

## Анализ гидролого-гидрохимических факторов трансформации донных фитоценозов в районе мыса Коса Северная (Черное море, Севастополь)

А. В. Пархоменко \*, Е. Ф. Васечкина, А. А. Латушкин

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

\* e-mail: avparkhomenko52@gmail.com

### Аннотация

Макрофиты выступают в качестве важных биоиндикаторов условий окружающей среды и долгосрочных изменений качества воды, что позволяет использовать макрофитов при изучении динамики донных природных комплексов. Цель работы – выявление основных гидрофизических и гидрохимических факторов, приводящих к изменениям биомассы донных фитоценозов в районе м. Коса Северная. Проанализированы и обобщены литературные источники, результаты ландшафтных и гидрботанических исследований (летний период 1964, 1997, 2006 и 2017 гг.) в прибрежной зоне м. Коса Северная – м. Толстый с использованием данных о температуре воды, содержании в воде нитратов, нитритов, аммония, фосфатов и общего взвешенного вещества в 1998–2021 гг., а также результаты имитационного моделирования динамики биомассы макрофитобентоса в этом районе в 1998–2002 гг. В ландшафтной структуре прибрежной зоны района исследования в разные периоды времени выделялись несколько донных природных комплексов, причем с течением времени их состав и количество менялись. В эрикариево-гонголариевом фитоценозе (0.5–5 м) к 2006 г. произошло увеличение биомассы доминирующих видов, характеризующееся ростом доли эпифитов. В 2017 г. наблюдалось восстановление доминирующих видов, а общая биомасса возросла почти в три раза. Эрикариево-гонголариево-филлофоровый фитоценоз (5–10 м) полностью исчез к 2006 г., а на его месте в 2017 г. была зафиксирована *Dictyota* spp. Филлофоровый фитоценоз (глубины свыше 10 м) существенно деградировал в 1997 г., его биомасса сократилась почти до нуля. В 2006 г. *Phyllophora crispa* на этих глубинах не регистрировалась, но к 2017 г. появились отдельные участки дна, где представлена *Phyllophora crispa* с биомассой, меньшей на порядок по сравнению с 1964 г. Сделан вывод, что зафиксированные трансформации донных сообществ были вызваны в основном изменениями прозрачности воды, связанными с содержанием общего взвешенного вещества. Для слежения за развитием ситуации целесообразно регулярно с частотой раз в несколько лет проводить гидрботанические съемки.

**Ключевые слова:** макрофитобентос, донный фитоценоз, Черное море, имитационная модель, донные природные комплексы, эвтрофикация, прозрачность воды

© Пархоменко А. В., Васечкина Е. Ф., Латушкин А. А., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

**Благодарности:** исследование выполнено в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ № FNNN-2024-0016 «Исследование пространственно-временной изменчивости океанологических процессов в береговой, прибрежной и шельфовой зонах Черного моря под воздействием природных и антропогенных факторов на основе контактных измерений и математического моделирования» и FNNN-2024-0012 «Анализ, диагноз и оперативный прогноз состояния гидрофизических и гидрохимических полей морских акваторий на основе математического моделирования с использованием данных дистанционных и контактных методов измерений».

**Для цитирования:** Пархоменко А. В., Васечкина Е. Ф., Латушкин А. А. Анализ гидролого-гидрохимических факторов трансформации донных фитоценозов в районе мыса Коса Северная (Черное море, Севастополь) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 2. С. 76–90. EDN CMHLRP.

## **Analysis of Hydrological and Hydrochemical Factors of Bottom Phytocenosis Transformation near Cape Kosa Severnaya (Black Sea, Sevastopol)**

**A. V. Parkhomenko \*, E. F. Vasechkina, A. A. Latushkin**

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

*\* e-mail: avparkhomenko52@gmail.com*

### **Abstract**

Macrophytes act as important bioindicators of environmental conditions and long-term changes in water quality allowing their use in studying the dynamics of bottom natural complexes. The purpose of the work is to identify the main hydrophysical and hydrochemical factors leading to changes in the biomass of bottom phytocenoses near Cape Kosa Severnaya. The paper analyzes and summarizes literary sources and results of landscape and hydrobotanical studies (summer 1964, 1997, 2006 and 2017) carried out in the coastal zone between Cape Kosa Severnaya and Cape Tolsty. We used data on water temperature, concentrations of nitrates, nitrites, ammonium, phosphates and total suspended matter in water from 1998 to 2021. We also used simulation results of macrophytobenthos biomass dynamics in the area from 1998 to 2002. Several bottom natural complexes were distinguished in the landscape structure of this area at different periods. Their composition and quantity changed over time. In the *Ericaria-Gongolaria* phytocenosis (0.5–5 m), by 2006 there was an increase in the biomass of the dominant species characterized by an increase in the proportion of epiphytes. In 2017, there was a restoration of the dominant species, and the total biomass almost tripled. The *Ericaria-Gongolaria-Phyllophora* phytocenosis (5–10 m) had completely disappeared by 2006, and *Dictyota* spp. took its place in 2017. The *Phyllophora* phytocenosis (depths over 10 m) significantly degraded in 1997, and its biomass decreased almost to zero. In 2006, *Phyllophora crispa* was not recorded at these depths, but by 2017, there appeared separate areas of the bottom where *Phyllophora crispa* was present, with biomass an order of magnitude lower compared to that in 1964. It was concluded that the recorded transformations of benthic communities were caused mainly by changes in water transparency associated with the content of total suspended matter. To monitor the situation, it is advisable to regularly conduct hydrobotanical surveys at intervals of several years.

**Keywords:** macrophytobenthos, bottom phytocenosis, Black Sea, simulation model, bottom natural complex, eutrophication, water transparency

**Acknowledgments:** This work was carried out under state assignment of Marine Hydro-physical Institute of RAS no. FNNN-2024-0016 “Studies of spatial and temporal variability of oceanological processes in the coastal, near-shore and shelf zones of the Black Sea influenced by natural and anthropogenic factors on the basis of in situ measurements and numerical modelling” and FNNN-2024-0012 “Analysis, diagnosis and real-time forecast of the state of hydrophysical and hydrochemical fields of marine water areas based on mathematical modelling using data from remote and in situ methods of measurements”.

**For citation:** Parkhomenko, A.V., Vasechkina, E.F. and Latushkin, A.A., 2024. Analysis of Hydrological and Hydrochemical Factors of Bottom Phytocenosis Transformation near Cape Kosa Severnaya (Black Sea, Sevastopol). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 76–90.

### **Введение**

Подводные береговые склоны и морские мелководья занимают очень небольшую часть площади океана, но именно здесь наиболее активны продукционные процессы, велико разнообразие видов и экосистем, местообитаний гидробионтов, донных природных комплексов [1].

Донный природный комплекс (ДПК) – многокомпонентная развивающаяся система. Даже незначительные изменения одного из компонентов этой системы могут привести к непредсказуемым трансформациям окружающей среды. В связи с этим в Черном море проводились и активно проводятся в настоящее время исследования ландшафтной и морфологической структуры береговой зоны<sup>1)</sup> [2–6], выполнено физико-географическое районирование [7–9], дана характеристика глубоководных ландшафтов континентального склона [10]. Кроме того, рассмотрены подходы к определению устойчивости черноморских донных ландшафтов к природным и антропогенным факторам [3, 11], введено понятие «морской антропогенный ландшафт» и предложена его типизация по преобладающим видам хозяйственной деятельности [12]. Активно исследуются вещественные потоки в береговой зоне Крымского полуострова с выделением экзогенных и эндогенных процессов, оказывающих влияние на трансформацию компонентов ДПК [6, 13].

Анализ исследований ДПК, проводимых в Черном море, позволил сделать вывод, что негативная трансформация ДПК происходит вдоль всего побережья Черного моря.

В настоящей работе мы сосредоточимся на выявлении возможных причин негативных трансформаций донных фитоценозов как главных компонентов ДПК. Макрофитобентос считается одним из важнейших и одновременно уязвимых компонентов ДПК и играет ведущую роль в стабилизации прибрежных экосистем, обеспечивая реализацию ряда экосистемных функций и услуг. Функция макрофитов в экосистеме связана с их структурными признаками, такими как видовой состав, распределение, численность и разнообразие. Эти признаки в свою очередь зависят от различных факторов окружающей среды: освещенности, температуры воды, состава субстрата, конкурентных взаимодействий, колебаний уровня воды, качества морской воды и концентрации биогенных элементов в воде и донных отложениях.

---

<sup>1)</sup> Петров К. М. Методика ландшафтного исследования береговой зоны моря // Морские подводные исследования / Отв. ред. Б. П. Мантейфель. Москва : Наука, 1969. С. 136–148.

Макрофиты выступают в качестве важных биоиндикаторов состояния окружающей среды и долгосрочных изменений качества воды, что позволяет использовать их при изучении динамики ДПК [14].

Положительное влияние макроводорослей и морских трав на экосистему хорошо изучено. Весной начинается рост укоренившихся видов, что приводит к максимуму биомассы макрофитобентоса летом. Первичную продукцию макрофитобентоса ограничивают главным образом прозрачность воды, биомасса эпифитов и доступность питательных веществ, которые могут выступать как индикаторы повышения антропогенной нагрузки на прибрежные территории [14–17].

За последние несколько десятилетий снижение биомассы макрофитов ускорилось из-за антропогенной нагрузки на побережье. Среди главных факторов этого снижения биомассы можно выделить снижение освещенности, вызванное увеличением содержания общего взвешенного (ОВВ) и растворенного органического вещества в воде, а также загрязнение биогенными элементами, в основном нитратами и фосфатами. Избыток биогенных элементов вызывает нежелательные изменения в гидрохимическом и гидробиологическом режимах водоемов и является главной причиной повышения уровня эвтрофикации [17]. В условиях эвтрофикации доступность света в толще воды снижается из-за увеличения биомассы фитопланктона, что приводит к деградации макрофитобентоса [14].

Сложные взаимодействия между такими факторами, как доступность света, концентрация питательных веществ, воздействие штормов, выбросы макрофитов и перенос наносов, можно исследовать с помощью инструментов математического моделирования. С учетом значительной роли, которую макрофиты играют в морских экосистемах, понимание и количественная оценка факторов окружающей среды, влияющих на структуру донных сообществ макрофитов, необходимы для выработки рациональных методов управления этими экосистемами.

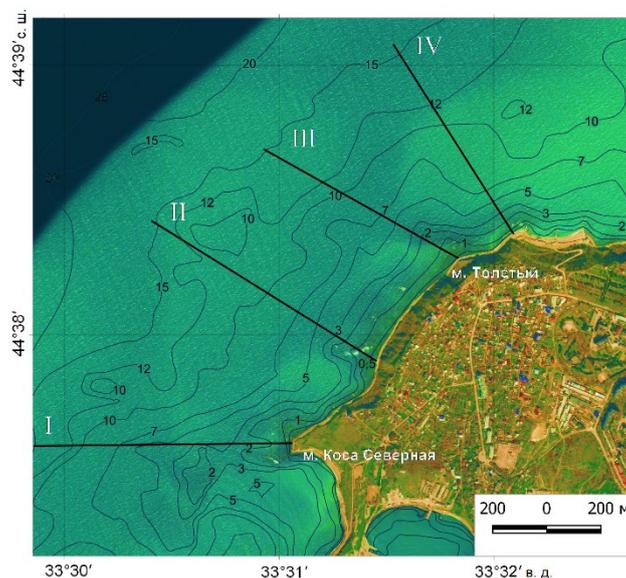
Цель статьи – выявить основные гидрофизические и гидрохимические факторы, приводящие к изменениям биомассы донных фитоценозов в районе м. Коса Северная.

## **Материалы и методы исследования**

### *Изменения макрофитобентоса в 1964–2017 гг.*

Были проанализированы и обобщены материалы литературных источников, ландшафтных и гидробиотических исследований (летний период 1964, 1997, 2006 и 2017 гг.), проведенных в прибрежной зоне от м. Коса Северная до м. Толстого [18, 19]. Схема разрезов, вдоль которых производились наблюдения, представлена на рис. 1.

Статистическую обработку данных выполняли в пакете *MS Excel*. В ландшафтной структуре прибрежной зоны м. Коса Северная – м. Толстый в разные периоды времени выделяли несколько ДПК, причем с течением времени их состав и количество менялись. Так, в 1964 г. наблюдалось четыре ДПК; в 1997 г. только три; в 2006 г. количество выделяемых ДПК снизилось до двух; а в 2017 г. вновь возросло до четырех. Доминирующими видами макрофитов являлись эрикария косматая (*Ericaria crinita* (Duby) Molinari & Guiry = *Cystoseira crinita*),



Р и с . 1 . Карта-схема расположения ландшафтных и гидрботанических разрезов в прибрежной зоне от м. Коса Северная до м. Толстого (римскими цифрами обозначены разрезы). Изображение Bing (URL: <https://www.bing.com/map>)

Fig . 1 . Schematic map of the location of landscape and hydrobotanical profiles in the coastal zone Cape Kosa Severnaya – Cape Tolsty (Roman numerals stand for profiles). The image is adapted from Bing (available at: <https://www.bing.com/map>)

гонголария бородастая (*Gongolaria barbata* (Stackhouse) Kuntze = *Cystoseira barbata*) и филлофора курчавая (*Phyllophora crispa* (Huds.) P.S. Dixon).

Качественные и количественные изменения, произошедшие в ДПК прибрежной зоны, подробно описаны в работе [19]. В нашей работе мы сосредоточимся на изменениях относительного вклада доминирующих видов, сопутствующих видов и эпифитов, поскольку такие изменения сопровождали перестройку ДПК в рассматриваемый период.

Гидрохимические и гидрофизические показатели состояния водной среды (концентрация биогенных веществ, ОБВ, температура воды, скорость течения) существенно влияют на скорость роста макрофитов. Для выявления связи между динамикой ДПК и изменениями химико-биологического состояния прибрежной зоны в районе м. Коса Северная были проанализированы все доступные гидрофизические и гидрохимические данные наблюдений за 1998–2021 гг. Для целей настоящего исследования использовались данные о температуре воды, а также о содержании в воде нитратов, нитритов, аммония, фосфатов и ОБВ. По имеющимся данным были рассчитаны среднемесячные значения перечисленных характеристик. Проводилось также осреднение по глубине, выделены два слоя 0–10 м (верхний слой) и 10–20 м (нижний слой).

*Определение освещенности на глубине произрастания макрофитов*

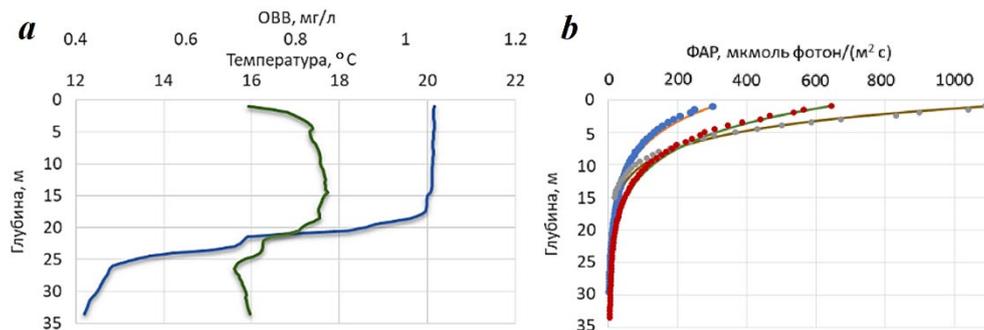
По имеющимся представлениям важнейшей для роста макроводорослей характеристикой является прозрачность воды, которая определяет количество световой энергии, доступной для фотосинтеза на глубине произрастания водорослей. Стандартные измерения на станциях в прибрежной зоне дают информацию о содержании ОВВ, и эти данные можно использовать для оценки уровня освещенности на глубине. Натурные синхронные измерения вертикальных профилей показателя ослабления направленного света на 660 нм (ПОС 660) и фотосинтетически активной радиации (ФАР) выполнялись на дрейфовых станциях траверза Севастопольской бухты с использованием зондирующего гидрофизического комплекса «Кондор». Концентрацию ОВВ в воде определяли по данным о ПОС 660 с использованием эмпирического соотношения  $C_{TSM} = 0.78 \cdot \text{ПОС } 660$ .

Снижение интенсивности ФАР с глубиной наиболее правдоподобно описывается экспоненциальной функцией

$$I_z = I_0 \exp(\beta z), \quad (1)$$

где  $I_0$  – освещенность на поверхности моря;  $\beta$  – коэффициент поглощения света в воде, зависящий от содержания в воде ОВВ;  $z$  – глубина. Для оценки величины  $\beta$  как функции  $C_{TSM}$  мы находили соотношение между коэффициентами  $\beta$ , полученными в результате применения аппроксимации (1) к натурным профилям ФАР, и средним содержанием ОВВ в верхнем перемешанном слое (рис. 2, а). Толщина этого слоя определялась по данным температурного профиля. Методом наименьших квадратов получены две формулы, по которым можно определить коэффициент поглощения  $\beta$ , зная среднее содержание ОВВ в верхнем перемешанном слое воды ( $C_{TSM}$ ):

$$\beta = \begin{cases} -1.1818C_{TSM}^3 + 1.6298C_{TSM}^2 - 0.7207C_{TSM} - 0.0264, & C_{TSM} < 1 \text{ мг/л,} \\ -0.6649 \ln C_{TSM} - 0.309, & C_{TSM} > 1 \text{ мг/л,} \end{cases} \quad (2)$$



Р и с. 2. Пример вертикальных профилей температуры воды (синяя линия) и содержания ОВВ (зеленая линия) на одной из станций (а); вертикальные профили ФАР (точки) и их аппроксимации (цветные линии) с использованием моделей (1) и (2) на трех выборочных профилях (б)

F i g. 2. Example of vertical profiles of water temperature and total suspended matter content at one of the stations (a); vertical profiles of FAR (dots) and their approximations (colour lines) using models (1) and (2) at three profiles (b)

Используя эти аппроксимации и зная интенсивность солнечной радиации на поверхности воды, можно определить количество света, поступающее на глубину произрастания водорослей при заданной мутности воды в верхнем слое. Качество полученной модели (2) иллюстрирует рис. 2, *b*, на котором точками изображены натурные данные о вертикальных профилях ФАР на контрольных станциях и линиями – модельные аппроксимации с использованием выражений (1) и (2). Относительная среднеквадратичная ошибка моделей лежит в интервале от 7 до 15 % средней освещенности в слое 0–25 м.

Необходимо отметить, что модель (2) является региональной и не может претендовать на универсальность. Для получения более обобщенных зависимостей, очевидно, необходимо иметь больше данных из разных акваторий. Однако для проведения анализа изменчивости донных фитоценозов в районе м. Коса Северная мы считаем найденные зависимости достаточно репрезентативными.

Пользуясь данной моделью, можно также оценить потенциальную нижнюю границу распространения той или иной водоросли в зависимости от среднего коэффициента ослабления света в воде. Определим эту границу на глубине, где интенсивность света такова, что скорость фотосинтеза водоросли равна ее темновому дыханию:

$$(P_{\max} + R_d) \cdot \operatorname{th}\left(\frac{\alpha I_0 \exp(\beta z)}{P_{\max} + R_d}\right) = R_d,$$

где  $P_{\max}$  – максимальная скорость фотосинтеза;  $R_d$  – темновое дыхание;  $\alpha$  – угол наклона фотосинтетической кривой в области малой освещенности. Отсюда получим

$$z = \frac{1}{\beta} \ln\left(\alpha \cdot \operatorname{th}\left(\frac{R_d}{P_{\max} + R_d}\right) (P_{\max} + R_d) / \alpha I_0\right). \quad (3)$$

Задавая  $C_{TSM} = 1$  мг/л, получим оценку максимальной глубины роста донных фитоценозов 10–14 м, при снижении  $C_{TSM}$  до 0.5 мг/л нижняя граница передвинется к отметкам 25–35 м. Данная оценка является функцией фотосинтетических параметров водоросли, мутности воды и интенсивности света на поверхности воды. Это потенциально максимальная величина распространения по глубине водоросли в море, однако для более точной оценки необходимо учитывать достаточность концентрации растворенных биогенных веществ, а также выделение водорослью органических веществ как в процессе ее роста, так и в процессе отмирания талломов или выедания водоросли морскими гидробионтами. Можно сказать, что наблюдаемая биомасса водоросли на той или иной глубине является результатом баланса между ее образованием в ходе фотосинтеза, усвоением неорганических веществ и элиминированием в ходе выделения, распада или выедания. Поэтому реальная нижняя граница произрастания конкретной водоросли будет находиться на меньшей глубине, чем рассчитанная по формуле (3).

#### *Имитационная модель динамики донных фитоценозов*

В работе использована модель, ранее протестированная в ходе исследований динамики биомассы макрофитов в б. Круглой и заливе Донузлав [20, 21].

Предложенная модель динамического баланса энергии позволяет оценить скорость роста морских трав, количество поглощенных биогенных элементов, выделившегося кислорода, образовавшегося и выделившегося органического вещества, концентрацию азота и фосфора в тканях растений. Уравнения динамики биомассы макроводорослей и морских трав записываются в виде балансового соотношения

$$dB/dt = (P_r - eG_r - m)B, \quad (4)$$

где  $B$  – биомасса всех тканей растения: корней, корневища и листьев, г сух. вес/м<sup>2</sup> или г сух. вес/м<sup>3</sup>;  $t$  – время, ч;  $P_r$  – удельная скорость чистой первичной продукции, 1/ч;  $G_r$  – удельная скорость валовой первичной продукции, 1/ч;  $e$  – отношение выделенного растворенного органического вещества в процессе жизнедеятельности водоросли к валовой продукции за то же время;  $m$  – коэффициент потери биомассы вследствие механических повреждений, отмирания тканей, выедания морскими животными.

### Результаты и обсуждение

На основе данных гидробиотических съемок, опубликованных в работах [18, 19], исследована структура донных фитоценозов и выявлена динамика относительного распределения доминирующих видов (базифитов), сопутствующих видов и эпифитов (рис. 3).

#### Структурные изменения донных фитоценозов

Эрикариево-гонголариевый фитоценоз на глыбово-валунном бенче глубиной до 1 м площадью 14.7 га количественно изменился лишь в последний период наблюдений 2006–2017 гг.: его биомасса увеличилась более чем в два раза. При этом доля эпифитов сократилась с 11 до 5 %, хотя их масса увеличилась в 1.3 раза. Эрикариево-гонголариевый фитоценоз, расположенный на склоне до 5 м глубины, претерпевал существенные изменения на протяжении всего периода наблюдений. С 1964 по 1997 г. биомасса фитоценоза сократилась, а доля сопутствующих видов и эпифитов возросла до 42 %. Эти изменения продолжились в 1997–2006 гг., когда доля *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata* (базифитов) в фитоценозе сократилась уже до 48 %. Эпифиты составляли 50 % биомассы макрофитов, что свидетельствует о крайнем неблагополучии экосистемы. После 2006 г. ситуация улучшилась, что привело к росту биомассы всего фитоценоза и возрастанию массы доминирующих макрофитов *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata* до 98 %.

Эрикариево-гонголариево-филлофоровый фитоценоз на глубинах до 10 м также деградировал на протяжении всего времени наблюдений. Если в 1964 г. в состав сообщества входили только базифиты *Ericaria crinita*, *Gongolaria barbata* и *Phyllophora crispa*, то в 1997 г. наблюдалось снижение общей биомассы фитоценоза и заметную долю стали занимать эпифиты. К 2017 г. на месте *Ericaria crinita*, *Gongolaria barbata* и *Phyllophora crispa* возникло новое сообщество, в котором доминирующую роль играют виды *Dictyota* spp.

На слабонаклонной равнине с глубинами 10–15 м почти исчез филлофоровый фитоценоз, существовавший в середине прошлого века и имевший достаточно большую биомассу (870 г/м<sup>2</sup>) при небольшой доле сопутствующих видов и эпифитов (6 и 5 % соответственно). В 2017 г. были зарегистрированы

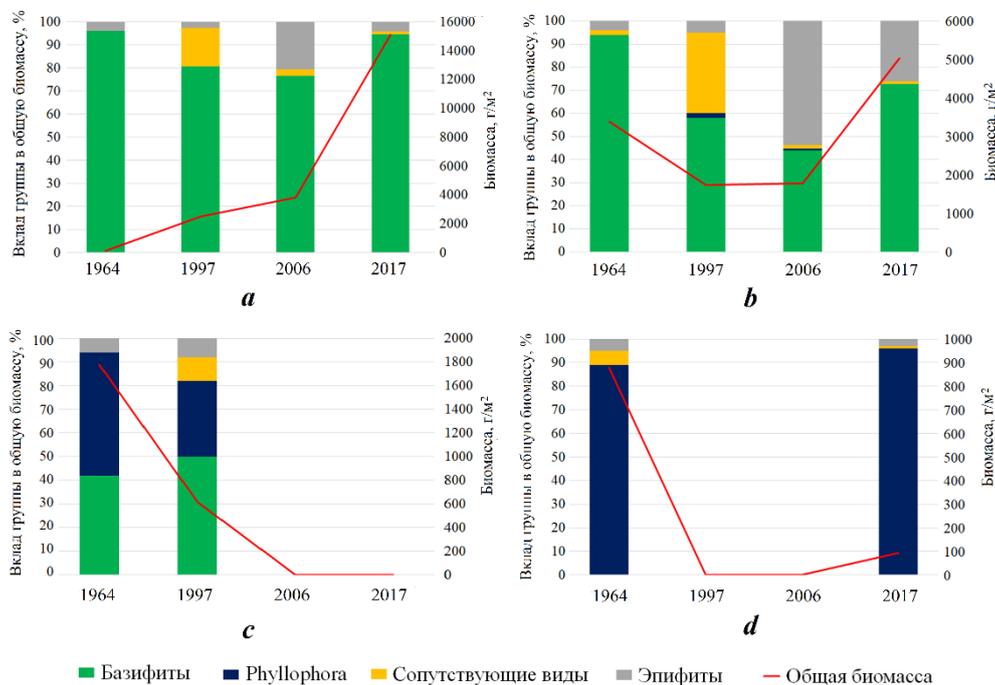


Рис. 3. Общая биомасса донных фитоценозов и их структура в районе мыса Коса Северная: а – глыбово-валунный бенч с преобладанием *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata* (0.5–1 м); б – подводный склон, где доминируют *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata* (1–5 м); в – подводный склон с чередованием участков, где доминирует *Ericaria crinita*, *Gongolaria barbata* и *Phyllophora crispa* (5–10 м); д – слабонаклонная равнина, где доминирует *Phyllophora crispa* (10–15 м). Общая масса водорослей фитоценоза показана за 1964–2017 гг.

Fig. 3. Dynamics of the total biomass of bottom phytocenoses located in Cape Kosa Severnaya and their structure: а – boulder benches with a predominance of *Ericaria crinita* and *Gongolaria barbata* (0.5–1 m); б – upper shoreface dominated by *Ericaria crinita* and *Gongolaria barbata* (1–5 m); в – upper shoreface with alternating areas dominated by *Ericaria crinita*, *Gongolaria barbata* and *Phyllophora crispa* (5–10 m); д – gently dipping plain dominated by *Phyllophora crispa* (10–15 m). The total algal mass of the phytocenosis is shown for 1964–2017

лишь отдельные участки дна, где представлена *Phyllophora crispa* со средней биомассой 90 г/м<sup>2</sup>. Однако восстановление филлофорового фитоценоза свидетельствует о наступлении благоприятных условий, среди которых главное – это повышение прозрачности воды.

#### Изменения гидрохимического состояния вод

Проанализируем теперь имеющиеся в банке данных МГИ данные об изменчивости температуры воды, а также измерения гидрохимических показателей водной среды в районе м. Коса Северная: содержания в воде растворенных неорганических соединений азота и фосфора, ОВВ. Существенная неоднородность распределения данных наблюдений во времени не позволяет

рассчитать среднегодовые значения гидрохимических показателей или построить достоверный ряд среднемесячных наблюдений. Для оценки их динамики рассмотрим изменчивость этих показателей в теплый период года, характеризующийся максимальным количеством наблюдений и наиболее интенсивным ростом макрофитов. На рис. 4 показано содержание ОВВ в сентябре с 1998 по 2021 г. (из-за отсутствия данных за сентябрь в нескольких случаях были использованы данные за август). На этот месяц приходится пик биомассы макроводорослей и максимальное количество измерений гидрохимических параметров воды в разные годы. Как видим, с 1998 по 2017 г. мутность воды в верхнем слое заметно снизилась, что вполне может объяснить существенно увеличившуюся биомассу фитобентоса на глубинах до 5 м. В нижнем слое также наблюдалась слабая тенденция к снижению мутности, однако она далеко не так хорошо выражена. К 2006 г. полностью исчез эрикариево-гонголариево-филлофоровый фитоценоз на глубинах свыше 5 м и филлофоровый фитоценоз на глубинах 10–15 м. По имеющимся данным, среднее содержание ОВВ в вегетационный период в 2006 г. менялось в интервале 1.5–2 мг/л, что согласно уравнению (3) ограничивало толщину фотического слоя до 5–7 м.

В ходе анализа временной изменчивости гидрохимического состояния вод в исследуемом районе выяснилось, что значимых трендов содержания биогенных веществ в рассматриваемый период не наблюдалось. Концентрации неорганических соединений азота и фосфора колебались в пределах, типичных для прибрежных вод Севастополя ( $[\text{NO}_3] + [\text{NO}_2]$  от 0.03 до 3.54;  $[\text{NH}_4]$  от 0.02 до 2.95;  $[\text{PO}_4]$  от 0.001 до 0.9 мкмоль/л). Среднее значение концентрации фосфатов 0.11 мкмоль/л, как показали численные эксперименты с моделью фитоценоза, является недостаточным для роста макроводорослей. Таким образом, содержание неорганического фосфора в воде является лимитирующим фактором. При увеличении этого параметра водной среды наблюдается интенсивный рост макроводорослей.

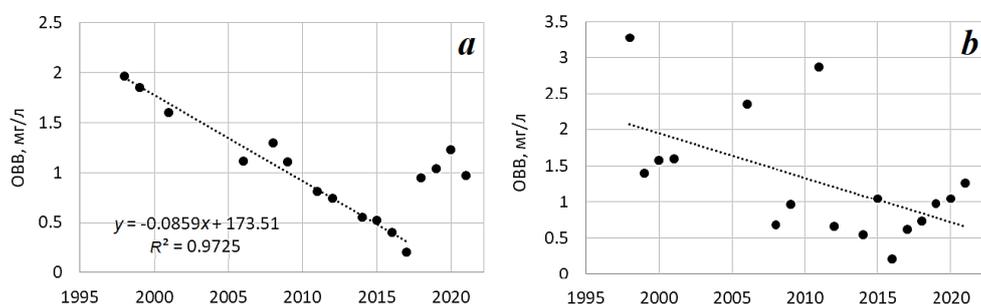


Рис. 4. Содержание ОВВ в верхнем (а) и нижнем (б) слоях воды в сентябре в 1998–2021 гг. в районе м. Коса Северная

Fig. 4. TSM content in the upper (a) and lower (b) layers of water in September during 1998–2021 near Cape Kosa Severnaya

### Модельные исследования

Имеющиеся данные о гидрохимическом состоянии вод в районе м. Коса Северная не позволяют выполнить детальный расчет динамики биомассы фитоценозов на протяжении всего периода. Мы выбрали для экспериментов наиболее обеспеченный данными период с мая 1998 г. по февраль 2002 г. Данные имели дискретность один месяц и были проинтерполированы при пропусках, шаг модели по времени составлял сутки. Помимо гидрохимических показателей, управляющими переменными модели были температура воды в слое 0–10 м и среднесуточная интенсивность солнечной радиации на поверхности моря (рис. 5, *a – c*).

На рис. 5, *d* показаны результаты моделирования (на глубине 4 м) с входными рядами переменных. В начале анализируемого периода содержание

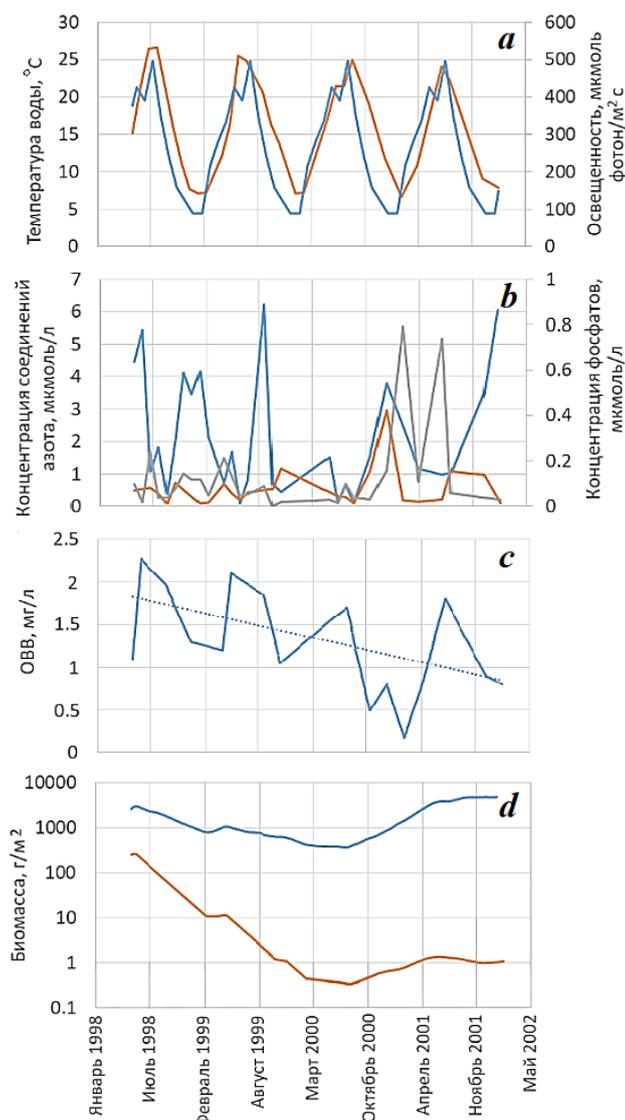


Рис. 5. Внешние условия модели и результаты модельного расчета на четыре года в районе м. Коса Северная: *a* – температура воды (красная линия) и освещенность поверхности моря (синяя линия); *b* – концентрация соединений аммония (синяя линия), нитратов и нитритов (красная линия) и фосфора (серая линия) в воде; *c* – концентрация ОБВ (сплошная линия) и линия тренда (пунктирная линия); *d* – биомасса *Eriocaria crinita*, *Gongolaria barbata* (синяя линия) и *Phyllophora crispa* (красная линия)

Fig. 5. External conditions of the model and results of model calculations for 4 years in Cape Kosa Severnaya: *a* – water temperature (red line) and illumination of the sea surface (blue line); *b* – concentrations of ammonium compounds (blue line), nitrates and nitrites (red line) and phosphorus (grey line) in water; *c* – TSM concentration (solid line) and trend line (dotted line); *d* – biomass of *Eriocaria crinita*, *Gongolaria barbata* (blue line) and *Phyllophora crispa* (red line)

ОВВ в верхнем слое составляло 1.5 мг/л и более. При такой мутности воды *Phyllophora crispa* могла расти на глубинах не более 4 м. Видим, что в результате незначительного снижения количества взвешенных веществ эрикариево-гонголариевый фитоценоз за четыре года модельного расчета восстановился, а *Phyllophora crispa* почти полностью исчезла. К 2017 г., по данным наблюдений, филлофоровый фитоценоз начал восстанавливаться на глубинах 10–15 м, хотя в 2017 г. его биомасса достигла значения в 10 раз меньше зафиксированного в начале периода наблюдений. Можно с уверенностью предположить, что восстановление стало возможным вследствие улучшения качества воды. Концентрация ОВВ в теплый период года имеет отрицательный тренд (рис. 4, а).

Представляет интерес анализ изменчивости модельных функций, отражающих относительное содержание азота и фосфора в тканях макроводорослей (рис. 6):

$$f(Q_N) = \frac{Q_N - Q_N^{\min}}{Q_N^{\max} - Q_N^{\min}}, \quad f(Q_P) = \frac{Q_P - Q_P^{\min}}{Q_P^{\max} - Q_P^{\min}}, \quad (5)$$

где  $Q_P$  и  $Q_N$ , мкмоль/г – концентрации фосфора и азота в тканях водоросли;  $Q_P^{\min}$ ,  $Q_P^{\max}$ ,  $Q_N^{\min}$ ,  $Q_N^{\max}$ , мкмоль/г – минимальные и максимальные значения концентраций (видоспецифические характеристики водорослей). Уровень резервов неорганических соединений азота и фосфора в клетках водорослей, согласно уравнениям модели [22], влияет на скорость усвоения биогенных соединений из морской воды и скорость фотосинтеза. Таким образом, функции (5) являются лимитирующими для роста макроводорослей. На рис. 6 видно, что на протяжении четырех лет модельного времени лимитирующее действие азота и фосфора проявлялось поочередно, но большую часть времени лимитирующим элементом для макрофитобентоса являлся фосфор.

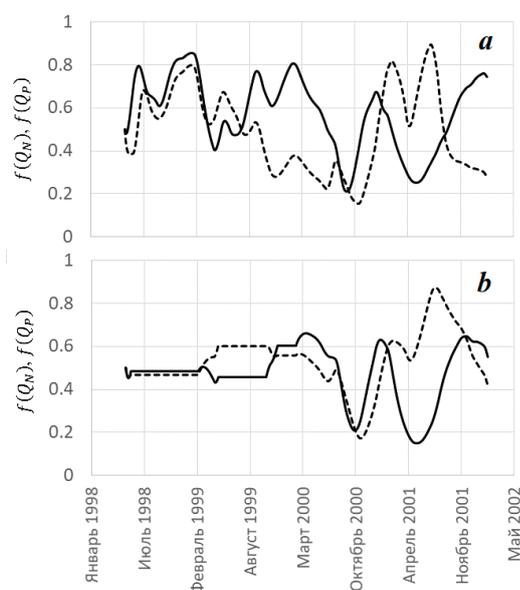


Рис. 6. Временная изменчивость функций  $f(Q_N)$  (сплошная линия) и  $f(Q_P)$  (штриховая линия), лимитирующих рост *Ericaria crinita*, *Gongolaria barbata* (а) и *Phyllophora crispa* (б) в районе м. Коса Северная

Fig. 6. Temporal variability of the functions  $f(Q_N)$  (solid line) and  $f(Q_P)$  (dashed line) limiting the growth of *Ericaria crinita*, *Gongolaria barbata* (a) and *Phyllophora crispa* (b) near Cape Kosa Severnaya

### Заключение

Выявлены значительные изменения биомассы фитоценозов доминирующих видов Черного моря. Эти изменения проявляются по-разному в зависимости от глубины произрастания донной растительности. В эрикариево-гонголариевом фитоценозе, занимающем мелководье с глубинами до 5 м, к 2006 г. произошло увеличение биомассы *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata*, характеризующееся ростом доли эпифитов с 5 до 50 %. В 2017 г. наблюдалось восстановление доминирующих видов, а общая биомасса возросла почти в три раза. При этом виды донной растительности, произрастающие глубже 5 м, претерпели катастрофическую деградацию. Эрикариево-гонголариево-филлофоровый фитоценоз, расположенный на глубинах 5–10 м, полностью исчез к 2006 г., а на его месте в 2017 г. была зафиксирована *Dictyota* spp. Филлофоровый фитоценоз, расположенный на глубинах свыше 10 м, существенно деградировал еще в 1997 г., его биомасса сократилась почти до нуля. В 2006 г. *Phyllophora crispa* на этих глубинах не регистрировалась, но к 2017 г. появились отдельные участки дна, где представлена *Phyllophora crispa* с биомассой, меньшей на порядок по сравнению с 1964 г.

Проанализировав изменения гидрохимического режима за 1998–2021 гг., мы пришли к выводу, что зафиксированные трансформации донных сообществ были вызваны в основном изменениями прозрачности воды, связанными с содержанием ОВВ. Гидрохимические показатели качества воды варьировали в течение рассматриваемого периода, однако заметных тенденций в изменении концентраций биогенных соединений не было выявлено. В 1998–2017 гг. прозрачность воды увеличивалась в летний период года (август – сентябрь), однако в 2018–2021 гг. было вновь зафиксировано увеличение мутности воды. При дальнейшем снижении прозрачности процессы восстановления биомассы *Phyllophora crispa* на глубинах свыше 10 м могут остановиться, что приведет к исчезновению этой макроводоросли в исследуемом районе, имеющем природоохранную ценность. Анализ модельных функций, характеризующих влияние концентрации неорганических соединений азота и фосфора в воде на рост макроводорослей, показал, что рост макроводорослей поочередно лимитируют азотистые и фосфорные неорганические соединения.

Для организации мониторинговых исследований трансформации донных фитоценозов целесообразно регулярно с частотой раз в несколько лет проводить гидробиотанические съемки в сочетании с гидрохимическими и гидрофизическими исследованиями прибрежной зоны.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zharikov V., Bazarov K., Egidarev E. Use of remotely sensed data in mapping underwater landscapes of Srednyaya Bay (Peter the Great Gulf, Sea of Japan) // Geography and Natural Resources. 2017. Vol. 38, iss. 2. P. 188–195. <https://doi.org/10.1134/S187537281702010X>
2. Петров К. М. Подводные ландшафты: теория, методы исследования. Ленинград : Наука, 1989. 124 с.
3. Митина Н. Н. Геоэкологические исследования ландшафтов морских мелководий. Москва : Наука, 2005. 197 с.

4. Ландшафтный подход к оценке состояния макрофитобентоса в условиях конфликтного природопользования / Т. В. Панкеева [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зоны и комплексное использование ресурсов шельфа. 2014. Вып. 29. С. 70–79. EDN UXWYRD.
5. Панкеева Т. В., Миронюк О. А., Панкеева А. Ю. Исследования донных ландшафтов прибрежной зоны Тарханкутского полуострова (Крым, Черное море) // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10, № 1. С. 800–805. EDN VQDXCT.
6. Агаркова-Лях И. В., Скребец Г. Н. Ландшафты береговой зоны Черного моря // Современные ландшафты Крыма и сопредельных акваторий / под ред. Е. А. Позаченюк. Симферополь : Бизнес-Информ, 2009. Разд. 4.3.1. С. 250–279. EDN QKKEKJ.
7. Митина Н. Н., Чуприна Е. В. Подводные ландшафты Черного и Азовского морей: структура, гидроэкология, охрана. Москва : ФГУП «Типография» Россельхозакадемии, 2012. 320 с. EDN VNLLGW.
8. Тамайчук А. Н. Ландшафты Черного моря // Современные ландшафты Крыма и сопредельных акваторий. Симферополь : Бизнес-Информ. 2009. С. 497–529.
9. Тамайчук А. Н. Пространственная неоднородность природных условий и районирование Черного моря // Известия Русского географического общества. 2017. Т. 149, № 2. С. 30–50. EDN YLYNCZ.
10. Пасынкова Л. А. Ландшафты континентального склона Черного моря: принципы выделения и характеристика // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Серия: География. 2008. Т. 21, № 3. С. 266–273. EDN XEDROD.
11. Пасынкова Л. А. Проблема устойчивости подводных ландшафтов в районе Ялтинской бухты // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Серия: География. 2010. Т. 23, № 3. С. 331–333. EDN MCQMJM.
12. Позаченюк Е. А., Пенно М. В. К обоснованию выделения морских антропогенных ландшафтов // Наукові записки Вінницького педуніверситету. Географія. 2013. № 25. С. 142–148.
13. Бондарев И. П. Проблема нестабильности подводного ландшафта (на примере Северной части Черного моря) // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Серия: География. 2008. Т. 21(60), № 2. С. 128–133. EDN XCJNRF.
14. Dar N., Pandit A., Ganai B. Factors affecting the distribution patterns of aquatic macrophytes // Limnological Review. 2014. Vol. 14, iss. 2. P. 75–89. <https://doi.org/10.2478/limre-2014-0008>
15. Macrophyte habitat architecture and benthic-pelagic coupling: Photic habitat demand to build up large P storage capacity and bio-surface by underwater vegetation / K. Teubner [et al.] // Frontiers in Environmental Science. 2022. Vol. 10. P. 1–20. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.901924>
16. Macrophyte landscape modulates lake ecosystem-level nitrogen losses through tightly coupled plant-microbe interactions / M. Vila-Costa [et al.] // Limnology and Oceanography. 2015. Vol. 61(1). P. 1–11. <https://doi.org/10.1002/lno.10209>
17. Kalra T., Ganju N., Testa J. Development of a submerged aquatic vegetation growth model in the Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST v 3.4) model // Geoscientific Model Development. 2020. Vol. 13, iss. 11. P. 5211–5228. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-5211-2020>

18. Панкеева Т. В., Миронова Н. В. Многолетняя динамика подводных ландшафтов прибрежной зоны мыс Коса Северная – мыс Толстый (Севастополь) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 2. С. 70–85. EDN HINHRC. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2022-2-70-85>
19. Панкеева Т. В., Миронова Н. В. Пространственно-временные изменения макрофитобентоса в прибрежных ландшафтах у мыса Коса Северная (Севастополь) // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 2. С. 66–72. EDN RBJDBR. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2023-2-066-072>
20. Васечкина Е. Ф., Филиппова Т. А. Имитационное моделирование донного фитоценоза в прибрежной зоне Крыма // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 3. С. 342–359. EDN NKQHDO. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-3-342-359>
21. Филиппова Т. А., Васечкина Е. Ф. Моделирование химико-биологических процессов роста морских трав // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 6. С. 694–708. EDN HHFSMU. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2022-6-694-708>
22. Васечкина Е. Ф., Филиппова Т. А. Моделирование биохимических процессов в бентосных фитоценозах прибрежной зоны // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 1. С. 52–69. EDN YZBBNR. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-1-52-69>

Поступила 09.01.2024 г.; одобрена после рецензирования 19.03.2024 г.; принята к публикации 27.03.2024 г.; опубликована 25.06.2024 г.

*Об авторах:*

**Пархоменко Анастасия Владимировна**, аспирант, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-2378-7067**, **ResearcherID: 5090-2023**, **SPIN-код: 1909-8383**, [avparkhomenko52@gmail.com](mailto:avparkhomenko52@gmail.com)

**Васечкина Елена Федоровна**, заместитель директора по научно-методической и воспитательной работе, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0001-7007-9496**, **Scopus Author ID: 6507481336**, **ResearcherID: P-2178-2017**, **SPIN-код: 2933-3834**, [vasechkina.elena@gmail.com](mailto:vasechkina.elena@gmail.com)

**Латушкин Александр Александрович**, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-3412-7339**, **Scopus Author ID: 56298305600**, **ResearcherID: U-8871-2019**, **SPIN-код: 1239-2858**, [sevsalat@gmail.com](mailto:sevsalat@gmail.com)

*Заявленный вклад авторов:*

**Пархоменко Анастасия Владимировна** – подбор, систематизация и анализ литературных источников, анализ гидрохимических данных наблюдений, подготовка текста статьи, картографических материалов и списка литературы

**Васечкина Елена Федоровна** – постановка проблемы, численное моделирование, анализ результатов исследования, подготовка текста статьи и списка литературы

**Латушкин Александр Александрович** – экспедиционные гидрооптические исследования, обработка и анализ данных

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*