки региональных методических протоколов, адаптированных к специфике данных акваторий.

Экосистемные услуги Чёрного и Азовского морей: категориальный состав и современное состояние. В современных региональных исследованиях экосистемных услуг Чёрного и Азовского морей в качестве аналитической основы используется четырёхчастная классификация, предложенная в рамках «Оценки экосистем на пороге тысячелетия» (Millennium Ecosystem Assessment — MA): обеспечивающие, регулирующие, поддерживающие и культурные услуги [Ecosystems and Human ... , 2005]. Такая структура сохраняет преемственность с ранними исследованиями и позволяет комплексно анализировать функциональное состояние морских экосистем.

В то же время в международной практике учёта и сопоставления оценок экосистемных услуг наиболее широко применяемой классификацией является Международная классификация экосистемных услуг (Common International Classification of Ecosystem Services — CICES), в которой поддерживающие услуги не рассматриваются как конечные, а интерпретируются как промежуточные экосистемные процессы и функции, позволяющие формировать обеспечивающие, регулирующие и культурные услуги [Haines-Young, Potschin, 2018]. Так, первичная продукция и круговорот биогенных элементов в логике CICES относятся к промежуточным процессам, тогда как воспроизводство промысловых популяций может рассматриваться как часть обеспечивающих услуг через поддержание запасов. Поскольку подавляющее большинство эмпирических региональных исследований Чёрного и Азовского морей выполнено в логике MA, а поддерживающие услуги имеют ключевое значение для анализа деградационных процессов и устойчивости экосистем, в настоящем обзоре сохранена четырёхчастная структура MA с одновременным учётом принципиальных методологических ограничений при сопоставлении результатов с классификацией CICES.

Обеспечивающие экосистемные услуги Чёрного и Азовского морей представлены прежде всего промыслом гидробионтов и выращиванием объектов марикультуры. В Черноморском бассейне традиционно доминирует промысел пелагических и донных рыб: хамсы *Engraulis encrasicolus* (Linnaeus, 1758), шпрота *Sprattus sprattus* (Linnaeus, 1758), ставриды *Trachurus mediterraneus* (Steindachner, 1868), калкана *Scophthalmus maeoticus* (Pallas, 1814) и др. В последние десятилетия значительное развитие получило культивирование двустворчатых моллюсков, прежде всего средиземноморско-черноморской мидии *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) и тихоокеанской устрицы *Magallana gigas* (Thunberg, 1793). Марикультура рассматривается как важный компонент обеспечивающих услуг, обладающий потенциалом частичной компенсации снижения природной продуктивности и одновременно выполняющий регулирующие функции (биогенная фильтрация).

В Азовском море обеспечивающие услуги исторически основывались на промысле осетровых — русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii* (Brandt & Ratzeburg, 1833), севрюги *Acipenser stellatus* (Pallas, 1771), белуги *Huso huso* (Linnaeus, 1758); судака *Sander lucioperca* (Linnaeus, 1758); леща *Abramis brama* (Linnaeus, 1758) и тарани *Rutilus heckelii* (Nordmann, 1840). К настоящему времени вклад этих видов в общий объём вылова резко сократился вследствие деградации нерестилищ, зарегулирования речного стока и прогрессирующего осолонения морской системы [Матишов, Григоренко, 2021]. На этом фоне формируется альтернативная ресурсная база, связанная с промыслом креветок (преимущественно *Palaemon adspersus* Rathke, 1837 и *P. elegans* Rathke, 1837), моллюска-вселенца анадары *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) [Ревков, 2024], а также добычей кормового зоопланктона — каланипеды *Calanipeda aquaedulcis* (Kritschagin, 1873) и артемии *Artemia* spp.

Популяции артемии *Artemia* spp. в гиперсолёных водоёмах Черноморско-Азовского региона играют многоаспектную роль в формировании экосистемных услуг. Обеспечивающие услуги представлены промыслом цист артемии, используемых в аквакультуре. Поддерживающие услуги реализуются через участие артемии в трофических сетях как кормовой базы для водоплавающих птиц и некоторых видов рыб. Регулирующие услуги связаны с фильтрационной активностью артемии, влияющей на качество воды и трофический статус водоёмов. Культурные услуги включают научно-образовательную ценность уникальных адаптаций артемии (криптобиоз цист, полиморфизм, поведенческие реакции). Исследования крымских популяций показали, что продуктивность, размерная структура и поведение артемии, от которых напрямую зависит эффективность реализации этих услуг, определяются комплексом факторов, включая солёность и пресс хищников. Данные закономерности необходимо учитывать при оценке ресурсного потенциала и устойчивости этих экосистем [Anufriieva, Shadrin, 2014; Shadrin, Anufriieva, 2017].

Освоение альтернативных ресурсов, включая промысел анадары, креветок, каланипеды и артемии, не компенсирует в полной мере сокращение традиционных рыбных промыслов. Эти объекты существенно уступают им как по вкладу в устойчивость экосистем, так и по социально-экономической значимости. Промысел анадары, несмотря на наличие ресурсной базы, ограничен неразвитостью технологий переработки и отсутствием устойчивого внутреннего спроса, а потенциал использования артемии и других видов зоопланктона также реализован лишь частично.

Регулирующие услуги в Чёрном и Азовском морях включают секвестрацию углерода, биогенную очистку вод, регуляцию качества атмосферного воздуха, стабилизацию береговой линии и участие в круговороте биогенных элементов. Для Черноморского бассейна отдельные количественные и полуколичественные оценки регулирующих услуг выполнялись в рамках международных проектов, однако опубликованные данные носят фрагментарный характер и требуют дополнительной верификации.

Для Азовского моря количественные оценки регулирующих услуг, сопоставимые с международными классификациями, практически отсутствуют. Это относится, в частности, к таким услугам, как берегозащита и биогенная фильтрация, несмотря на их потенциально высокую значимость в условиях нарастающей эрозии берегов и эвтрофирования. Вместе с тем в литературе имеются отдельные оценки фильтрационной активности массовых видов двустворчатых моллюсков — мидии *Mytilus galloprovincialis* и анадары *Anadara kagoshimensis*, которые могут быть пересчитаны в показатели регулирующих услуг при соответствующей методической проработке. Таким образом, речь идёт не столько об отсутствии самих услуг, сколько о дефиците эмпирических данных, собранных и обработанных в методологически сопоставимом ключе.

Поддерживающие услуги, включающие первичную продукцию, круговорот биогенных элементов, формирование местообитаний и воспроизводство гидробионтов, играют ключевую роль в функционировании экосистем обоих морей. В Чёрном море важнейшими районами реализации

поддерживающих услуг являются прибрежные и переходные акватории, испытывающие влияние речного стока, включая лиманы Северо-Западного Причерноморья, плавни Дуная, Днестра и Днепра, а также Прикерченский район. Эти зоны обеспечивают нерест, нагул и ранние этапы онтогенеза значительной части ихтиофауны [Болтачев, Карпова, 2018]. В последние десятилетия отмечается деградация нерестилищ в ряде лиманов вследствие зарегулирования стока и эвтрофирования, что ведёт к сокращению воспроизводственного потенциала популяций полупроходных и пресноводных видов.

В Азовском море деградация поддерживающих услуг носит устойчивый и системный характер. Зарегулирование стока Дона и других рек в сочетании с климатически и антропогенно обусловленным осолонением привели к глубокой трансформации экосистемы. По данным многолетних наблюдений, к началу 2020-х годов среднегодовая солёность Азовского моря достигла 14–15 ‰, приблизившись к показателям Чёрного моря [Матишов, Григоренко, 2021]. Это сопровождается смещением ареалов морских видов на север, проникновением новых таксонов в Таганрогский залив и локальной утратой естественного воспроизводства ряда полупроходных рыб, включая судака и тарань. Утрата традиционных нерестилищ в низовьях Дона лишь частично компенсируется искусственным воспроизводством на рыбоводных заводах.

Культурные экосистемные услуги — рекреационные, научно-образовательные и историко-культурные — в Черноморском бассейне обладают признанно высоким потенциалом, однако их количественная оценка и систематическая инвентаризация остаются фрагментарными. В международной практике для оценки рекреационных услуг применяются методы транспортно-путевых затрат и условной оценки, которые могли бы быть адаптированы для черноморских курортных зон при наличии соответствующих социологических исследований.

Развитие рекреационного и экологического туризма, в том числе на Крымском побережье, ограничено институциональными факторами: отсутствием утверждённых на федеральном уровне нормативов предельно допустимых рекреационных нагрузок, недостаточной инфраструктурой и несформированной системой мониторинга рекреационного воздействия. Для Азовского моря оценки культурных экосистемных услуг в форматах, сопоставимых с MA или CICES, в настоящее время отсутствуют, что отражает общий дефицит исследований нематериальных аспектов взаимодействия общества с экосистемами данного бассейна.

Таким образом, для Чёрного моря сформирована методологическая основа оценки экосистемных услуг, прежде всего обеспечивающих и регулирующих, тогда как поддерживающие услуги демонстрируют устойчивый тренд к деградации. Для Азовского моря сохраняется критический дефицит данных практически по всем категориям экосистемных услуг, особенно в части регулирующих и культурных. Реализация «Стратегии устойчивого развития Приазовья до 2040 года» [Стратегия ... , 2025] может создать нормативные и организационные предпосылки для восполнения существующих пробелов и перехода к экосистемно-ориентированному управлению морской системой. Однако эффективность стратегии будет напрямую зависеть от того, насколько быстро удастся развернуть систему регулярного мониторинга и оценки всех категорий экосистемных услуг на основе унифицированных методических подходов.

Функциональное биоразнообразие макрозообентоса и его роль в формировании экосистемных услуг. Наиболее существенный прогресс в эмпирическом подтверждении связи между функциональной структурой сообществ макрозообентоса и реализацией экосистемных функций в Чёрном море достигнут в цикле работ Chevalier с соавторами [Chevalier et al., Trait modeling … , 2025; Chevalier et al., A macrozoobenthic … , 2025]. Эти исследования представляют собой первую для Черноморского бассейна попытку пространственного моделирования распределения функциональных признаков макрозообентоса с использованием нейросетевых алгоритмов и методов машинного обучения, что позволило выявить нелинейные зависимости, недоступные при традиционном статистическом анализе [Chevalier et al., Trait modeling … , 2025].

Эмпирической основой послужил массив данных 210 станций северо-западного шельфа Чёрного моря за период 1995–2017 гг. В работе использован функциональный подход к биоразнообразию, при котором виды характеризуются набором признаков, определяющих их влияние на функционирование экосистемы (например, глубина зарывания и подвижность). На основе точечных наблюдений выполнено непрерывное картографирование распределения функциональных признаков как прокси-показателей экологических процессов (биотурбация, биодепозиция), предшествующих формированию экосистемных функций [Chevalier et al., Trait modeling … , 2025].

Классификация таксонов осуществлялась на основе совокупности функциональных признаков, включая максимальную глубину зарывания в осадок, локомоторную активность и характер взаимодействия с донным субстратом. Ведущими факторами, определяющими пространственное распределение функциональных групп макрозообентоса, являются концентрация растворённого кислорода в придонном слое и поток органического углерода ко дну [Chevalier et al., Trait modeling … , 2025]. Наиболее значимыми для прогнозирования экосистемных функций оказались такие признаки, как глубина зарывания и биотурбационная активность, которые напрямую связаны с реминерализацией органического вещества, аэрацией осадка и захоронением углерода, то есть с реализацией регулирующих экосистемных услуг.

В районах интенсивной аккумуляции взвешенного вещества, например в приустьевой области Дуная, доминируют сообщества с высокой биотурбационной активностью, обеспечивающей аэрацию осадка, интенсификацию микробно опосредованной денитрификации и захоронение органического углерода, что формирует основу регулирующих экосистемных услуг. В зонах устойчивой гипоксии функциональное разнообразие снижается до минимальных значений, а биотурбационная функция практически утрачивается [Chevalier et al., Trait modeling … , 2025; Chevalier et al., A macrozoobenthic … , 2025].

Для Крымского побережья и Кавказского шельфа многолетние наблюдения (1980–2015 гг.) показывают, что функциональное разнообразие сообществ мидийно-фазеолиновых илов сохраняется относительно стабильным, однако восстановление биотурбационной функции после гипоксических событий требует от 3 до 5 лет. Многолетние исследования на Филлофорном поле Зернова (северо-западная часть Чёрного моря) показали, что после кризисного сокращения биомассы макрозообентоса (до 7 раз в конце 1970-х гг.) его восстановление до исходного уровня происходит лишь в посткризисный период и сопровождается восстановлением популяций видов-доминантов, таких как мидия *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819). Анализ многолетней динамики за период 1957–2013 гг. свидетельствует о фактическом восстановлении средней биомассы макрозообентоса до уровня 1957–1960 гг. к началу XXI века, при этом биомасса *M. galloprovincialis* достигает 73 % от общей биомассы макрозообентоса [Revkov et al., 2018]. Предположительно, аналогичная динамика характерна и для возврата к исходным показателям биотурбационной активности сообществ.

Физиологические и биохимические механизмы адаптации фильтраторов к гипоксии и другим стрессовым факторам подробно исследованы в ряде работ. В частности, установлено, что различия в толерантности к окислительному стрессу у *Anadara kagoshimensis* и аборигенной *Mytilus galloprovincialis* обусловлены особенностями тканевого метаболизма и состояния антиоксидантного комплекса [Gostyukhina, Andreenko, 2019]. Эти исследования показали, что анадара обладает более эффективными механизмами защиты от окислительного стресса, что способствует её устойчивости в трансформируемых условиях.

В условиях острой экспериментальной аноксии у *A. kagoshimensis* выявлены специфические перестройки тканевого метаболизма, позволяющие виду поддерживать энергетический гомеостаз при полном отсутствии кислорода [Солдатов и др., 2025]. Сравнительный анализ тканевого метаболизма у анадары и черноморской мидии подтвердил наличие у вселенца уникальных физиологических адаптаций, включая особенности функционирования ферментных систем, что обеспечивает его конкурентные преимущества в условиях гипоксии и сероводородного заражения [Солдатов и др., 2025].

В частности, наличие гемоглобина у *A. kagoshimensis* обеспечивает ей возможность существовать в условиях гипоксии, недоступных для большинства других двустворчатых моллюсков, что способствует её экспансии в районах с ухудшенным кислородным режимом. Широкая экологическая валентность этого вида позволяет ему сохранять функциональную активность в условиях колебаний абиотических факторов, поддерживая тем самым регулирующие функции экосистемы. Таким образом, комплекс физиолого-биохимических адаптаций объясняет успешную инвазию и широкое распространение *A. kagoshimensis* в Азово-Черноморском бассейне.

Работы Болтачёвой и Мазлумян (2001) и Фроленко с соавтором (2020) показали, что возрастная и размерная структура поселений донакса *Chamelea gallina* (Linnaeus, 1758) определяет интенсивность фильтрации. Сравнение с данными 1960-х гг. свидетельствует о снижении биомассы макрозообентоса в сообществе *Ch. gallina* до 93 г/м² и руководящего вида до 41 г/м², что связано с преобладанием в популяциях моллюсков мелких особей и отражает деградацию фильтрационного потенциала [Фроленко, Живоглядова, 2020]. Участившиеся в последние десятилетия эпизоды заморов в северо-западной части Чёрного моря приводят к элиминации крупных особей, и восстановление популяций происходит за счёт молоди, что надолго снижает фильтрационную способность сообществ.

Для Азовского моря количественные данные о функциональной структуре макрозообентоса крайне ограничены. Выявлено, что осолонение вызывает смену доминирующих жизненных форм: зарывающиеся олигохеты и хирономиды вытесняются поверхностно-обитающими двустворчатыми моллюсками — сердцевидкой *Cerastoderma glaucum* (Bruguière, 1789) и митилястером *Mytilaster lineatus* (Gmelin, 1791), что трансформирует биогеохимические циклы на границе вода — дно и влияет на регулирующие услуги [Матишов, Григоренко, 2021]. Смена жизненных форм ведёт также к изменению кормовой базы бентосоядных рыб (бычков, осетровых), что непосредственно сказывается на обеспечивающих услугах рыболовства.

Проникновение креветки *Crangon crangon* (Linnaeus, 1758) в Таганрогский залив отражает продолжающееся осолонение и перестройку трофических сетей, что влияет на кормовую базу рыб. Появление *C. crangon*, являющегося важным кормовым объектом для осетровых и судака, может частично компенсировать сокращение численности традиционных кормовых организмов.

Таким образом, функциональная структура макрозообентоса, а не видовое богатство как таковое, выступает непосредственным фактором реализации экосистемных функций. Учёт этого положения необходим для параметризации моделей и прогнозирования изменений потоков экосистемных услуг под воздействием климатических и антропогенных факторов. Выявленные закономерности, основанные на анализе донных сообществ, могут быть экстраполированы на пелагические экосистемы, где функциональная структура планктонных сообществ также играет определяющую роль в формировании потоков вещества и энергии.

Адаптационные стратегии ихтиофауны и пелагических сообществ в контексте устойчивости экосистемных услуг. Ключевой особенностью ихтиофауны Чёрного и Азовского морей, определяющей её реакцию на антропогенные и климатические воздействия, является исторически сформированная адаптация к широкому диапазону абиотических факторов. Эволюционно закреплённые эвригалинность и эвритермность аборигенных видов представляют собой фундаментальное свойство черноморско-азовской биоты, обеспечивающее её устойчивость в условиях высокой природной изменчивости [Грезе, 1977; Грезе, 1979; Ревков, 2016; Болтачев, Карпова, 2018; Chevalier et al., Trait modeling … , 2025]. Данный адаптационный потенциал обусловливает высокую способность экосистемы к восстановлению даже после значительных антропогенных или климатических воздействий, что имеет прямое отношение к поддержанию регулирующих и обеспечивающих экосистемных услуг.

Физиологические и биохимические механизмы адаптации к стрессовым факторам. Физиологические механизмы адаптации гидробионтов к стрессовым факторам изучаются с использованием биохимических маркеров функционального состояния. В частности, исследования холинэстеразной активности у черноморских рыб демонстрируют, что этот фермент может служить индикатором стрессового состояния организмов в ответ на антропогенное загрязнение [Малахова и др., 2020]. Поскольку холинэстеразы участвуют в регуляции нервной деятельности, их активность отражает способность гидробионтов выполнять свои экосистемные функции.

Более детальные исследования физиологических механизмов адаптации черноморских гидробионтов к экстремальным факторам среды демонстрируют сложные и видоспецифичные реакции на клеточном и тканевом уровнях. В качестве модельного объекта часто выступает морской ёрш *Scorpaena porcus* (Linnaeus, 1758), что связано с его высокой экологической пластичностью и способностью обитать в условиях антропогенного загрязнения и изменчивой среды.

Изучение реакции антиоксидантной системы на острую гипоксию показало, что в эритроцитах *S. porcus* происходит активация защитных ферментов. В частности, наблюдается увеличение активности каталазы (в 1,5–2 раза) и супероксиддисмутазы (в 2,5–3 раза), что сопровождается ростом уровня метгемоглобина в крови. Эти изменения свидетельствуют о развитии окислительного стресса и мобилизации антиоксидантной защиты для поддержания функциональности крови в условиях дефицита кислорода [Солдатов и др., 2021; Soldatov et al., 2021].

Ответ на холодовой шок (резкое снижение температуры) оказался тканеспецифичным и также вовлекает антиоксидантную систему. В жабрах и белых мышцах *S. porcus* при холодовом шоке активность каталазы и супероксиддисмутазы снижается, в то время как в печени, напротив, значительно возрастает (на 67–76 %), указывая на её ключевую роль в нейтрализации активных форм кислорода. Наибольший уровень окислительного стресса (по содержанию ТБК-активных продуктов) регистрируется именно в печени. Важно отметить, что в головном мозге исследуемые показатели оставались на уровне контроля, что отражает высокую устойчивость вида к холодовому стрессу и согласуется с его способностью существовать в зонах апвеллинга в Чёрном море [Shalagina et al., 2025].

Эти данные дополняют представления об адаптивных стратегиях ихтиофауны. Показано, что биохимические маркеры, такие как активность антиоксидантных ферментов и уровень метгемоглобина, являются чувствительными индикаторами физиологического состояния рыб при действии как гипоксии, так и температурных аномалий. Видоспецифичность этих реакций, включая способность к мобилизации защитных систем в критических органах (печени) и устойчивость жизненно важных систем (головного мозга), обеспечивает выживание и поддержание популяций в условиях растущей климатической и антропогенной нагрузки.

Адаптации промысловых видов и их роль в формировании экосистемных услуг. Способность гидробионтов к адаптации в изменчивой среде непосредственно определяет их роль в формировании и поддержании экосистемных услуг, прежде всего обеспечивающих (рыболовство). Исследования биоэнергетических показателей черноморской хамсы *Engraulis encrasicolus* (Linnaeus, 1758) показывают, что содержание липидов в теле рыб имеет чётко выраженную сезонную динамику с минимумом в апреле — мае и максимумом в октябре, что напрямую определяет успешность зимовки и, соответственно, величину промыслового запаса [Войкина и др., 2021; Войкина и др., 2023]. Выявление морфометрических признаков, позволяющих дифференцировать популяции азовской и черноморской хамсы, имеет важное значение для управления промысловыми запасами в условиях осолонения Азовского моря: сохранение локальных популяционных группировок обеспечивает устойчивость обеспечивающих услуг даже при трансформации среды.

Исследования раннего онтогенеза массовых видов предоставляют ключевую информацию о воспроизводстве и пополнении запасов, т. е. о поддерживающих экосистемных услугах. Чесалин (2023) разработал метод автоматизированного анализа изображений отолитов с применением нейросетевых технологий для определения возраста азовской хамсы *Engraulis encrasicolus maeoticus*. Данный подход позволяет оперативно проводить мониторинг воспроизводства, что критически важно для своевременной корректировки промысловых нагрузок и сохранения поддерживающих услуг.

Многолетний мониторинг фиксирует структурные перестройки ихтиоценозов, имеющие прямое отношение к культурным и обеспечивающим услугам. В прибрежной зоне Крыма отмечено возрастание доли видов с высокой экологической валентностью, преимущественно атлантическо-средиземноморского происхождения, что интерпретируется как проявление медитерранизации и адаптивной перестройки сообществ [Болтачев, Карпова, 2018]. Для рекреационного рыболовства и экологического туризма появление новых видов может иметь как положительное (повышение видового разнообразия), так и отрицательное (вытеснение аборигенных видов) значение, что требует учёта при планировании культурных услуг.

Изучение локальных популяций у побережья Крыма позволяет оценивать их роль в трофических сетях и вклад в поддержание общего биоразнообразия, что значимо для сохранения как обеспечивающих, так и культурных услуг. Исследования атерины *Atherina boyeri* (Risso, 1810) в акватории юго-западного Крыма показали, что этот короткоцикличный эвригалинный вид характеризуется соотношением самцов и самок 1,00 : 1,38 с сокращением доли самцов в старших возрастных группах. Предельный возраст у обоих полов составляет четыре года, при этом максимальная длина и масса самок выше, чем у самцов (12,3 см и 9,25 г против 10,8 см и 7,65 г). Установлено, что темп роста атерины из акватории юго-западного Крыма выше, чем у эстуарных и лагунных форм, обитающих в условиях лабильной солёности, но ниже, чем у морских и океанических популяций [Куцын, Самотой, 2020]. Эти данные важны для понимания адаптивного потенциала вида в условиях изменчивой среды прибрежных вод.

Особого внимания заслуживает изучение каменного окуня *Serranus scriba* (Linnaeus, 1758) — теплолюбивого средиземноморского вида, синхронного гермафродита. В прилегающей к Крыму акватории Чёрного моря зарегистрирована самая крупная для бассейна особь этого вида: общая длина 26,1 см, масса 265,1 г, возраст 15 лет. Анализ размерно-возрастной структуры позволил рассчитать параметры уравнения Берталанфи (асимптотическая длина 28,3 см, константа роста 0,17 год$^{-1}$) и установить, что созревание 50 % особей происходит при длине (12,0 ± 0,2) см на третьем году жизни [Куцын и др., 2023]. Важным результатом является вывод о том, что географическая изменчивость параметров жизненного цикла этого вида выражена слабо: каменный окунь Чёрного моря по возрасту, размерам и росту мало отличается от представителей вида в Эгейском и Адриатическом морях, при этом наиболее крупные и быстрорастущие формы встречаются в условиях низких широт (у побережья Египта и Канарских островов).

Успешная натурализация *S. scriba* в Крыму служит индикатором потепления прибрежных вод, что имеет прямое отношение к мониторингу климатических изменений и их влиянию на структуру ихтиоценозов. Для рекреационного рыболовства и экологического туризма появление этого вида может иметь как положительное (повышение видового разнообразия), так и отрицательное (изменение трофических связей) значение, что требует учёта при планировании культурных услуг.

В Азовском море хронический дефицит пресного стока вызывает устойчивый тренд повышения солёности — с 9–10 ‰ в 1970-х гг. до 14–15 ‰ в 2020-х гг., что сопровождается проникновением черноморских видов — мидии *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819), анадары *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906), креветки *Crangon crangon* (Linnaeus, 1758) — и сокращением

ареалов аборигенных понто-каспийских видов [Матишов, Григоренко, 2021]. Эти изменения приводят к перестройке структуры промысловых уловов: падение вылова судака и леща частично компенсируется ростом добычи анадары и креветки, однако последние требуют иной технологии переработки и сбыта, что создаёт социально-экономические риски. Продвижение черноморских видов в северном направлении, вплоть до Таганрогского залива, отражает продолжающуюся трансформацию экосистемы и требует пересмотра стратегии управления рыболовством в направлении адаптации к новым условиям.

Таким образом, биоразнообразие ихтиофауны и пелагических сообществ Чёрного и Азовского морей следует рассматривать не только как ресурсную основу обеспечивающих экосистемных услуг, но и как механизм поддержания устойчивости, реализующий буферную роль экосистем при климатических и антропогенных изменениях через эволюционно закреплённые и физиологически опосредованные адаптационные стратегии. Для перехода от качественных описаний к количественному прогнозированию потоков экосистемных услуг необходима разработка математических моделей, связывающих физиолого-биохимические показатели адаптации с демографическими параметрами популяций и в конечном счёте с величиной промыслового изъятия и устойчивостью сообществ.

Макрофиты и фитопланктон: вклад первичных продуцентов в формирование экосистемных услуг. Макрофиты (морские травы и макроводоросли) и фитопланктон являются основными первичными продуцентами экосистем Чёрного и Азовского морей и формируют до 60 % первичной продукции, обеспечивая фундаментальные экосистемные функции [Мильчакова, Миронова, Рябогина, 2011], что определяет их ключевую роль в формировании всех категорий экосистемных услуг.

Структура и состояние сообществ макрофитов. Видовой состав макрофитов в южных морях Российской Федерации определяется климатическими и гидрологическими факторами (солёность, уровень моря, прозрачность воды) и антропогенной нагрузкой [Phillips, Milchakova, 2003]. В Чёрном море деградация растительных сообществ наиболее выражена в морских эстуариях и портовых акваториях (например, в Новороссийской бухте), при этом наиболее устойчивыми к нефтяному загрязнению являются бурые водоросли (*Cystoseira* spp.), наименее устойчивыми — зелёные (*Ulva* spp.) и красные водоросли (*Ceramium* spp.) [Степаньян, 2020]. Устойчивость *Ericaria crinita* (Duby) Molinari & Guiry и *Gongolaria barbata* (Stackhouse) Kuntze связаны с наличием толстой многослойной клеточной стенки и способностью к аккумуляции углеводородов в вакуолях без немедленного токсического эффекта. В Азовском море колебания солёности приводят к перестройке видового состава, включая проникновение черноморских видов и рост видового разнообразия [Степаньян, 2020].

Многолетние наблюдения в прибрежной зоне Крыма (бухты Севастопольского региона: Круглая, Ласпи, Караньская) за период с 1980-х по 2010-е гг. выявили устойчивый тренд сокращения глубины произрастания макрофитов (с 20–25 до 10–15 м) и протяжённости зарослей вдоль берега (с 1,5 км до 300–500 м) [Мильчакова, Миронова, Рябогина, 2011], что отражает деградацию местообитаний и снижение поддерживающих экосистемных услуг. Смена доминирующих видов от высокопродуктивных *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata* к ассоциациям зелёных водорослей и эпифитов сопровождается трансформацией регулирующих услуг, связанных с фотосинтезом и секвестрацией углерода. По данным Мильчаковой и др. (2011), при замещении *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata* зелёными водорослями наблюдается существенное снижение биомассы.

В работах Н. А. Мильчаковой обобщены региональные данные по флоре макрофитов Чёрного моря. Появление новых видов, с одной стороны, увеличивает общее биоразнообразие, с другой — создаёт риски вытеснения аборигенных видов-эдификаторов, что требует оценки последствий для экосистемных функций.

Функциональные характеристики и фотосинтетическая активность. Фотосинтетические параметры массовых видов макрофитов — *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata* (*Cystoseira* spp.), ульвы (*Ulva* spp.), кладофоры (*Cladophora* spp.), вертебраты (*Vertebrata* spp.), энтероморфы (*Enteromorpha* spp.) и морских трав (*Nanozostera noltei* Hornem. и *Zostera marina* L.) — впервые экспериментально определены Vasechkina с соавторами (2023). Установлено, что *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata* проявляют наименьшую требовательность к свету (компенсационная точка фотосинтеза достигается при освещённости 5–10 мкмоль фотонов·м$^{-2}$·с$^{-1}$), тогда как зелёные водоросли более чувствительны к снижению освещённости (компенсационная точка при 20–30 мкмоль фотонов·м$^{-2}$·с$^{-1}$). Эти различия определяют глубину произрастания видов и пространственную структуру сообществ, что напрямую влияет на регулирующие услуги, связанные с фотосинтетической активностью и связыванием углерода. Полученные параметры могут быть использованы для моделирования первичной продукции в зависимости от световых условий и прозрачности воды.

Ресурсный потенциал и обеспечивающие услуги. Функциональные характеристики макрофитов определяют их ресурсный потенциал и вклад в обеспечивающие услуги. *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata* богаты альгиновой кислотой, йодом и селеном; Zostera содержит зостерин (полисахарид с гелеобразующими свойствами) и клетчатку [Мильчакова, Миронова, Рябогина, 2011]. Штормовые выбросы макрофитов представляют сырьевой ресурс для производства биологически активных добавок, косметических средств, удобрений и кормов для животных. Однако использование штормовых выбросов требует разработки технологий сбора и переработки, а также оценки экологических последствий изъятия органического вещества из прибрежной зоны.

Исследования элементного состава массовых видов донной растительности (красных, бурых, зелёных водорослей и морских трав) у побережья Крыма подтвердили корреляцию с содержанием элементов в донных осадках и морской воде, что обосновывает их использование в биомониторинге антропогенного воздействия [Ryabushko et al., 2024].

Фитопланктон и его роль в пелагиали. Фитопланктон является ключевым компонентом первичной продукции и секвестрации углерода в пелагиали. Пикофитопланктон (размером менее 2 мкм) Чёрного моря формирует вертикальное распределение биомассы и участвует в трофических сетях. Характерной особенностью черноморского пикофитопланктона является отсутствие цианобактерий рода Prochlorococcus, широко распространённых в тропических и субтропических водах, что отражается на структуре микробного сообщества и путях трансформации органического вещества [Муханов и др., 2016]. Роль пикофитопланктона возрастает в глубоководных районах и в летний период стратификации вод.

Глубинный максимум хлорофилла в Чёрном море формируется на горизонтах 30–50 м и связан с адаптивным накоплением пигментов и доминированием цианобактерий *Synechococcus* spp., чей вклад достигает 50 % биомассы на нижней границе фотической зоны [Churilova et al., 2019]. Этот механизм обеспечивает эффективное использование доступного света и поддерживает высокий уровень первичной продукции в условиях лимитирования освещённости.

Сезонная динамика фитопланктона и её связь с гидрологическими условиями в прибрежной зоне города Севастополя и государственного природного заповедника «Карадагский» охарактеризованы Krasheninnikova с соавторами (2024). Показано, что весенний пик развития фитопланктона связан с поступлением биогенных элементов с речным стоком и вертикальным перемешиванием, тогда как летний минимум обусловлен стратификацией вод и выеданием зоопланктоном.

Микрофитобентос, представленный преимущественно диатомовыми водорослями, участвует в первичной продукции и биогеохимических циклах на границе вода — дно, формируя регулирующие услуги, связанные с деструкцией органического вещества и круговоротом биогенных элементов [Неврова и др., 2015]. В мелководных районах вклад микрофитобентоса в общую первичную продукцию может достигать 20–30 %.

Влияние органического загрязнения на донные сообщества. Органическое загрязнение оказывает значительное влияние на донные сообщества и связанные с ними экосистемные услуги. Петров (2000) выделил пять диапазонов содержания органического углерода в донных осадках (Corg: 1–6, 6–15, 15–30, 30–45, более 45 мг Corg/г), соответствующих последовательным стадиям сукцессии макрозообентоса при усилении эвтрофирования. При переходе от диапазона 15–30 к 30–45 мг Corg/г происходит смена чувствительных видов (например, двустворчатых моллюсков-фильтраторов) на устойчивые к эвтрофированию полихеты и олигохеты, что снижает интенсивность фильтрационной активности и деструкционных процессов. Следовательно, содержание Corg может служить индикатором состояния регулирующих услуг.

Таким образом, донная растительность и фитопланктон Чёрного и Азовского морей обеспечивают широкий спектр экосистемных услуг.

- Регулирующие услуги: формирование первичной продукции, секвестрация углерода, круговорот биогенных элементов, деструкция органического вещества, поддержание газового состава вод, биогенная фильтрация (для макрофитов).

- Обеспечивающие услуги: ресурсная база для получения биологически активных веществ, кормовых добавок, удобрений; сырьё для фармацевтической и косметической промышленности; промысловые объекты (для некоторых видов водорослей).

- Поддерживающие услуги: формирование местообитаний для других гидробионтов, участие в воспроизводстве промысловых видов (нерестилища, укрытия для молоди), поддержание биоразнообразия.

- Культурные услуги: эстетическая ценность прибрежных ландшафтов, научно-образовательное значение (полигоны для исследований), индикаторная роль в биомониторинге.

Выявленные тенденции деградации растительных сообществ (сокращение глубин произрастания, площади зарослей, смена доминантов) подчёркивают необходимость включения донной растительности и фитопланктона в программы экологического мониторинга и управления морским природопользованием. Дальнейшие исследования должны быть направлены на количественную оценку вклада первичных продуцентов в потоки экосистемных услуг в формате CICES, включая разработку региональных коэффициентов пересчёта биомассы и продукции в стоимостные показатели, а также создание карт распределения ключевых местообитаний для целей пространственного планирования.

Глубоководные сообщества аноксической зоны Чёрного моря. До 90 % объёма вод Чёрного моря ниже горизонтов 150–200 м находится в условиях постоянной аноксии, что формирует уникальные экологические ниши, не имеющие аналогов в Мировом океане [Сорокин, 1982; Егоров, Артемов, Гулин, 2011]. Длительное время, вплоть до начала 2000-х годов, глубоководные сообщества рассматривались как малозначимые для формирования экосистемных услуг из-за их удалённости и предполагаемого отсутствия ресурсного потенциала. Однако исследования последних лет показали их важность для глобальных биогеохимических циклов и предоставления уникальных культурных и научных услуг [Collins et al., 2016].

Основными очагами биогеохимической активности в глубоководной зоне являются метановые сипы — участки активной разгрузки метановых флюидов из донных отложений. В монографии «Метановые сипы в Чёрном море» [Егоров, Артемов, Гулин, 2011] представлено описание более 3000 сипов, выполнены оценки интенсивности метановой разгрузки и поступления метана в водную толщу и атмосферу. Вокруг сипов формируются специфические микробные маты и карбонатные постройки (биогермы), возраст которых, по данным радиоуглеродного датирования, достигает 5,3–10,6 тыс. лет. Изотопный анализ углерода и кислорода в карбонатах позволил реконструировать палеоокеанографические условия их формирования, включая изменения солёности, температуры и границ аноксической зоны [Егоров, Артемов, Гулин, 2011, гл. 3–5].

Микробные сообщества, ассоциированные с метановыми сипами, осуществляют анаэробное окисление метана (АОМ) — процесс, реализуемый консорциумом архей и сульфатредуцирующих бактерий, в котором метан окисляется до бикарбоната с использованием сульфата в качестве акцептора электронов. Этот механизм обеспечивает окисление до 95 % метана, генерируемого в донных отложениях [Collins et al., 2016; Егоров, Артемов, Гулин, 2011, гл. 6]. По расчётам Егорова и др. (2011), суммарный поток метана из донных отложений Чёрного моря составляет 4–5 млн т в год, из которых не более 5 % достигает атмосферы благодаря микробной фильтрации. Таким образом, метановые сипы обеспечивают глобально значимую регулирующую экосистемную услугу — предотвращение эмиссии мощного парникового газа в атмосферу.

Цикл работ под руководством В. Н. Егорова с участием С. Б. Гулина и В. Н. Поповичева показал, что зоны с высокой биогеохимической активностью играют ключевую роль в трансформации загрязняющих веществ и формировании биогеохимических барьеров [Егоров, Гулин, Поповичев, 2013]. Эти процессы относятся к регулирующим экосистемным услугам, связанным с ассимиляцией и детоксикацией антропогенных поллютантов, включая тяжёлые металлы и стойкие органические загрязнители.

Переходная зона между оксическими и аноксическими водами (зона субоксии и гипоксии) представляет собой область, где возможно существование специализированной бентосной фауны. Исследования макрозообентоса северо-западного шельфа показывают, что в районах с устойчивой гипоксией биотурбационный потенциал сообществ резко снижается, а функциональное разнообразие падает до минимальных значений [Chevalier et al., Trait modeling … , 2025]. Эти данные важны для понимания пороговых концентраций кислорода, при которых сохраняются регулирующие функции бентоса.

Сведения о присутствии эукариотной фауны в собственно аноксической зоне Чёрного моря крайне ограничены. Отдельные находки мейобентоса (нематоды, фораминиферы) в сероводородной зоне описаны в работах Н. Г. Сергеевой и коллег, однако систематических количественных исследований фауны на глубине более 200 м до настоящего времени не проводилось. Вопрос о существовании специализированных многоклеточных в условиях постоянной аноксии остаётся дискуссионным и требует дальнейших исследований с применением глубоководных обитаемых аппаратов.

Глубоководные экосистемы Чёрного моря предоставляют уникальные культурные и научные услуги. Среди них:

- *Сохранность историко-культурных артефактов.* В бескислородных условиях донных осадков исключительно хорошо сохраняются деревянные конструкции затонувших судов, что создаёт предпосылки для развития подводной археологии. Благодаря отсутствию кислорода дерево не разрушается древоточцами и аэробными микроорганизмами, следовательно артефакты могут сохраняться тысячелетиями. Уникальные условия Чёрного моря позволили обнаружить исключительно хорошо сохранившиеся суда античного и средневекового периодов, включая византийские корабли и османские галеры [Collins et al., 2016; Егоров, Артемов, Гулин, 2011, гл. 8].

-*Палеоокеанографический архив.* Стратифицированные донные осадки Чёрного моря фиксируют климатические и экосистемные изменения за последние тысячелетия, предоставляя научные данные для реконструкции климатической истории и глобальных процессов. Изотопный состав карбонатов, содержание органического углерода, соотношение элементов и видовой состав микрофоссилий (диатомей, фораминифер, остракод) позволяют восстанавливать изменения солёности, температуры, уровня моря и границ аноксической зоны с высоким временным разрешением [Collins et al., 2016; Егоров, Артемов, Гулин, 2011, гл. 5, 8].

- *Научно-образовательная ценность.* Уникальные адаптации микроорганизмов к экстремальным условиям и специфические биогеохимические процессы (анаэробное окисление метана, сульфатредукция, хемосинтез) представляют значительный интерес для фундаментальной науки, включая микробиологию, биохимию и эволюционную биологию. Глубоководные сообщества

Чёрного моря служат модельными объектами для изучения процессов в бескислородных условиях, а также полигоном для международных исследовательских программ.

Глубоководные экосистемы Чёрного моря крайне чувствительны к антропогенным воздействиям, включая потенциальную добычу углеводородов, глубинное захоронение отходов и изменения гидрологического режима, связанные с климатическими трендами. Любые работы по добыче углеводородов в глубоководной зоне могут нарушить целостность метановых сипов и микробных матов, что приведёт к неконтролируемым выбросам метана и утрате регулирующих услуг. Поскольку скорость восстановления этих сообществ крайне низка (оценки варьируют от десятилетий до столетий), необходим системный мониторинг их состояния и функциональной активности [Collins et al., 2016]. Особого внимания требует контроль за целостностью метановых сипов как критических элементов биогеохимической регуляции, а также разработка мер охраны, включая создание особо охраняемых природных акваторий в районах наибольшей концентрации уникальных сообществ.

Таким образом, глубоководные сообщества Чёрного моря (от микробных матов до мейобентоса переходных зон) выполняют критические регулирующие, культурные и научные экосистемные услуги.

- Регулирующие услуги: анаэробное окисление метана (предотвращение эмиссии парниковых газов), трансформация и детоксикация загрязняющих веществ, участие в круговороте углерода и серы, формирование биогеохимических барьеров.

- Культурные услуги: сохранность историко-культурных артефактов (подводное культурное наследие), эстетическая и познавательная ценность уникальных подводных ландшафтов.

- Научные услуги: палеоокеанографический архив высокого разрешения, модельные объекты для изучения экстремофильных микроорганизмов, полигон для международных исследовательских программ.

Несмотря на ограниченность данных о таксономическом составе и функциональной активности глубоководных сообществ, фундаментальные работы Егорова и др. (2011) и последующие исследования Collins и др. (2016) создают основу для интегрированной оценки их роли в экосистеме и устойчивости экосистемных услуг. Дальнейшие исследования должны быть направлены на количественную оценку потоков вещества и энергии в глубоководной зоне, картирование критических местообитаний и разработку мер охраны с учётом уникальности и высокой уязвимости этих экосистем.

Основные стрессорные факторы и их влияние на взаимосвязь биоразнообразия и экосистемных услуг. Изменение роли биоразнообразия в формировании экосистемных услуг Чёрного и Азовского морей обусловлено комплексным воздействием природных и антропогенных факторов, эффекты которых могут как накапливаться, так и взаимно усиливаться.

К числу наиболее значимых стрессоров относятся биологические инвазии, зарегулирование речного стока, военные действия, эвтрофирование и изменение климата. Этот комплекс факторов, включая потепление, деоксигенацию и загрязнение, был положен в основу при разработке долгосрочной стратегии исследований для региона [Salihoglu, Yücel, Uygurer, 2024]. Каждый фактор действует как самостоятельно, так и в сочетании с другими, что требует их комплексного анализа в контексте влияния на биоразнообразие, структуру сообществ и потоки экосистемных услуг.

Биологические инвазии. Проблема биологических инвазий остаётся одной из ключевых для Черноморско-Азовского бассейна. Наиболее масштабные изменения связаны с инвазией гребневика *Mnemiopsis leidyi* (A. Agassiz, 1865) в 1980-е годы. Этот хищник интенсивно потребляет зоопланктон, что привело к снижению кормовой базы для планктоноядных рыб (хамсы *Engraulis encrasicolus*, шпрота *Sprattus sprattus*) и, как следствие, к падению

их численности и продуктивности рыбного промысла — ключевой обеспечивающей услуги бассейнов. Частичное ослабление негативных эффектов наблюдалось после последующей инвазии *Beroe ovata* (Bruguière, 1789) — хищного гребневика, питающегося *M. leidyi*, что продемонстрировало сложную взаимосвязь между инвазиями и трофическими структурами.

В настоящее время донные сообщества сублиторали трансформируются другими вселенцами. Хищный брюхоногий моллюск *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) активно потребляет мидий *Mytilus galloprovincialis*, что приводит к снижению численности аборигенных фильтраторов и изменению структуры донных сообществ. Вселение *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) ведёт к замещению аборигенных фильтраторов (*Chamelea gallina*), изменяя интенсивность биофильтрации и характер биотурбации осадков, что влияет на регулирующие и поддерживающие услуги [Ревков, 2016; Ревков, 2024]. Вселение *Mytilaster lineatus* (Gmelin, 1791) формирует плотные поселения, создавая новые биотопы и влияя на динамику бентосных сообществ.

Зарегулирование речного стока. Зарегулирование речного стока признаётся одним из определяющих антропогенных факторов, влияющих на гидрологический режим, солёность и поступление биогенных элементов в прибрежные и внутренние акватории. В Азовском море сокращение пресного стока рек, прежде всего Дона и Кубани, в результате строительства Цимлянского и сопутствующих водохранилищ привело к устойчивому повышению солёности с 9–10 ‰ в 1970-х гг. до 14–15 ‰ в 2020-х гг. Это сопровождалось деградацией нерестилищ полупроходных и речных рыб (судака *Sander lucioperca*, леща *Abramis brama*, тарани *Rutilus rutilus*, сазана *Cyprinus carpio*), обусловив сокращение уловов и обеспечивающих услуг рыболовства в 5–7 раз по сравнению с серединой XX века [Матишов, Григоренко, 2021; Ревков, 2024]. В Чёрном море зарегулирование стока крупных рек (Днепр, Днестр, Дунай) также изменяет поступление биогенных элементов и характер стока, что сказывается на состоянии нерестилищ в лиманно-прибрежных зонах и снижает воспроизводство аборигенных видов, однако влияние на солёность открытых вод выражено слабее.

Военные действия. Военные действия последних лет представляют собой качественно новый стрессорный фактор. Разрушение Каховской ГЭС в июне 2023 года привело к поступлению в море, по оценкам [Shumilova, Tockner, Sukhodolov, 2025], более 83 000 тонн токсичных тяжёлых металлов (свинец, кадмий, никель), а также значительного количества ила и мусора. По данным Украинского научного центра экологии моря, это вызвало гибель более 50 % мидий в районе Одессы вследствие изменения солёности и воздействия токсичных веществ. Взрывы боеприпасов и повреждения судов вносят в морскую среду широкий спектр загрязнителей, включая свинец и другие тяжёлые металлы, которые способны накапливаться в трофических цепях.

Параллельно отмечаются временные эффекты снижения антропогенной нагрузки — значительное сокращение судоходства и практически полное прекращение донного тралового лова в отдельных районах, что способствовало частичному восстановлению бентосных сообществ. В частности, после затопления пресными водами вследствие разрушения Каховской ГЭС наблюдалось временное сокращение стеногалинной биоты и последующее восстановление эвригалинных аборигенных видов. Эти процессы существенно влияют на регулирующие и поддерживающие услуги экосистем.

Эвтрофирование. Эвтрофирование начиная с 1960-х годов остаётся ведущим фактором деградации экосистемных услуг в прибрежной зоне, обусловленным высоким поступлением биогенных элементов с речным стоком, сельскохозяйственными и промышленными сбросами. Этот процесс вызывает цветение фитопланктона, снижение прозрачности воды, увеличение частоты гипоксии и заморов. В Чёрном море после пика эвтрофикации в 1980–1990-е годы наметилась тенденция к снижению биогенной нагрузки в начале XXI века, что связывается с экономическим спадом и сокращением использования удобрений в бассейне. Однако локальные

очаги эвтрофикации сохраняются в замкнутых прибрежных акваториях (бухты, порты, лиманы), где их влияние на экосистемные услуги остаётся значительным. В Азовском море, напротив, наблюдается устойчивый рост трофности, обусловленный климатическими изменениями и интенсификацией сельского хозяйства [Матишов, Дашкевич, Кириллова, 2021; Ревков, 2024]. В 1970-х годах в Таганрогском заливе зарегистрированы первые крупные вспышки токсичного цветения воды синезелёными водорослями; в 1980-х гг. они стали регулярными, а к 1997 году охватывали уже открытые акватории моря.

Изменение климата. Изменение климата усиливает эффекты эвтрофикации через повышение температуры воды, усиление стратификации и снижение растворимости кислорода, что ведёт к расширению зон гипоксии и деградации местообитаний [Collins et al., 2016]. Температурные сдвиги влияют на распределение видов, сроки их жизненных циклов и продуктивность, что отражается на потоках экосистемных услуг. В Азовском море потепление климата, наряду с зарегулированием стока, приводит к росту солёности, что ухудшает условия для традиционных промысловых видов.

Осознание комплексного характера угроз стимулирует разработку стратегических документов. Одним из ключевых является «Стратегия устойчивого развития Приазовья до 2040 года», утверждённая Правительством РФ в 2025 г. (распоряжение Правительства РФ от 29 декабря 2025 г. № 4140-р). Этот документ впервые определяет экологическую повестку как сквозной элемент развития макрорегиона, предусматривая меры, направленные на восстановление поддерживающих и регулирующих услуг:

- снижение солёности до уровня, благоприятного для нереста и кормовой базы осетровых, с целевым показателем выпуска 78,1 млн экз. молоди русского осетра ежегодно;

- ликвидацию накопленного экологического вреда, включая утилизацию затонувших судов и модернизацию очистных сооружений;

- развитие рекреационного потенциала и культурных услуг. Критический анализ стратегии указывает на противоречия между задачами интенсификации сельского хозяйства и необходимостью снижения биогенной нагрузки, что может снизить эффективность мер по борьбе с эвтрофированием.

Рассмотренные стрессоры (биологические инвазии, зарегулирование речного стока, военные действия, эвтрофирование и климатические изменения) ухудшают состояние экосистем Чёрного и Азовского морей, трансформируя взаимосвязь между биоразнообразием и формированием экосистемных услуг. Инвазии изменяют трофическую структуру сообществ, замещая аборигенные виды и изменяя их функциональную роль; регулирование стока приводит к утрате нерестилищ и сокращению ресурсных услуг; эвтрофирование и климатические факторы нарушают продукционные процессы и усиливают гипоксию; военные действия непосредственно разрушают местообитания и привносят токсиканты. Итогом является снижение потенциала экосистем к обеспечению регулирующих и поддерживающих услуг. Институциональные меры, такие как принятая «Стратегия устойчивого развития Приазовья до 2040 года», создают основу для экосистемно ориентированного управления, но их эффективность будет зависеть от согласования экономических и экологических приоритетов в регионе.

Внедрение экосистемного подхода: проблемы и перспективы. Несмотря на то, что за последние годы существенно углубилось понимание взаимосвязей между биоразнообразием и экосистемными услугами Чёрного и Азовского морей, на практике сохраняется значительный разрыв между накопленным научным знанием и его применением в управлении морскими социально-экологическими системами. Формирование комплексных управленческих решений, основанных на принципах экосистемного подхода, затруднено как отсутствием унифицированных методик оценки услуг, так и фрагментарностью эмпирических данных о функциональной организации сообществ и устойчивости потоков экосистемных услуг.

Международные проекты как драйверы развития подхода. Проект BRIDGE-BS представлял собой целенаправленную работу по развитию научно обоснованных инструментов для оценки влияния совокупных антропогенных воздействий на экосистемные услуги и повышения качества научно-политического взаимодействия в Черноморском регионе [BRIDGE-BS. Advancing … , 2025]. Проект был реализован с участием международного консорциума учёных и практиков, ориентирован на оценку состояния экосистем Чёрного моря, выявление мультистрессорных угроз и разработку средств прогнозирования устойчивости услуг, а также на укрепление связи между научным сообществом, политиками и заинтересованными сторонами через создание междисциплинарной платформы знаний и обмена данными. Основные направления работы проекта включали создание моделей, способных оценивать динамику ключевых услуг в условиях изменения климата и антропогенного давления, и развитие механизмов использования этих моделей в практике управления.

Проект BRIDGE-BS был ориентирован на реализацию Черноморской стратегической программы исследований и инноваций (Black Sea SRIA), разработанной для поддержки управления экосистемой на основе широкого участия [Salihoglu, Yücel, Uygurer, 2024], и ставил целью достижение «здорового, устойчивого и продуктивного Чёрного моря к 2030 году» [BRIDGE-BS. Advancing … , 2025]. Ключевым результатом проекта стал демонстратор цифрового двойника Чёрного моря (Digital Twin Ocean Demonstrator), интегрирующий данные, моделирование и сценарный анализ для поддержки адаптивного принятия решений [BRIDGE-BS Final Conference … , 2025].

Ключевые препятствия внедрения экосистемного подхода. Анализ современных исследований выявляет несколько ключевых препятствий, затрудняющих широкое внедрение экосистемного подхода.

Во-первых, методологическая разнородность оценок экосистемных услуг на национальном уровне в странах черноморского бассейна создаёт проблему сопоставимости данных. Отсутствие стандартизованных методик для количественной оценки услуг, в том числе с использованием унифицированной классификации CICES (существующей в версиях 4.3, 5.1 и др.), препятствует межгосударственной координации и интеграции результатов мониторинга в региональные модели управления природопользованием. Эта проблема особенно очевидна для Азовского моря, где до сих пор отсутствуют системные исследования экосистемных услуг, соответствующие международным стандартам, что ограничивает использование полученных данных при разработке стратегий устойчивого развития [Сафранов и др., 2022].

Во-вторых, сохраняется острый недостаток эмпирических данных, особенно по функциональному биоразнообразию пелагических и глубоководных компонентов экосистем. Сведения о микробном биоразнообразии, функциональных характеристиках сообществ в абиссальной зоне и о взаимодействиях между трофическими уровнями остаются фрагментарными, что затрудняет построение надёжных прогностических моделей восстановления и устойчивости экосистемных услуг при действии мультистрессоров. При этом работа BRIDGE-BS подтверждает необходимость применения современных технологических решений — таких как интеграция данных дистанционного зондирования, современные методы генетического мониторинга (включая метабаркодинг эДНК) и аналитические модели — для повышения пространственно-временного разрешения оценки состояния экосистем и прогнозирования динамики услуг в изменяющихся условиях [BRIDGE-BS. Advancing … , 2025]. Исследования последних лет демонстрируют, что анализ эДНК позволяет выявлять большее число видов по сравнению с традиционными траловыми съёмками (23 вида против 15 осенью, 12 — против 9 летом) и обладает высокой чувствительностью для обнаружения редких и мигрирующих видов [Ivanova et al., 2025]. Однако технологии эДНК при всех их преимуществах пока не позволяют надёжно оценивать биомассу и размерную структуру популяций, что требует комбинирования с традиционными методами [Ivanova et al., 2025].

В-третьих, существующие модели управления часто недооценивают адаптивный потенциал аборигенных видов, который исторически сформировался в экстремальных средовых условиях Чёрного и Азовского морей. Игнорирование этого фактора может приводить к завышенным оценкам уязвимости экосистем и неверной оценке потенциала их восстановления, что означает необходимость учёта эволюционно закреплённых адаптационных стратегий при разработке управленческих сценариев (см. соответствующие разделы настоящего обзора).

В-четвёртых, сохраняется проблема институционального и межведомственного взаимодействия. Управление морскими ресурсами в странах Черноморского бассейна часто рассредоточено между различными ведомствами (рыболовство, транспорт, охрана окружающей среды, туризм, региональное развитие), что затрудняет реализацию комплексных экосистемно ориентированных решений. Например, меры по снижению биогенной нагрузки требуют координации между сельскохозяйственными, водохозяйственными и природоохранными ведомствами, что на практике достигается редко.

К причинам сложившейся ситуации относится сокращение межгосударственного научного сотрудничества в последние годы. В то же время успешные примеры транснационального взаимодействия, такие как разработка Плана реализации Black Sea SRIA с участием всех прибрежных государств [Salihoglu, Yücel, Uygurer, 2024], демонстрируют необходимость и возможность преодоления этих барьеров.

Перспективные направления и технологические решения. Пути преодоления указанных препятствий лежат в направлении интеграции междисциплинарных данных, современных технологических инструментов и международных стандартов оценки. Важным шагом является распространение методов метагенетического анализа (метабаркодинг эДНК) и автономных систем наблюдения, которые способны существенно расширить охват таксономических и функциональных показателей сообществ. Проект BRIDGE-BS активно развивал такие направления, как умный мониторинг (smart monitoring), включающий усовершенствованные молекулярные и акустические методы для быстрой оценки биоразнообразия и биомассы, а также прототипные технологии на основе искусственного интеллекта для прогнозирования состояния экосистем [BRIDGE-BS Final Conference … , 2025].

Комбинация таких подходов с пространственным моделированием и использованием механизмов коллективной аналитики позволит перейти от точечных наблюдений к масштабному картографированию экосистемных функций и их изменений во времени. Разработка систем поддержки принятия решений на основе синергии данных, моделей и экспертных оценок может помочь создать адаптивные стратегии, способные учесть сложные взаимодействия между антропогенными нагрузками, климатическими факторами и реакциями биоразнообразия.

В этом контексте особого внимания заслуживает концепция Essential Ecosystem Service Variables (EESV), предложенная Schwantes с соавторами (2024). Эта концепция предлагает структурированный подход к отбору индикаторов для мониторинга экосистемных услуг по шести категориям: экологическое обеспечение (ecological supply), использование (use), спрос (demand), антропогенный вклад (anthropogenic contribution), инструментальная ценность (instrumental value) и ценность отношений (relational value) [Schwantes et al., 2024]. Для Черноморско-Азовского бассейна адаптация этого подхода могла бы обеспечить сопоставимость данных между странами и секторами.

Ключевую роль в преодолении разрыва между наукой и управлением играют инструменты научно-политического диалога, такие как политические резюме (policy briefs), разработанные в рамках BRIDGE-BS [BRIDGE-BS. Advancing … , 2025], и демонстраторы цифровых двойников морских экосистем [BRIDGE-BS Final Conference … , 2025]. Эти инструменты позволяют транслировать сложные научные результаты в формат, доступный для лиц, принимающих решения, и способствуют включению научных рекомендаций в реальную управленческую практику.

Таким образом, внедрение экосистемного подхода в управление морскими социально-экологическими системами — необходимое условие перехода к устойчивому развитию Черноморско-Азовского бассейна. Развитие таких инструментов в управленческую практику, при условии их согласованности с политикой устойчивого развития регионов и международными стандартами, станет ключевой предпосылкой перехода к подлинно экосистемно-ориентированному управлению морским природопользованием. При этом эффективность внедрения будет зависеть как от технологических решений, так и от готовности институтов к межведомственной координации, а также от учёта региональной специфики, включая адаптационный потенциал аборигенных видов и уникальные особенности экосистем Чёрного и Азовского морей. Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание интегрированных систем мониторинга, сочетающих традиционные методы, современные молекулярные технологии и дистанционное зондирование, а также на разработку математических моделей, обеспечивающих прогнозирование состояния экосистем и реальное использование научных результатов в практике принятия управленческих решений.

Выводы

Чёрное и Азовское моря представляют собой уникальные модели для изучения взаимосвязей между биоразнообразием, структурно-функциональной организацией сообществ и формированием экосистемных услуг в условиях полузамкнутых бассейнов. Анализ литературных источников за период 2015–2025 гг. в сочетании с фундаментальными работами предшествующих десятилетий показывает, что подходы к оценке экосистемных услуг существенно эволюционировали: наблюдается переход от описательной фиксации ущерба к количественному пространственному моделированию и интеграции функциональных признаков организмов в оценочные процедуры, что повышает точность диагностики состояния экосистем и качества предоставляемых ими услуг.

1. Функциональное биоразнообразие макрозообентоса подтверждено как критический фактор формирования регулирующих и поддерживающих услуг, поскольку именно особенности функционального состава донных сообществ определяют интенсивность процессов биотурбации, дыхания и трансформации биогенных элементов. Исследования последних лет показали, что распределение функциональных признаков макрозообентоса на северо-западном шельфе Чёрного моря неравномерно и сильно зависит от доступности кислорода, что отражает влияние как природных, так и антропогенных факторов на способность экосистемы генерировать услуги [Chevalier et al., Trait modeling … , 2025; Chevalier et al., A macrozoobenthic … , 2025].

2. Глубоководные хемосинтетические сообщества аноксической зоны Чёрного моря остаются одним из наименее изученных компонентов экосистемы, несмотря на их потенциальную роль в регуляции метанового цикла и секвестрации углерода в глобальном масштабе. Существующие данные указывают на высокий вклад этих сообществ в биогеохимические процессы донных отложений [Егоров, Артемов, Гулин, 2011; Collins et al., 2016], однако функциональные аспекты их участия в потоках экосистемных услуг требуют непосредственных количественных исследований и включения в программы государственного экологического мониторинга.

3. Подтверждена роль первичных продуцентов (макрофиты и фитопланктон) как одного из основных источников первичной продукции и регулирующих услуг (секвестрация углерода, продукция кислорода). Пространственно-временные изменения их сообществ под воздействием антропогенных факторов обусловливают перестройки в трофических сетях и служат индикаторами устойчивости экосистем, что требует систематического учёта в оценочных моделях. Анализ динамики сообществ фитопланктона также подчёркивает влияние эвтрофирования и климатических факторов на структуру продуцентов с последствиями для энергетических потоков в пищевых цепях и устойчивости экосистем [Krasheninnikova et al., 2024].

4. Трансформация экосистемы Азовского моря. Долгосрочные наблюдения показывают, что Азовское море продолжает демонстрировать устойчивый тренд осолонения [Матишов, Григоренко, 2021], приводящий к трансформации таксономической и функциональной структуры биоценозов, включая смену доминантных групп организмов. Эти изменения негативно сказываются на обеспечивающих услугах рыболовства и устойчивости пищевых сетей, что согласуется с данными многолетних гидробиологических наблюдений и свидетельствует о длительных стрессовых воздействиях.

5. Принятая в 2025 г. «Стратегия устойчивого развития Приазовья до 2040 года» формирует институциональные предпосылки для восстановления экосистемных услуг, однако для её эффективной реализации необходимы корректировка целевых показателей и индикаторов в соответствии с международными классификациями (CICES), а также развитие механизмов мониторинга, отражающих функциональные процессы, а не только таксономическую структуру.

6. Фрагментарность реализации концепции экосистемных услуг. Несмотря на значительный объём таксономических данных и многолетние сведения по динамике гидробионтов, эмпирическая реализация концепции экосистемных услуг в Черноморско-Азовском регионе остаётся фрагментарной. Основные пробелы проявляются в отсутствии унифицированных методик оценки, адаптированных к региональной специфике [Сафранов и др., 2022]; недостатке комплексных данных о функциональном биоразнообразии, особенно глубоководных и микромасштабных сообществ [Collins et al., 2016; Chevalier et al., Trait modeling … , 2025]; ограниченности интеграции моделей, способных предсказывать изменения потоков услуг под воздействием мультистрессорных нагрузок [BRIDGE-BS. Advancing … , 2025].

7. Направления преодоления выявленных пробелов. Необходимы следующие меры:

- интегрировать количественные данные о функциональном биоразнообразии в региональные биогеохимические и диагностические модели;
- включить глубоководные хемосинтетические сообщества Чёрного моря в национальные программы экологического мониторинга;
- разработать и внедрить унифицированные методики оценки экосистемных услуг для обоих морей на основе международного опыта (в частности, проектов DOORS и BRIDGE-BS) с адаптацией классификатора CICES к специфике региональных экосистем;
- развивать методы молекулярного мониторинга (эДНК) в сочетании с традиционными съёмками для повышения разрешающей способности оценок биоразнообразия.

8. Ключевыми условиями дальнейшего прогресса являются:

- эффективное внедрение экосистемного подхода в практику управления через включение количественных индикаторов состояния биоразнообразия в систему мониторинга;
- восстановление регулярного экспедиционного наблюдения Азовского моря;
- расширение сети наблюдательных станций в российской части Чёрного моря до уровня, обеспечивающего сопоставимость данных и параметризацию прогнозных моделей;
- развитие научно-политического диалога и механизмов внедрения научных результатов в практику управления (включая цифровые двойники морских экосистем и другие инструменты поддержки принятия решений).

Список литературы

1. *Болтачев А. Р., Карпова Е. П.* Современная структура и динамика сообществ рыб прибрежной зоны юго-западного Крыма на примере бухты Казачья // Труды Карельского научного центра РАН. – 2018. – № 4. – С. 23–35. – http://dx.doi.org/10.17076/them802
2. *Болтачева Н. А., Мазлумян С. А.* Линейный рост и продолжительность жизни моллюска *Chamelea gallina* (Bivalvia: Veneridae) в Чёрном море // Экология моря / НАН Украины, Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского. – Севастополь : ИнБЮМ, 2001. – Вып. 55. – С. 50–52. – https://repository.marine-research.ru/handle/299011/4385
3. *Войкина А. В., Бугаев Л. А., Кириченко О. В., Цибульская М. А., Ружинская Л. П., Белоусов В. Н., Сергеева С. Г., Лисовская В. В., Мосесьян Г. В.* Сезонная динамика содержания общих липидов в теле хамсы *Engraulis encrasicolus* (Linnaeus, 1758) в период 2017–2020 гг. // Труды АзНИИРХ. – 2021. – Т. 3. – С. 42–50. – https://elibrary.ru/bfqdyn
4. *Войкина А. В., Бугаев Л. А., Негода С. А., Кириченко О. В., Юрченко К. А.* Физиолого-биохимическое состояние хамсы *Engraulis encrasicolus* (Linnaeus, 1758) в Азово-Черноморском бассейне в период 2020–2022 гг. // Труды АзНИИРХ. – 2023. – Т. 4. – С. 28–35.
5. *Грезе И. И.* Амфиподы Чёрного моря и их биология. – Киев : Наук. думка, 1977. – 155 с. – https://repository.marine-research.ru/handle/299011/5661
6. *Грезе В. Н.* Биопродукционная система Чёрного моря и её функциональная характеристика // Гидробиологический журнал. – 1979. – Т. 15, № 4. – С. 3–9. – https://repository.marine-research.ru/handle/299011/11016
7. *Егоров В. Н., Артемов Ю. Г., Гулин С. Б.* Метановые сипы в Чёрном море: средообразующая и экологическая роль / НАН Украины, Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского ; под ред. Г. Г. Поликарпова. – Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. – 405 с. – https://repository.marine-research.ru/handle/299011/7684
8. *Егоров В. Н., Гулин С. Б., Поповичев В. Н. [и др.].* Биогеохимические механизмы формирования критических зон в Чёрном море в отношении загрязняющих веществ // Морской экологический журнал. – 2013. – Т. 12, № 4. – С. 5–26. – https://repository.marine-research.ru/handle/299011/1305
9. *Куражковский Ю. Н.* Очерки природопользования. – Москва : Мысль, 1969. – 267 с.
10. *Куцын Д. Н., Самотой Ю. В.* Возраст и рост атерины *Atherina boyeri* (Atherinidae) из акватории юго-западного Крыма (Чёрное море) // Вопросы ихтиологии. – 2020. – Т. 60, № 3. – С. 309–316. – https://doi.org/10.31857/S004287522003011X
11. *Куцын Д. Н., Тамойкин И. Ю., Самотой Ю. В., Дончик П. И.* Возраст, рост и созревание каменного окуня *Serranus scriba* (Serranidae) Чёрного моря у берегов Крыма // Вопросы ихтиологии. – 2023. – Т. 63, № 5. – С. 545–553. – https://doi.org/10.31857/S0042875223050077
12. *Малахова Л. В., Скуратовская Е. Н., Малахова Т. В., Лобко В. В.* Связь интегрального биохимического индекса и содержания хлорорганических ксенобиотиков в печени морского ерша *Scorpaena porcus* (Linnaeus, 1758) в севастопольской морской акватории // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. – 2020. – Т. 13, № 4. – С. 387–409. – https://doi.org/10.17516/1997-1389-0335
13. *Матишов Г. Г., Григоренко К. С.* Течения Азовского моря в период маловодья Дона // Океанология. – 2021. – Т. 61, № 2. – С. 198–208. – https://doi.org/10.31857/S0030157421020131
14. *Матишов Г. Г., Дашкевич Л. В., Кириллова Е. Е.* Цикличность климата в регионе Азовского моря // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2021. – Т. 498, № 1. – С. 436–440. – https://doi.org/10.31857/S2686739721050091
15. *Мильчакова Н. А., Миронова Н. В., Рябогина В. Г.* Морские растительные ресурсы // Промысловые биоресурсы Чёрного и Азовского морей / под ред. В. Н. Еремеева [и др.]. – Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. – С. 117–139.

16. *Муханов В. С., Рылькова О. А., Чурилова Т. Я., Сахонь Е. Г., Пименов Н. В.* Структура и сезонная трофодинамика пикофитопланктона в Севастопольской бухте и сопредельных водах Чёрного моря // Микробиология. – 2016. – Т. 85, № 5. – С. 553–561. – https://doi.org/10.7868/S0026365616050128
17. *Неврова Е. Л., Снигирева А. А., Петров А. Н., Ковалева Г. В.* Руководство по изучению морского микрофитобентоса и его применению для контроля качества среды / под ред. А. В. Гаевской. – Севастополь ; Симферополь : Н. Оріанда, 2015. – 176 с. – https://repository.marine-research.ru/handle/299011/1395
18. *Петров А. Н.* Реакция прибрежных макробентосных сообществ Чёрного моря на органическое обогащение донных отложений // Экология моря / НАН Украины, Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского. – Киев : Наук. думка, 2000. – Вып. 51. – С. 45–51. – https://repository.marine-research.ru/handle/299011/4297
19. *Ревков Н. К.* Особенности колонизации Чёрного моря недавним вселенцем – двустворчатым моллюском *Anadara kagoshimensis* (Bivalvia: Arcidae) // Морской биологический журнал. – 2016. – Т. 1, № 2. – С. 3–17. – https://doi.org/10.21072/mbj.2016.01.2.01
20. *Ревков Н. К.* Действительно ли так опасен недавний вселенец в Азово-Черноморский бассейн двустворчатый моллюск *Anadara kagoshimensis*? // Экосистемы. – 2024. – № 39. – С. 127–147. – https://doi.org/10.29039/2413-1733-2024-39-127-147
21. *Сафранов Т. А., Берлінський М. А., Ель Хадрі Ю., Сліже М. О.* Оцінка екосистемних послуг північно-західної частини Чорного моря: стан, проблеми та перспективи // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Сер.: Геологія. Географія. Екологія. – 2022. – Вип. 56. – С. 255–263. – https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-56-19
22. *Солдатов А. А., Андреенко Т. И., Головина И. В.* Особенности тканевого метаболизма у анадары и черноморской мидии: сравнительные исследования // *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906): функциональные аспекты инвазии в Азово-Черноморский регион / отв. ред.: А. А. Солдатов, Н. К. Ревков. – Севастополь ; Москва : Т-во науч. изд., 2025. – Гл. 6.1. – С. 60–64.
23. *Солдатов А. А., Андреенко Т. И., Головина И. В., Сысоева И. В., Сысоев А. А.* Особенности тканевого метаболизма у анадары в условиях острой экспериментальной аноксии // *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906): функциональные аспекты инвазии в Азово-Черноморский регион / отв. ред.: А. А. Солдатов, Н. К. Ревков. – Севастополь ; Москва : Т-во науч. изд., 2025. – Гл. 6.2. – С. 65–75.
24. *Солдатов А. А., Андреенко Т. И., Кухарева Т. А., Андреева А. Ю., Кладченко Е. С.* Активность каталазы и супероксиддисмутазы в эритроцитах и уровень метгемоглобина в крови морского ерша *Scorpaena porcus* (Linnaeus, 1758) в условиях острой гипоксии // Биология моря. – 2021. – Т. 47, № 4. – С. 262–269. – https://doi.org/10.31857/S0134347521040124
25. *Сорокин Ю. И.* Чёрное море: природа, ресурсы. – Москва : Наука, 1982. – 216 с.
26. *Степаньян О. В.* Макрофитобентос в больших экосистемах южных морей России // Известия РАН. Серия географическая. – 2020. – Т. 84, № 2. – С. 228–238. – https://doi.org/10.31857/S2587556620020132
27. Стратегия устойчивого развития Приазовья до 2040 года : утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 29 дек. 2025 г. № 4140-р. – Москва : Правительство РФ, 2025. – 58 с.
28. *Фроленко Л. Н., Живоглядова Л. А.* Состояние сообществ *Chamelea gallina* и *Pitar rudis* в северо-восточной части Чёрного моря осенью 2019 г. // Водные биоресурсы и среда обитания. – 2020. – Т. 3, № 3. – С. 45–55. – https://doi.org/10.47921/2619-1024_2020_3_3_45

29. *Чесалин М. В.* Определение возраста азовской хамсы *Engraulis encrasicolus maeoticus* (Engraulidae) на основе анализа изображений отолитов // Вопросы ихтиологии. – 2023. – Т. 63, № 3. – С. 292–301. – https://doi.org/10.31857/S0042875223030050
30. *Anufriieva E. V., Shadrin N. V.* The swimming behavior of Artemia (Anostraca): new experimental and observational data // Zoology. – 2014. – Vol. 117, iss. 6. – P. 415–421. – https://doi.org/10.1016/j.zool.2014.03.006
31. *Barbier E. B.* Marine ecosystem services // Current Biology. – 2017. – Vol. 27, iss. 11. – P. R507–R510. – https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.03.020
32. Benefit Transfer of Environmental and Resource Values: A Guide for Researchers and Practitioners / eds: R. J. Johnston [et al.]. – Dordrecht : Springer, 2015. – 582 p. – https://doi.org/10.1007/978-94-017-9930-0
33. BRIDGE-BS. Advancing Black Sea Research and Innovation for a Sustainable Blue Economy: Policy brief / Europ. Marine Board. – 2025. – URL: https://icbss.org/wp-content/uploads/2025/12/BridgeBS_PB1_EN_Web_v2.pdf (accessed: 26.12.2025).
34. BRIDGE-BS Final Conference presents key policy outcomes for a sustainable blue economy in the Black Sea region // Conference of Peripheral Maritime Regions. Balkan and Black Sea Comission. – 2025. – URL: https://cpmr-balkan-blacksea.org/regional-and-partners-news/bridge-bs-final-conference-presents-key-policy-outcomes-for-a-sustainable-blue-economy-in-the-black-sea-region/6997/ (accessed: 26.12.2025).
35. *Bukvareva E., Zamolodchikov D., Grunewald K.* National assessment of ecosystem services in Russia: Methodology and main problems // Science of the Total Environment. – 2019. – Vol. 655. – P. 1181–1196. – https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.286
36. *Chevalier S., Beauchard O., Teacă A., Begun T., Todorova V., Vandenbulcke L., Soetaert K., Grégoire M.* A macrozoobenthic data set of the Black Sea northwestern shelf // Scientific Data. – 2025. – Vol. 12, no. 1. – Art. 957. – https://doi.org/10.1038/s41597-025-05311-2
37. *Chevalier S., Beauchard O., Vandenbulcke L., Teaca A., Begun T., Todorova V., Soetaert K., Grégoire M.* Trait modeling to predict benthic functions and vulnerabilities across Black Sea seascapes // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15, no. 1. – Art. 39076. – https://doi.org/10.1038/s41598-025-24508-4
38. *Churilova T., Suslin V., Sosik H. M., Efimova T., Moiseeva N., Moncheva S., Mukhanov V., Rylkova O., Krivenko O.* Phytoplankton light absorption in the deep chlorophyll maximum layer of the Black Sea // European Journal of Remote Sensing. – 2019. – Vol. 52, suppl. 1. – P. 123–136. – https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1533389
39. *Collins P. C., Carlsson J., Rowcroft P., Tibbles B.* Ecosystem status of the deep Black Sea, soft sediment, benthic community // Marine Policy. – 2016. – Vol. 73. – P. 216–223. – https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.07.016
40. *Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R. V., Paruelo J., Raskin R. G., Sutton P., van den Belt M.* The value of the world's ecosystem services and natural capital // Nature. – 1997. – Vol. 387, no. 6630. – P. 253–260. – https://doi.org/10.1038/387253a0
41. *Díaz S., Demissew S., Carabias J. [et al.].* The IPBES Conceptual Framework – connecting nature and people // Current Opinion in Environmental Sustainability. – 2015. – Vol. 14. – P. 1–16. – https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.11.002
42. *Díaz S., Pascual U., Stenseke M. [et al.].* Assessing nature's contributions to people // Science. – 2018. – Vol. 359, no. 6373. – P. 270–272. – https://doi.org/10.1126/science.aap8826

43. Ecosystem Accounting // System of Environmental Economic Accounting : [site] / United Nations. – URL: https://seea.un.org/ecosystem-accounting (accessed: 26.12.2025).
44. Ecosystems and Human Well-Being: Health Synthesis : A Report of the Millennium Ecosystem Assessment / C. Corvalan, S. Hales, A. McMichael ; review eds: J. Sarukhán [et al.]. – Washington : Island Press, 2005. – 155 p.
45. *Gostyukhina O. L., Andreenko T. I.* Tissue metabolism and the state of the antioxidant complex in the Black Sea mollusks *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) and *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) with different tolerances to oxidative s stress // Russian Journal of Marine Biology. – 2019. – Vol. 45, no. 3. – P. 211–220. – https://doi.org/10.1134/S1063074019030039
46. *Haines-Young R., Potschin M. B.* Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure. – Nottingham, UK : Fabis Consulting Ltd, 2018. – 53 p.
47. *Ivanova P., Zlateva I., Dzhembekova N., Popov I., Raykov V., Dimitrov D., Mihova S., Raev Y., Stefanova K.* A study of feasibility and detection sensitivity of environmental DNA for fish biodiversity monitoring and stock assessment in the Black Sea // Frontiers in Marine Science. – 2025. – Vol. 12. – Art. 1648741. – https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1648741
48. *Krasheninnikova S., Shokurova I., Yakovenko V., Lee R.* Features of phytoplankton changes in the Sevastopol and Karadag coastal areas (the Black Sea) in spring // Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 2024. – Vol. 303. – Art. 108777. – https://doi.org/10.1016/j.ecss.2024.108777
49. *Mace G. M., Norris K., Fitter A. H.* Biodiversity and ecosystem services: a multilayered relationship // Trends in Ecology & Evolution. – 2012. – Vol. 27, iss. 1. – P. 19–26. – https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.08.006
50. *Matishov G., Balykin P., Ponomareva E., Sorokina M., Belaya M., Korchunov A.* State of the fishing and the aquaculture in the southern seas of Russia in XXI century // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 937, no. 3. – Art. 032036. – https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/3/032036
51. *Odum E. P.* Fundamentals of Ecology. – 2nd ed. – Philadelphia : Saunders Co, 1959. – 546 p.
52. *Phillips R. C., Milchakova N. A.* Seagrass ecosystems // Marine Ecological Journal. – 2003. – Vol. 2, no. 2. – P. 29–39. – https://repository.marine-research.ru/handle/299011/706
53. *Revkov N. K., Boltacheva N. A., Timofeev V. A., Bondarev I. P., Bondarenko L. V.* Macrozoobenthos of the Zernov's Phyllophora field, northwestern Black Sea: species richness, quantitative representation and long-term variations // Nature Conservation Research. Заповедная наука. – 2018. – Vol. 3, no. 4. – P. 32–43. – https://doi.org/10.24189/ncr.2018.045
54. *Ryabushko V. I., Gureeva E. V., Kapranov S. V., Prazukin A. V., Toichkin A. M., Simokon M. V., Bobko N. I.* Element composition of several marine macrophytes (Crimea, Black Sea) and correlations with the element abundances in sediments and seawater // Environmental Research. – 2024. – Vol. 257. – Art. 119380 (14 p.). – https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119380
55. *Salihoglu B., Yücel M., Uygurer P. [et al.].* Implementing regional blue economy research and innovation strategies: a case study for the Black Sea // Frontiers in Marine Science. – 2024. – Vol. 11. – Art. 1409689. – https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1409689

56. *Schwantes A. M., Firkowski C. R., Affinito F., Rodriguez P. S., Fortin M.-J., Gonzalez A.* Monitoring ecosystem services using essential ecosystem service variables // Frontiers in Ecology and the Environment. – 2024. – Vol. 22, no. 8. – Art. E2792. – https://doi.org/10.1002/fee.2792
57. *Shadrin N. V., Anufriieva E. V.* Size polymorphism and fluctuating asymmetry of *Artemia* (Branchiopoda: Anostraca) populations from the Crimea // Journal of Siberian Federal University. Biology. – 2017. – Vol. 10, no. 1. – P. 114–126. – https://doi.org/10.17516/1997-1389-0012
58. *Shalagina N. E., Soldatov A. A., Gostyukhina O. L., Rychkova V. N.* Effects of cold shock on the state of the antioxidant enzyme complex in tissues of *Scorpaena porcus* (L., 1758) // Biology Bulletin. – 2025. – Vol. 52. – Art. 385. – https://doi.org/10.1134/S1062359025610985
59. *Soldatov A. A., Andreenko T. I., Kukhareva T. A., Andreeva A. Yu., Kladchenko E. S.* Catalase and superoxide dismutase activity in erythrocytes and the methemoglobin level in blood of the Black Scorpionfish (*Scorpaena porcus*, Linnaeus, 1758) exposed to acute hypoxia // Russian Journal of Marine Biology. – 2021. – Vol. 47, no. 4. – P. 283–289. – https://doi.org/10.1134/S106307402104012X
60. *Shumilova O., Tockner K., Sukhodolov A. [et al.].* The destruction of the Kakhovka Dam and its long-term environmental consequences // Science. – 2025. – Vol. 387, no. 6741. – https://doi.org/10.1126/science.adn8655
61. *Vasechkina E. F., Rudneva I. I., Filippova T. A., Naumenko I. P., Parkhomenko A. V., Shaida V. G.* Photosynthetic parameters of the seaweeds widely spread near the Crimean coast // Regional Studies in Marine Science. – 2023. – Vol. 66. – Art. 103170. – https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103170

FORMATION OF ECOSYSTEM SERVICES IN THE BLACK AND AZOV SEAS: TAXONOMIC AND FUNCTIONAL STRUCTURE OF HYDROBIONTS, ASSESSMENT METHODS, AND ECOSYSTEM BASED MANAGEMENT

Andreenko T. I.

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation, e-mail: andreenko@ibss-ras.ru

Abstract: The semi-enclosed marine ecosystems of the Black Sea and the Sea of Azov are characterized by high sensitivity to anthropogenic and climatic impacts, making them model objects for studying the relationships between taxonomic structure, the functional organization of communities, and the formation of ecosystem services. Based on an analysis of literature from 2015–2025, approaches to the qualitative and quantitative assessment of ecosystem services are systematized, and the role of taxonomic and functional components of biota in their provision is analyzed. The main limiting factors are identified: eutrophication, biological invasions, river flow regulation, and military actions; ways to mitigate their impact within the framework of an ecosystem approach to marine resource management are also considered. Close attention is paid to the deep-water communities of the Black Sea's anoxic zone, the bioturbation activity of macrozoobenthos, and the specific features of ecosystem service formation in the Sea of Azov in the context of implementing the "Strategy for the Sustainable Development of the Azov Region until 2040." It is shown that the functional organization of benthic communities is a determining factor in maintaining regulating and supporting services. The evolutionarily established euryhalinity and eurythermality of native species ensure a high restoration potential of the ecosystems. Significant data gaps are identified: the lack

of unified regional methodologies for service assessment and the fragmented nature of information on the functional organization of the pelagic zone and abyssal areas. The necessity of transitioning from protecting individual biotopes to managing ecosystem service flows based on quantitative characteristics of community functional activity is substantiated.
Keywords: Black Sea, Azov Sea, semi-enclosed seas, ecosystem services, CICES classification, functional traits, macrozoobenthos, bioturbation, biological invasions, ecosystem-based management, review

Сведения об авторе

Андреенко Татьяна Ивановна	кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела физиологии животных и биохимии, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», г. Севастополь, пр-кт Нахимова, 2, 299011, Российская Федерация, e-mail: andreenko@ibss-ras.ru

Поступила в редакцию 10.04.2026
Принята к публикации 28.04.2026