

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАТОМЕЙ
Dactyliosolen fragilissimus И *Cerataulina pelagica*
В ОСЕННЕМ ФИТОПЛАНКТОНЕ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ
БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В 2020–2021 ГГ.

© 2024 г. А. С. Мельник^{a, *}, О. А. Дмитриева^{a, b, **}, Е. Е. Ежова^a,
А. Ю. Шартон^a, А. А. Кондрашов^a

^aИнститут океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия

^bАтлантический филиал Всероссийского научно-исследовательского института
рыбного хозяйства и океанографии, Калининград, Россия

*e-mail: AnastassizaHabar@mail.ru

** e-mail: phytob@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.02.2023

После доработки 13.06.2023

Принята к публикации 17.07.2023

В середине октября 2020 г. вдоль побережья Самбийского п-ова было зарегистрировано цветение воды нетипичными для акватории юго-восточной части Балтийского моря диатомовыми водорослями *Dactyliosolen fragilissimus* и *Cerataulina pelagica*. Оба вида обнаружены в прибрежной зоне западного и северного побережий п-ова Самбийский до глубин 32 м, от Балтийского пролива до порта Пионерский. В начале ноября 2021 г. зарегистрирована массовая вегетация *C. pelagica* как в мелководной прибрежной зоне северного побережья п-ова Самбийский, так и в глубоководной зоне юго-восточной части Балтийского моря. Биомасса этого вида достигала 2.8 г/м³. Оба вида диатомей вегетировали в пределах всей исключительной экономической зоны России. Сложившаяся в период исследования гидрологическая ситуация могла способствовать проникновению видов в район исследования путем поверхностного переноса из Арконского бассейна.

Ключевые слова: Балтийское море, фитопланктон, цветение воды диатомовыми водорослями, *Dactyliosolen fragilissimus*, *Cerataulina pelagica*

DOI: 10.31857/S0320965224010104 **EDN:** zaaleu

ВВЕДЕНИЕ

Исследования фитопланктона Балтийского моря имеют длительную историю. К настоящему времени хорошо известно, что сезонная динамика развития фитопланктона в Балтийском море характеризуется тремя основными максимумами биомассы, приводящими к цветению воды: весенним, формирующимся в марте — апреле и обусловленным, главным образом, массовой вегетацией диатомовых водорослей и динофлагеллят (Kahru, Elmgren, 2014); летним, возникающий в июне — июле — в период, когда преимущество в развитии получают цианобактерии (*Nodularia spumigena* Mertens ex Bornet & Flahault 1888, *Aphanizomenon* spp., *Dolichospermum* spp.); осенним, наблюдающимся, как правило, в сентябре—октябре, когда процессы выравнивания температуры водных масс по вертикали и перемешивания вод

приводят к развитию третьего годового максимума фитопланктона. В осенний период доминируют диатомовые водоросли, например, *Coscinodiscus granii* (Gough, 1905) (Thamm et al., 2004; Евтушенко и др., 2016). В настоящее время акватория Балтийского моря подвержена различным видам антропогенного воздействия, связанного с дноуглублением, рыболовством и судоходством. На изменение условий среды в первую очередь реагируют фитопланктонные сообщества, в которых могут происходить структурные перестройки. Поэтому выявление причин их возникновения — естественных (изменение гидрологической ситуации) или из-за эвтрофирования и загрязнения вод — актуальная задача гидробиологических исследований. Исследованию распространения нетипичных диатомей в литовских и польских водах Балтийского моря посвящен ряд работ (Żmijewska et al., 2000; Łotocka, 2006; Olenina, Kownacka, 2010; Система ..., 2017). Подобные сведения для Российского сектора юго-восточной части Балтийского моря отсутствуют.

Сокращения: ЮВБ — Юго-Восточная Балтика; ВКС — верхний квазиоднородный слой; ИЭЗ — исключительно экономическая зона; ФЦГ 1–ФЦГ 4 — фитоценоотические группировки 1–4; ANOSIM — Analysis of similarities (анализ сходства); SIMPER — Similarity Percentages (процент сходства).

Цель работы — оценка пространственного распределения биомассы фитопланктона, диатомей *Dactyliosolen fragilissimus* (Bergon, 1903) и *Cerataulina pelagica* (Cleve) Hendey, 1937 и сообществ фитопланктона в акватории юго-восточной части Балтийского моря.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для работы послужили пробы фитопланктона, отобранные 17 октября 2020 г. в мелководной прибрежной зоне Самбийского п-ова на судне “Норд-3” и 29 октября — 12 ноября 2021 г. в 48-м рейсе НИС “Академик Борис Петров” в границах территориальных вод России в Юго-Восточной Балтике (далее ЮВБ). Район исследования охватывал Гданьскую впадину, южный склон Восточно-Готландской впадины, Самбийско-Куршское плато, а также мелководную прибрежную зону Самбийского п-ова и Куршской косы (рис. 1).

Пробы фитопланктона объемом 1 дм³ отбирали из поверхностного горизонта (0–1 м). Материал фиксировали раствором Кузьмина. Сгущение проводили методом осаждения. Для подсчета организмов использовали камеру Нажотта объемом 0.05 см³. К доминирующим относили виды, составляющие ≥10% суммарной биомассы фитопланктона в пробе. Обработку проб выполняли стандартными методами (Методические..., 1988; Радченко и др., 2010). Всего проанализировано 24 пробы фитопланктона.

Статистическую обработку результатов съемки 2021 г. года проводили в программе PRIMER v.6. Сходство между пробами рассчитывали на основе индекса Брея-Кертиса, используя значения относительной биомассы таксонов микроводорослей в каждой пробе. На основании полученных матриц сходства проводили кластеризацию и ординацию проб методом многомерного шкалирования MDS. Построения выполняли для данных, трансформированных путем логарифмирования величин биомассы популяций водорослей, чтобы

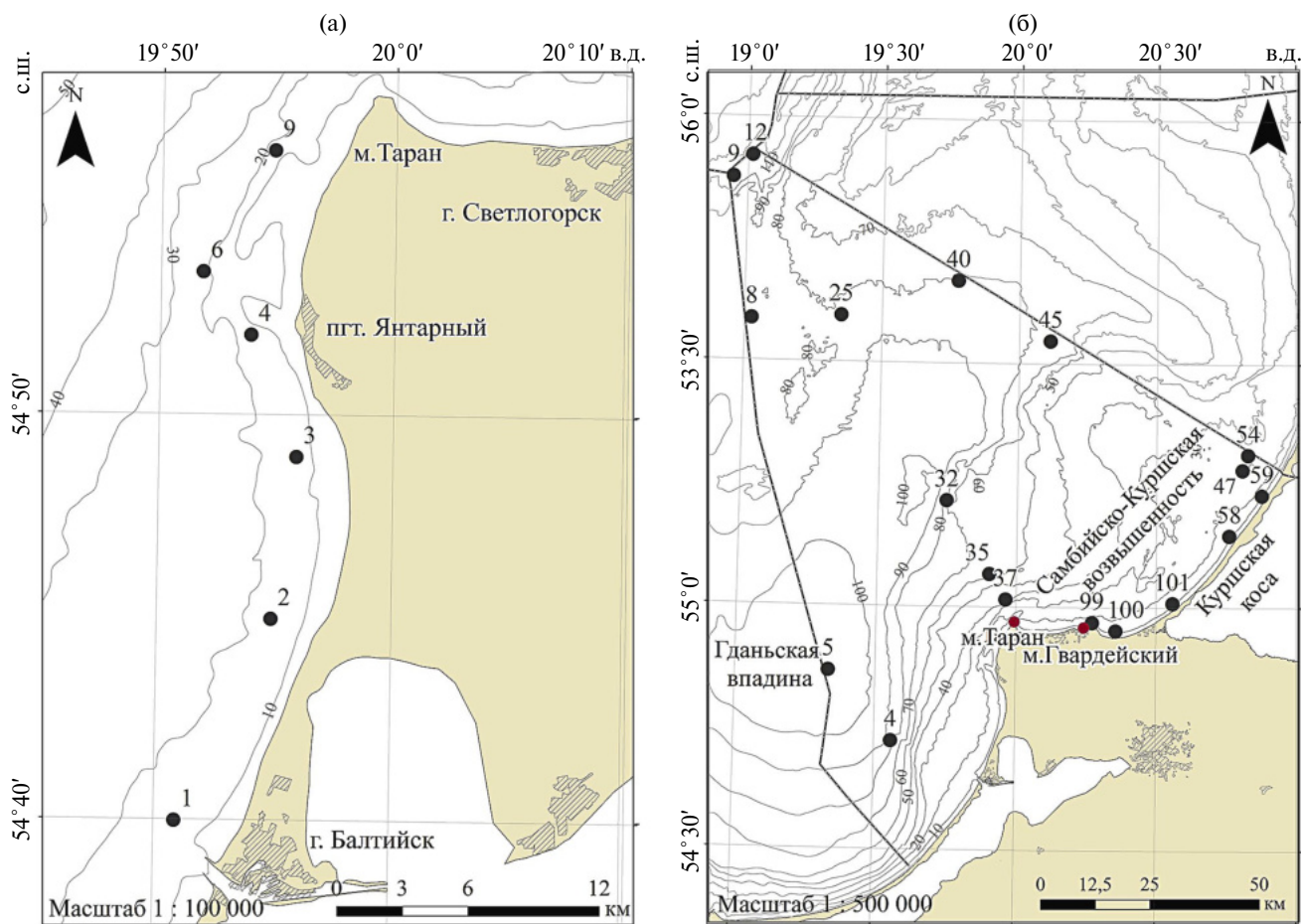


Рис. 1. Расположение станций отбора проб: а — западное побережье Самбийского п-ова, юго-восточная часть Балтийского моря, октябрь 2020 г., б — исключительная экономическая зона России, октябрь–ноябрь 2021 г. ● — номера станций.

уменьшить влияние на оценку сходства биомассы доминирующих таксонов. Достоверность различий между группами проб по структуре сообществ фитопланктона определяли методом ANOSIM. Вклад отдельных видов в сходство внутри группы проб и между группами проб оценивали с помощью процедуры SIMPER (Clarke, Gorley, 2006).

В октябре — ноябре 2021 г. для оценки термохалинных условий использовали мультипараметрический зонд Idronaut OS316 Plus. CTD-зондирования проводили на каждой станции. В прибрежной экспедиции в октябре 2020 г. температуру поверхностного слоя на станциях измеряли при помощи погружного ртутного термометра (диапазон измерения от -5 до $+55^{\circ}\text{C}$; цена деления шкалы 1°C).

Для анализа метеоусловий, скорости и направления течений в поверхностном слое для Балтийского моря использовали данные службы мониторинга морской среды CMEMS [<https://marine.copernicus.eu>]. Оценку среднесуточных полей течения осуществляли за период, предшествующий отбору проб, а также во время отбора проб. Служба использует численную модель расчета течений NEMO v. 4.0, которая обеспечивает пространственное разрешение расчетов 2×2 км по горизонтали и 1 м по вертикали (NEMO ..., 2019).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гидрологическая характеристика юго-восточной части Балтийского моря. Распределение температуры и солености по глубине соответствовало осеннему типу стратификации, для которого характерно выхолаживание верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) и заглубление сезонного термоклина.

В разных районах ЮВБ в 2021 г. толщина ВКС изменялась в пределах 35–47 м с температурой 9.8 – 11.8°C и соленостью 7.1–7.4 psu. Термоклин находился на глубинах 35–55 м. Содержание растворенного кислорода монотонно убывало с увеличением глубины от начала термоклина до значений <2 мг/л в придонном слое. В прибрежной зоне 17 октября 2020 г. температура на шести исследованных станциях варьировала от 10.0 до 11.0°C .

Анализ среднесуточных течений поверхностного слоя в октябре–ноябре 2021 г. при помощи модели течений NEMO показал, что в период осенних наблюдений пространственная структура течений в поверхностном слое моря в районе исследования была характерной для Балтийского моря и обусловлена ветрами западных румбов. С 12 по 30 октября приповерхностный ветер менялся от западного до юго-восточного направления. Это обеспечивало поступление воды вдольбереговой адвекцией из Арконского и Борнхольмского бассейнов в район Гданьской

впадины и далее — в район выполнения работ в ИЭЗ России. Скорость движения воды в отдельные периоды составляла более 0.6 м/с (рис. 2а, 2б). С 30 октября по 5 ноября течения ослабевали, а с 6-го ноября интенсивное поступление воды возобновилось.

С 7 по 13 октября 2020 г. после периода стагнации происходило поступление воды из центральной Балтики (район Слупского порога) в российскую часть ЮВБ. Скорость течения была 0.1 – 0.2 м/с. В середине месяца над акваторией восточной части Балтики (Балтийского моря) преобладали ветра северо-восточных румбов, что вызвало отток воды из Литовской зоны моря в район исследования. Продолжительность ветрового воздействия была достаточна для частичного обновления поверхностных вод российской части ЮВБ. Скорость течения в поверхностном слое локально достигала значений 0.5 – 0.6 м/с. Явление носило кратковременный характер. Анализ реконструкции течений не позволил однозначно сказать, что поступившая вода принадлежит Борнхольмскому или Арконскому бассейнам (рис. 2в, 2г).

Фитопланктон юго-восточной части Балтийского моря в 2021 г. В период исследования осенью 2021 г. фитопланктон представляли 96 таксонов из 8 систематических групп. Число таксонов рангом ниже рода было следующим: отделы диатомовых — 21, зеленых — 21, динофитовых — 18, цианобактерий — 26, криптофитовых — 7. По одному виду отмечено среди церкозой, гаптофитовых и флагеллят.

Анализ распределения суммарной биомассы фитопланктона в 2021 г. показал неоднородность ее распределения на исследуемой акватории. Она менялась от 0.1 до 3 г/м³, основной вклад вносили диатомовые водоросли (86–98%) (рис. 3).

Основным структурообразующим видом была нехарактерная для этой части ЮВБ диатомея *Cerataulina pelagica* наряду с обычным для Балтики доминирующим осенним видом *Coscinodiscus granii*. Распределение биомассы *Cerataulina pelagica* характеризовалось пространственной неоднородностью. Ее биомасса изменялась от 0.01 до 2.84 г/м³, а среднее значение было 0.73 ± 0.20 г/м³. Полное отсутствие вида зафиксировано над Южным склоном Готландской впадины (ст. 9). Минимальные значения биомассы отмечены в районе Южного склона Готландской впадины (ст. 12) и над северо-восточной оконечностью Гданьской впадины в районе 80-й изобаты (ст. 40, Литовский разрез). Максимальная биомасса *C. pelagica* выявлена на ст. 35, расположенной напротив мыса Таран в районе 60-й изобаты. Повышенные значения биомассы этого вида также отмечали над Гданьской впадиной и ее северо-восточной оконечностью (Литовский разрез, ст. 5 и ст. 45),

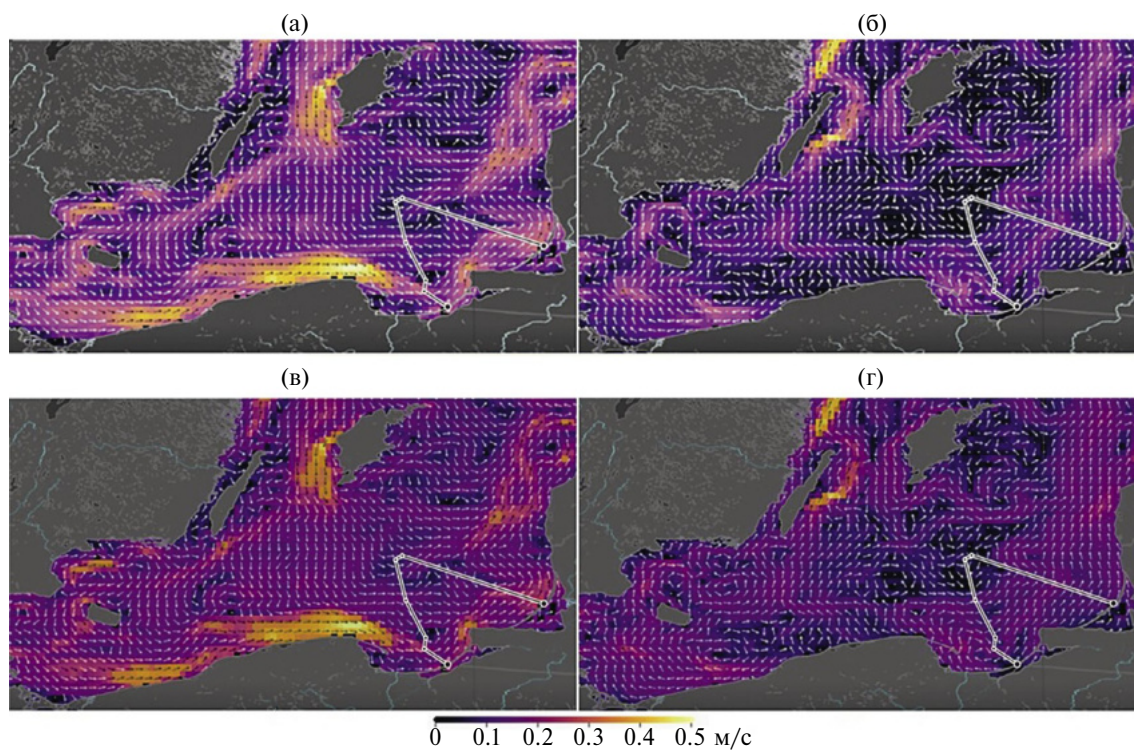


Рис. 2. Пространственная структура полей течений в поверхностном слое воды в центральной и юго-восточной части Балтийского моря: а — 23.10.2021, б — 30.10.2021, в — 12.10.2020, г — 15.10.2020 (0.0–0.5 м/с — диапазон изменения скорости течений).

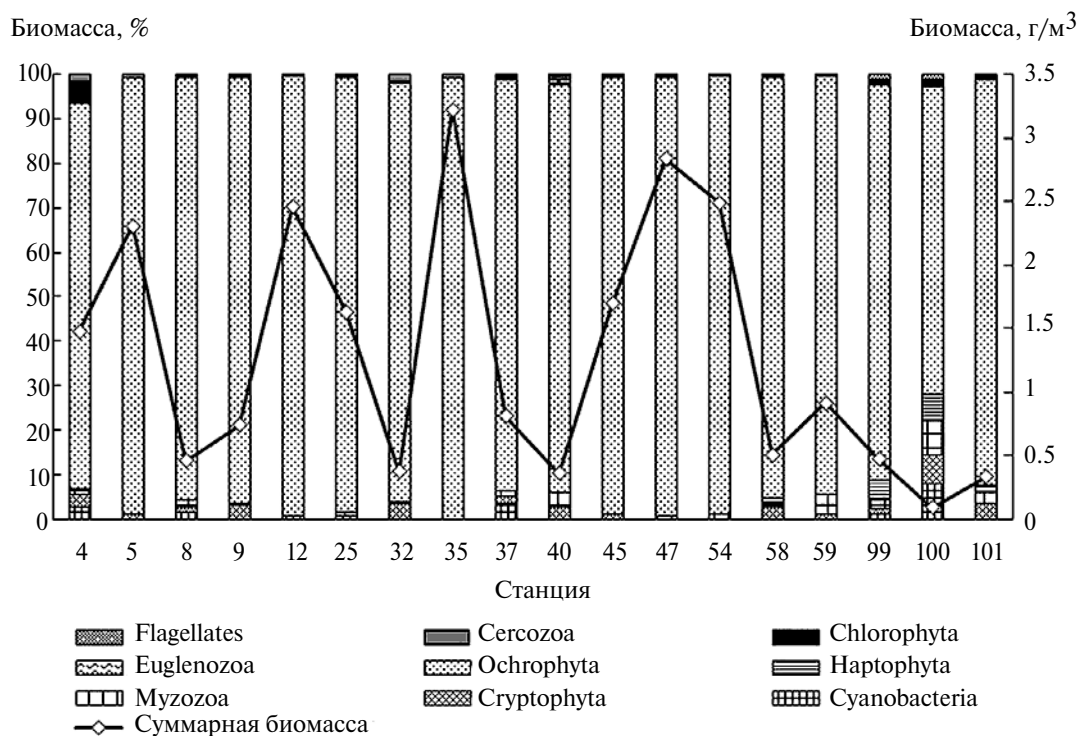


Рис. 3. Распределение относительной биомассы систематических групп фитопланктона (%) (левая ось ординат) и суммарной биомассы (г/м³) (правая ось ординат) в юго-восточной части Балтийского моря в октябре–ноябре 2021 г.

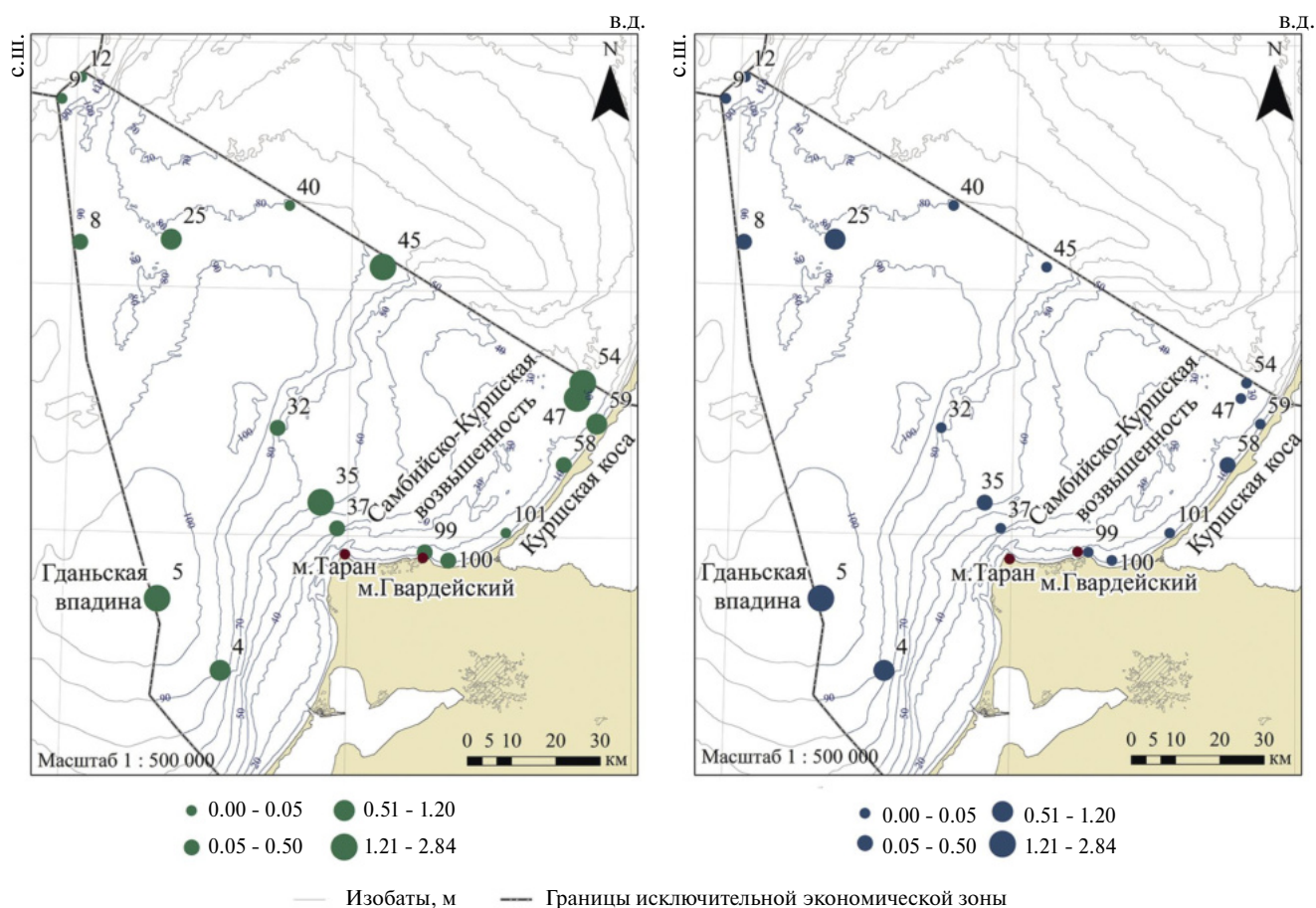


Рис. 4. Пространственное распределение биомассы (г/м^3) *Cerataulina pelagica* (а) и *Dactyliosolen fragilissimus* (б) в юго-восточной части Балтийского моря в октябре–ноябре 2021 г.

а также на ст. 47 и 54, расположенных в районе 30-й изобаты над Плато Рыбачий (Литовский разрез) (рис. 4а).

Наряду с доминировавшей в районе исследования *C. pelagica* зафиксировано и массовое развитие *Dactyliosolen fragilissimus*. Вид был субдоминантом, его биомасса изменялась от 0.002 до 0.13 г/м^3 , среднее значение составило $0.02 \pm 0.01 \text{ г/м}^3$. Пространственное распределение было неоднородным. Минимальную биомассу *D. fragilissimus* наблюдали в районе северо-восточной оконечности Гданьской впадины (ст. 40, глубина 80 м), максимальную — над наиболее глубокой частью Гданьской впадины (ст. 5, глубина 112 м) (рис. 4б). Совместно с доминировавшими по всей акватории нетипичными диатомеями в состав доминантного комплекса вошла крупноклеточная диатомовая микроводоросль *Coscinodiscus granii*, ее биомасса варьировала по всей исследуемой акватории от 0.06 до 2.6 г/м^3 (в среднем $0.43 \pm 0.13 \text{ г/м}^3$).

Кластерный анализ структуры фитопланктона показал, что на уровне сходства 40% выделялись

четыре группы станций. Поскольку на основании *R*-статистики ANOSIM теста достоверность выделения проб на группы была получена только для двух групп станций (II и III), то группы станций рассматривали не как отдельные сообщества, а как фитоценоотические группировки с различающейся структурой (далее ФЦГ 1–4). Группа станций I объединяла две точки, находящиеся на значительном удалении друг от друга: одна (ст. 8) расположена в районе Гданьско-Готландского порога (государственная граница с Польшей), другая (ст. 58) — в прибрежной зоне Куршской косы (рис. 5, 6).

Сходство фитопланктона в I группе составило 69%. Наибольший вклад в сходство вносила диатомея *Cerataulina pelagica* (89%), вклад *Dactyliosolen fragilissimus* был наименьшим — 8% (ст. 7). Вторая группа (II) объединяла станции, расположенные над центральной частью Гданьско-Готландского порога (ст. 25), в районе центральной части Гданьской впадины и ее восточного склона (ст. 4, 5), мыса Таран (ст. 35, 37), побережья Куршской косы (ст. 59) и государственной границы с Литвой

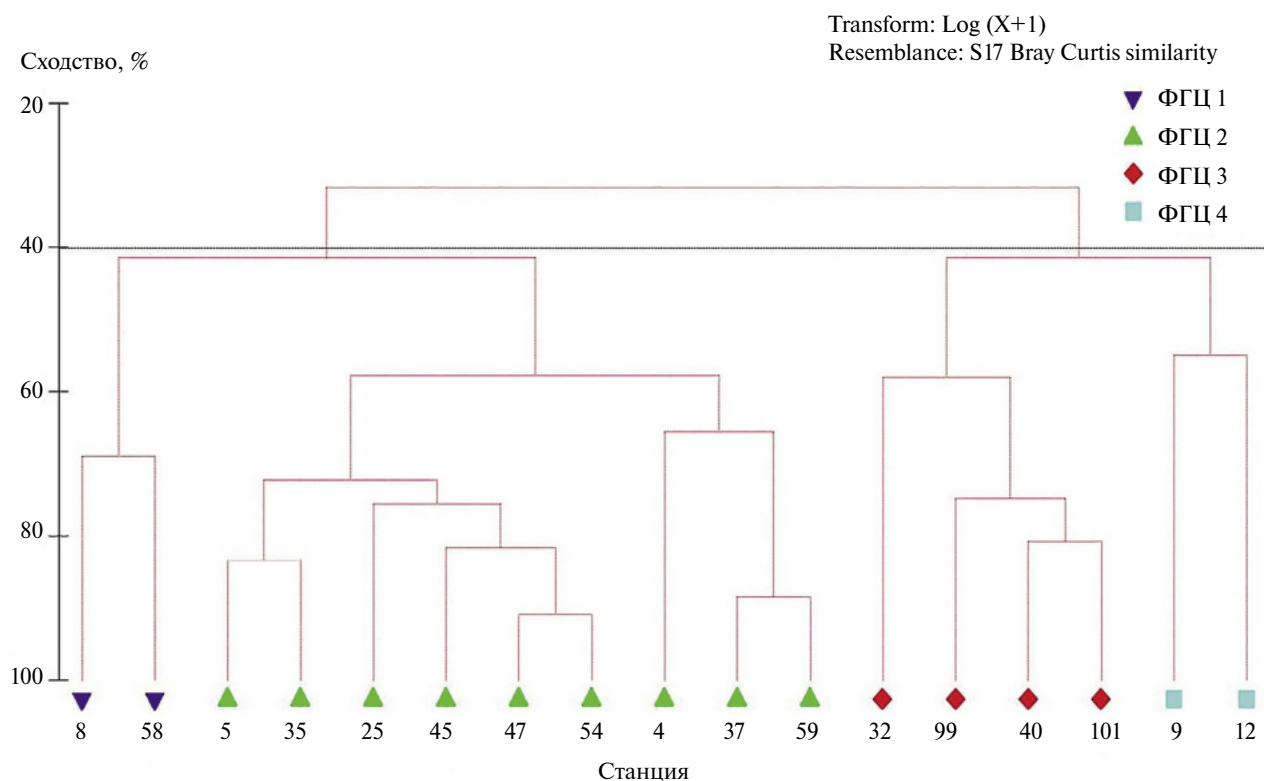


Рис. 5. Дендрограмма ценотического сходства (по биомассе) фитопланктона в юго-восточной части Балтийского моря в октябре–ноябре 2021 г.

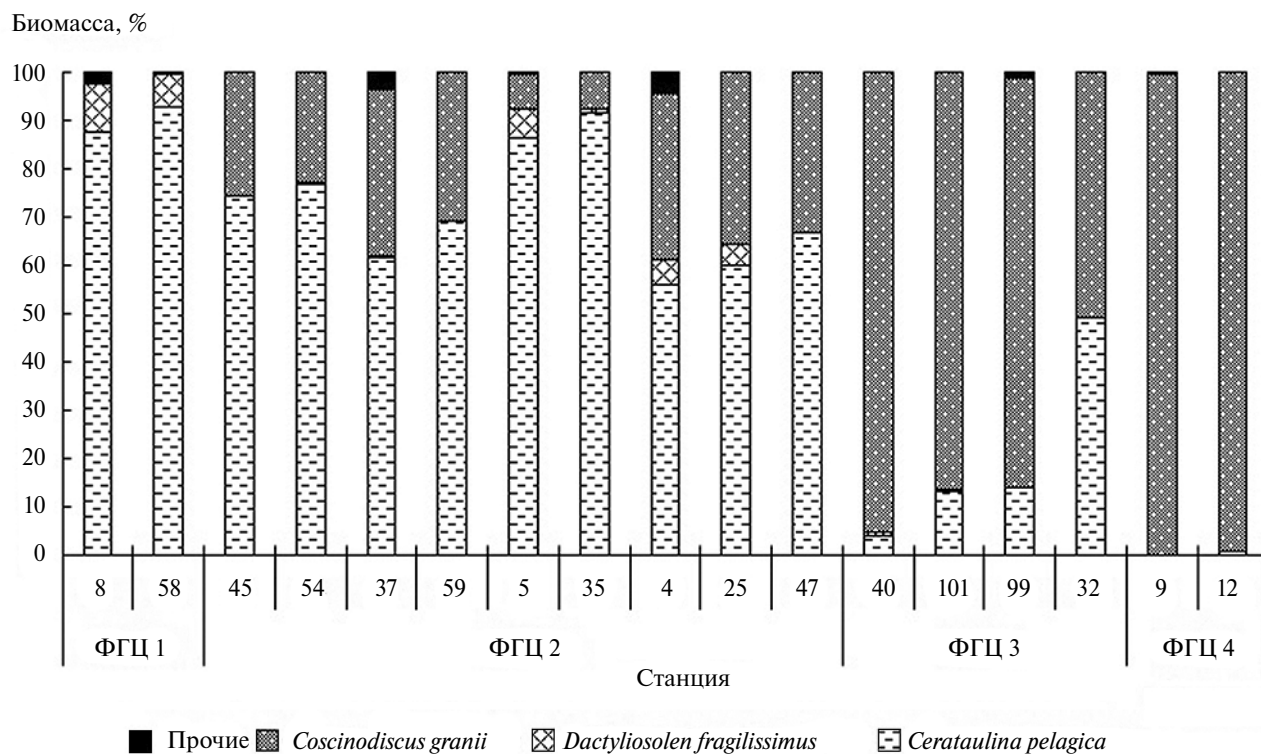


Рис. 6. Пространственное распределение группировок фитопланктона (ФГЦ 1–ФГЦ 4) в юго-восточной части Балтийского моря в октябре–ноябре 2021 г.

(ст. 45, 47, 54) (рис. 5, рис. 6). Сходство фитопланктона в этой группе составило 60%. Наибольший вклад в сходство вносили диатомеи *Cerataulina pelagica* (71%) и *Coscinodiscus granii* (25%) (рис. 7).

Третья группа (III) объединяла ст. 9 и 12, расположенные над глубоководным районом южного склона Готландской впадины (рис. 5, 6). Сходство фитопланктона в этой группе составило 66%. Наибольший вклад в сходство вносила диатомея *C. granii* (85%), в меньшей степени — *Cerataulina pelagica* (10%) (рис. 7).

Четвертая группа (IV) объединила прибрежную ст. 99, расположенную в районе мыса Гвардейский вблизи источника поступления загрязненных сточных вод с материка с прибрежной ст. 101, а также ст. 32, расположенную напротив м. Таран (глубина 80 м), и ст. 40 из северо-восточной оконечности Гданьской впадины (рис. 5; рис. 6). Сходство фитопланктона в этой группе — 60%, наибольший вклад в сходство вносили диатомеи *Cerataulina pelagica* (76%) и *Coscinodiscus granii* (25%) (рис. 7).

Различия между I и II группами составили 63%, основной вклад в различие между группами давали *Cerataulina pelagica* (35%) и *Coscinodiscus granii* (18%). Различия между I и III группой составили 80%, вклад в различие этих групп для *Cerataulina pelagica* — 32%, для *Coscinodiscus granii* — 30%. Различия между I и IV группой составили 98%. Вклад в различие этих групп для *Cerataulina pelagica* составил 20%, для *Coscinodiscus granii* — 67%. Различия между II и III группами составили 67%, вклад в их различие для *Cerataulina pelagica* составил 50%, для *Coscinodiscus granii* — 7%. Различия между II и IV группами составили 75%. Вклад их в различие для *Cerataulina pelagica* составил — 37%, для *Coscinodiscus granii* — 29%.

Фитопланктон прибрежной зоны юго-восточной части Балтийского моря в 2020 г. В середине октября 2020 г. *Cerataulina pelagica* и *Dactyliosolen fragilissimus* были обнаружены вдоль западного побережья Самбийского п-ова. Распределение суммарной биомассы фитопланктона в этой прибрежной части моря носило неоднородный характер, она варьировала от 0.5 до 4.65 г/м³, в среднем 2.4 ± 0.69 г/м³ (рис. 8). Повышенные значения отмечены в районе ст. 2–4.

Основной вклад в численность и биомассу фитопланктона вносили диатомовые, они доминировали вдоль всего побережья. Исключением была ст. 1, расположенная в районе Балтийского пролива, где доминантный комплекс представляли, в основном, цианобактерии. Основной вклад в биомассу на этой станции вносила мелкоклеточная колониальная микроводоросль *Woronichinia compacta* (Lemmermann) Komárek & Hindák 1988, с биомассой 0.88 г/м³. Далее, в направлении м. Таран, доминантный комплекс изменился, ос-

новная доля количественных показателей фитопланктона приходилась на диатомовые микроводоросли. Среди них доминировал *Dactyliosolen fragilissimus* с биомассой 0.07–4.5 г/м³ (в среднем 1.9 ± 0.7 г/м³). Максимальная биомасса была зафиксирована в районе ст. 3, снижаясь в направлении м. Таран. В этом районе *Cerataulina pelagica* выступала в роли субдоминанта с биомассой 0.03–0.1 г/м³ (в среднем 0.11 ± 0.05 г/м³) (рис. 9).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Установлено, что нетипичные для юго-восточной части Балтийского моря диатомеи *Dactyliosolen fragilissimus* и *Cerataulina pelagica* доминировали в прибрежной зоне в 2020 г., а также в открытой и прибрежной частях Российской акватории в 2021 г.

Dactyliosolen fragilissimus — диатомея, спорадически встречающаяся в прибрежных водах в течение года в северных европейских морях (Kraberg et al., 2010). Иногда этот вид вызывает цветение воды осенью или в начале зимы в некоторых районах Балтийского моря. Эти явления были

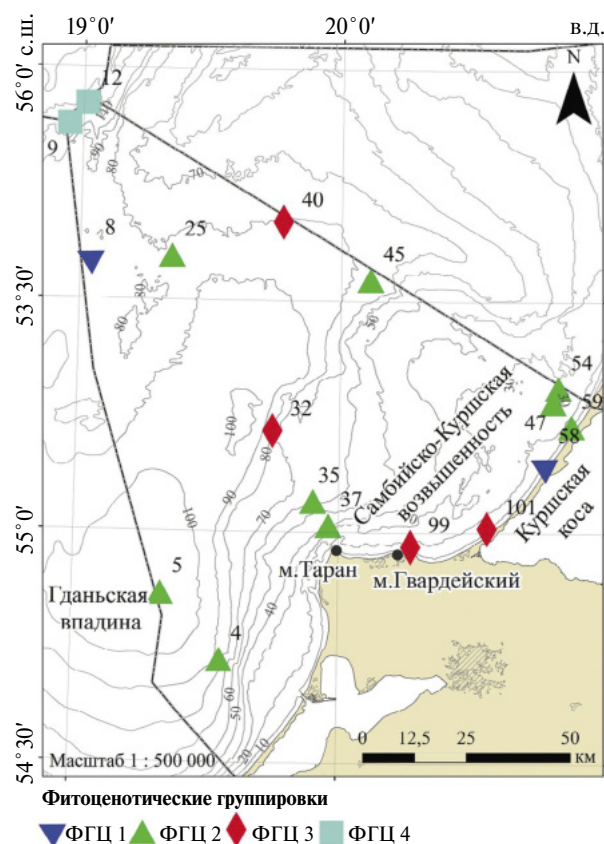


Рис. 7. Распределение доли доминирующих видов в биомассе в пределах выделенных группировок фитопланктона (ФГЦ) в юго-восточной части Балтийского моря в октябре–ноябре 2021 г.

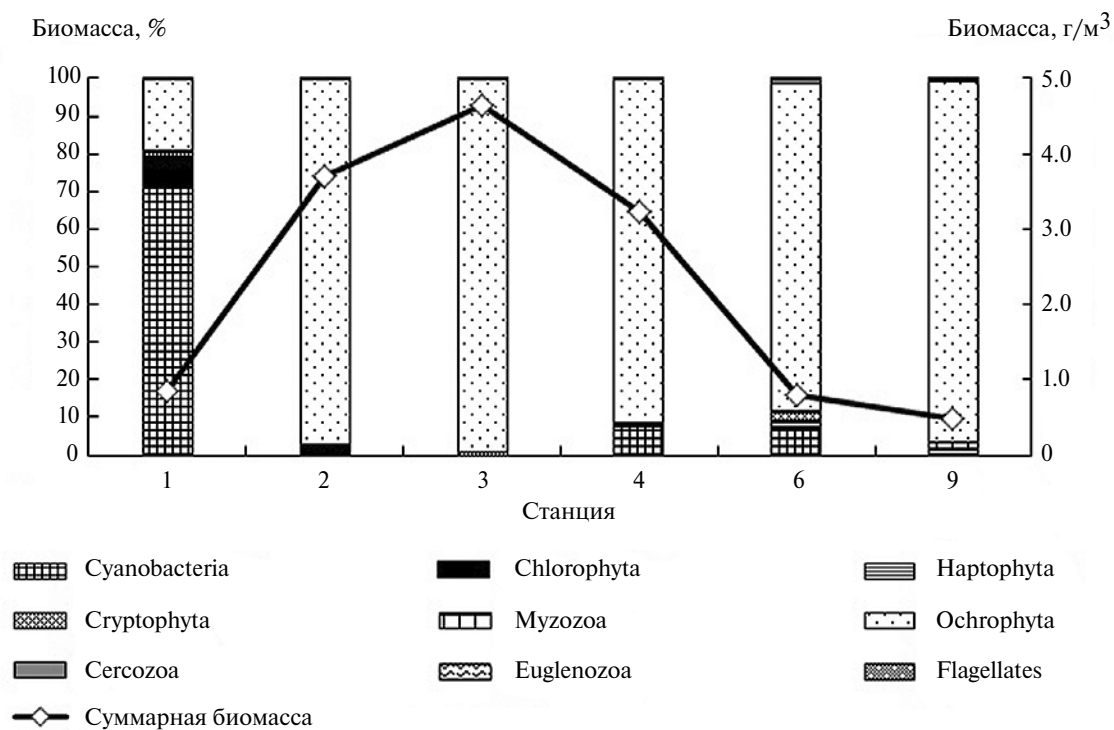


Рис. 8. Относительная биомасса систематических групп фитопланктона (левая ось ординат) и суммарная биомасса фитопланктона (г/м³) (правая ось ординат) на станциях вдоль западного побережья Самбийского п-ова юго-восточной части Балтийского моря в октябре 2020 г.

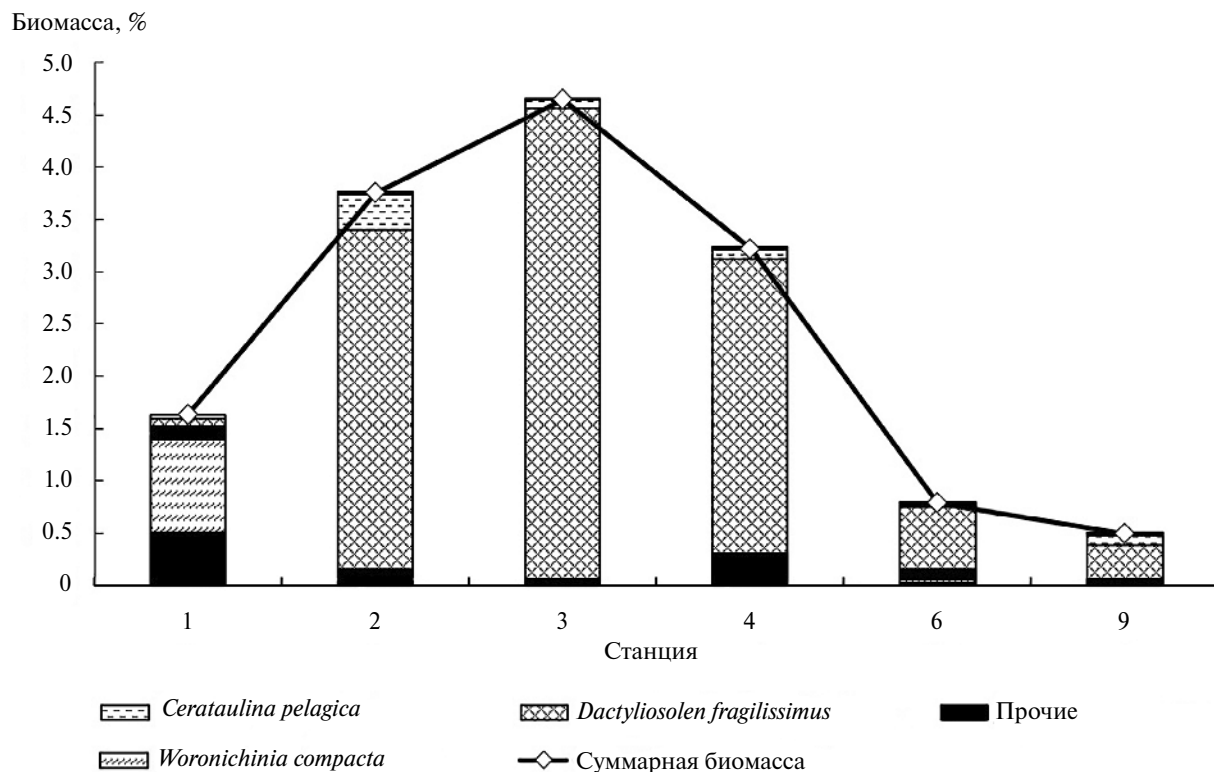


Рис. 9. Биомасса доминирующих таксонов и биомасса фитопланктона в прибрежной зоне западного побережья Самбийского п-ова юго-восточной части Балтийского моря в октябре 2020 г.

зафиксированы в районах Датских проливов (Большой Бельт и Малый Бельт, п-ов Эресунд), в Арконском бассейне и Мекленбургском заливе (Wasmund et al., 1999, 2000, 2001; Łotocka, 2006). В опресненной части Куршского залива Балтийского моря, *D. fragilissimus* никогда не отмечали (Dmitrieva, Semenova, 2011). Первое обнаружение вида в Гданьском заливе было зарегистрировано в 2001 г., при этом его численность изменялась от 6 до 45 млн кл./м³. (В. Witek, неопубл. данные, цит. по: (Łotocka, 2006)). После 2001 г. и до 2005 г. этот вид здесь не регистрировали. В 2005 г. осенью в Гданьском заливе *D. fragilissimus* формировал ярко выраженное осеннее цветение воды, заменив в этот период типичный для осеннего цветения вид *Coscinodiscus granii*. Показатели численности и биомассы *Dactyliosolen fragilissimus* варьировали от 764 млрд. кл./м³ до 1 млн кл./м³ и от 6.4 до 8.9 г/м³ соответственно (Żmijewska et al., 2000; Łotocka, 2006; Olenina, Kownacka, 2010; Система..., 2017). В литовских водах *D. fragilissimus* обнаружен И.А. Олениной в начале ноября 2005 г. Его численность составляла 500 млн кл./м³, а биомасса — 3.8 г/м³ (Łotocka, 2006; Olenina, Kownacka, 2010) (табл. 1).

Диатомея *D. fragilissimus* была впервые зарегистрирована октябре в 2009 г. в прибрежном мелководье на станциях вдоль побережья Куршской косы (неопубл. данные О.А. Дмитриева). Численность вида варьировала от 1 до 196 млн кл./м³, в среднем 57 ± 17.6 млн кл./м³, биомасса — от 0.004 до 4.77 г/м³, в среднем 0.82 ± 0.37 г/м³, доля вида в суммарной биомассе — от 1 до 70%. В 2020 г.

D. fragilissimus была обнаружена вдоль западного побережья Самбийского п-ова в середине октября 2020 г. Вид доминировал почти на всех исследованных станциях, максимальная биомасса 4.5 г/м³ была зарегистрирована на ст. 3. В составе сообществ совместно с *D. fragilissimus* субдоминировала *Cerataulina pelagica*, ее максимальная биомасса по побережью составила 0.1 г/м³.

Диатомея *C. pelagica* впервые была обнаружена И.А. Олениной в начале ноября 2005 г. в литовских водах совместно с *Dactyliosolen fragilissimus* (Łotocka, 2006; Olenina, Kownacka, 2010). После 2005 г. *Cerataulina pelagica* не находили в пробах этого района до 2009 г. (Olenina, Kownacka, 2010). В 2009 г. она была обнаружена снова с низкими показателями численности и биомассы (0.08–8 млн кл./м³, 0.001–0.02 г/м³ соответственно), представляя незначительную часть фитопланктонного сообщества (0.1% суммарной численности и 2% суммарной биомассы). В 2008 г. в Гданьском заливе численность *C. pelagica*, была лишь 4 тыс. кл./л, биомасса — 0.03 г/м³. Осенью 2009 г. вид уже доминировал в составе сообществ. Его максимальная биомасса в Гданьском заливе достигла 0.98 г/м³ (увеличилась в 39 раз по сравнению с 2008 г.), численность при этом составила 64.3 млн кл./м³ (Olenina, Kownacka, 2010). В 2021 г. *C. pelagica* доминировала и по всей Российской акватории ЮВБ. Ее биомасса была максимальна на ст. 35–2.85 г/м³. При этом *Dactyliosolen fragilissimus* субдоминировал в составе фитопланктонных сообществ, его максимальная биомасса составила 0.01 г/м³.

Таблица 1. Сведения о регистрации *Dactyliosolen fragilissimus* и *Cerataulina pelagica* в различных частях ЮВБ

Год	<i>D. fragilissimus</i>			<i>C. pelagica</i>	
	Польская ИЭЗ (Гданьский залив)	Российская ИЭЗ	Литовская ИЭЗ	Польская ИЭЗ (Гданьский залив)	Литовская ИЭЗ
2001	45 млн кл./м ³ (В. Witek, неопубл. данные, цит. по Łotocka, 2006)	—	—	—	—
2005	764 млн–1 млрд кл./м ³ , 6.4–8.9 г/м ³ (Łotocka, 2006)	—	500 млн кл./м ³ , биомасса 3.8 г/м ³ (Łotocka, 2006)	—	—
2007	15 млн кл./м ³ (Olenina, Kownacka, 2010)	—	~3 млн кл./м ³ (Olenina, Kownacka, 2010)	—	—
2008	<3 млн кл./м ³ (Olenina, Kownacka, 2010)	—	<1 млн кл./м ³ (Olenina, Kownacka, 2010)	~4 млн кл./м ³ , 0.025 г/м ³ (Olenina, Kownacka, 2010)	—
2009	<1 млн кл./м ³ (Olenina, Kownacka, 2010)	1–1961 млн кл./м ³ , 0.004–4.77 г/м ³ (по неопубл. данным (О.А. Дмитриева)	~3 млн кл./м ³ (Olenina, Kownacka, 2010)	64 млн кл./м ³ , 1 г/м ³ (Olenina, Kownacka, 2010)	0.08–8 млн кл./м ³ , 0.001–0.023 г/м ³ (Olenina, Kownacka, 2010)

Примечание. “—” — не регистрировали.

Пространственное распределение фитопланктона на акватории ЮВБ в середине осени 2021 г. носило неоднородный характер: на уровне сходства 40% выделялись четыре группы станций, отнесенные нами в ценоотические группировки, отличающиеся между собой уровнем внутреннего сходства. Анализ доли доминирующих видов в суммарной биомассе показал, что неоднородность распределения фитопланктона в группировках определялась уровнем вегетации трех основных видов диатомей осеннего комплекса: *Cerataulina pelagica*, *Coscinodiscus granii* и *Dactyliosolen fragilissimus*. Возможно, неравномерный характер распределения видов мог быть обусловлен гидрологической ситуацией в период проведения съемки, а также ослаблением трофических связей фито- и зоопланктона, которые могут возникать вследствие регулярных суточных изменений ветровых течений (Толмеева и др., 2023). На момент исследования была зафиксирована продолжительная вдольбереговая адвекция вод из Арконского и Борнхольмского бассейнов в Гданьский бассейн и далее в район проведения работ. Вероятно, *Cerataulina pelagica* и *Dactyliosolen fragilissimus* были привнесены туда путем пассивного вдольберегового переноса водных масс из района обитания. Показано, что оба вида могут достигать побережья Литвы путем поверхностного переноса вод из Арконского бассейна, будучи таким образом, индикаторами притока поверхностных вод Северного моря (Wasmund, 2019). Это утверждение подкрепляется и более ранними исследованиями (Wasmund et al., 1998; Wasmund, Uhlig, 2003; Łotocka, 2006; Nausch, 2006). По-видимому, в ЮВБ осенью 2021 г. сформировались благоприятные гидрохимические условия для развития *Cerataulina pelagica*, *Dactyliosolen fragilissimus* и других видов диатомей, вегетирующих в пределах исследуемой акватории. В ЮВБ первичная продукция, содержание хлорофилла и биомасса фитопланктона осенью (по данным 2009–2015 гг.) может быть больше, чем весной, из-за отсутствия биогенного лимитирования. Лимитирование в большей степени относится к азоту (3.62 ± 1.93 мкг-ат/дм³) и в меньшей степени — к фосфору (0.40 ± 0.21 мкг-ат/дм³) (Кудрявцева, Александров, 2019). Известно, что *D. fragilissimus* предпочитает развиваться в условиях дефицита фосфора или высокого (>100) отношения N:P (Abdalla et al., 1995; Carlsson, Graneli, 1999). Согласно классификации трофности (Yamada et al., 1980; Колпаков, Бегун, 2014), *D. fragilissimus* служит индикатором эвтрофирования. Его доминирование в фитопланктоне свидетельствует о высокой трофности вод и загрязнении их биогенными элементами природного и антропогенного характера (Колпаков, Бегун 2014). Также установлено, что *D. fragilissimus* и *Cerataulina pelagica* способны накапливать

питательные вещества и адаптироваться к жизни в среде, где их доступность варьирует. Вегетация обоих видов происходит совместно. Оба вида считаются эвригалинными (Hasle и Syvertsen, 1997). Для *Dactyliosolen fragilissimus* температурный диапазон жизнедеятельности варьирует от 2 до 29°C. Температура, при которой данный вид может развиваться массово, — $\geq 12^\circ\text{C}$ (Philips et al., 2010), согласно (Рябушко, 2003) — $14\text{--}20^\circ\text{C}$. В период развития диатомей в ЮВБ в 2020 г. температура воды варьировала от 10.0 до 11.0°C, данный диапазон температур был близок к нижней границе оптимума, необходимого для массового развития для *D. fragilissimus* (согласно (Philips et al., 2010)). Соленость в 2021 г. изменялась от 7.1 до 7.4 psu (в 2020 г. измерения не проводили). Известно, что оптимум развития *D. fragilissimus* достигается при солености 18–23.2 psu и ниже (Рябушко, 2003). Соленость в 2021 г. соответствовала оптимальным значениям для развития этого эвригалинного вида. Согласно (Рябушко, 2003), *Cerataulina pelagica* достигает высоких показателей численности и биомассы (9.1 млрд кл./м³ и 65.9 г/м³) при температуре 16–18°C. В 2020 г. температура воды (10.0–11.0°C) была ниже температурного оптимума развития для этого вида. При этом биомасса за счет развития в большей степени *Dactyliosolen fragilissimus* в среднем по побережью была 0.69 г/м³, максимальное значение биомассы *Cerataulina pelagica* достигало 0.1 г/м³. В 2021 г. температура варьировала от 9.8 до 11.8°C, максимальная биомасса *C. pelagica* была 2.84 г/м³. Таким образом, в оба года температура воды была примерно одинаковой, однако в 2020 г. массовое развитие получил *Dactyliosolen fragilissimus*, а в 2021 г. преимущество в развитии получила *Cerataulina pelagica*, т.е. температура, по-видимому, не была определяющим фактором массового развития этих микроводорослей. Распределение биомассы фитопланктона в 2020 г. в прибрежной зоне западного побережья Самбийского п-ова, где перемешивание водной толщи более выражено, чем в глубоководных районах моря, также носило неоднородный характер. Анализ доли доминирующих видов показал, что неоднородность распределения биомассы фитопланктона была обусловлена уровнем развития основного доминанта — диатомеи *Dactyliosolen fragilissimus*, при этом *Cerataulina pelagica* занимала субдоминирующее положение. Известно, что обе диатомеи способны обитать в районах с интенсивной турбулентностью в эвфотической зоне (Laugier et al., 1999). Было отмечено (Ault et al., 2000), что *C. pelagica* может активно развиваться в условиях истощения среды питательными веществами после предыдущего цветения воды диатомовыми водорослями, выживая в таких условиях при помощи запасенных питательных веществ. В экспериментах с культурами было показано, что пе-

ренос клеток *C. pelagica*, имеющих максимальный внутриклеточный пул биогенных веществ, в морскую воду, обедненную по биогенным веществам, вызвал быстрое повышение отношения углерода к хлорофиллу (C/Хл *a*), а также снижение эффективности работы фотосистемы II, относительной скорости электронного транспорта и удельной скорости роста (Стельмах, 2023). Таким образом, экологические особенности нетипичных для ЮВБ видов *Dactyliosolen fragilissimus* и *Cerataulina pelagica* позволили в 2020–2021 гг. сформировать второй пик осеннего цветения воды диатомовыми микроводорослями, замещая на большинстве исследуемых станций типичного для данной акватории *Coscinodiscus granii*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2020–2021 гг. в российской части ЮВБ исследовано пространственное распределение биомассы фитопланктона и диатомей *Dactyliosolen fragilissimus* и *Cerataulina pelagica*. Показано, что в 2020 г. в прибрежной зоне ЮВБ доминировал *Dactyliosolen fragilissimus*, в 2021 г. — *Cerataulina pelagica*. По сходству структуры фитопланктона в 2021 г. выделено четыре фитоценоотические группировки, приуроченные к разным районам ЮВБ. Сходство фитопланктона в группировках определялось различным вкладом в биомассу основного доминанта осеннего цветения воды в Балтийском море *Coscinodiscus granii* и нетипичных для ЮВБ диатомей *Dactyliosolen fragilissimus* и *Cerataulina pelagica*. Согласно оценке гидрологической ситуации, в 2021 г. проникновение нехарактерных видов в акваторию ЮВБ, по-видимому, происходило посредством медленного вдольберегового переноса поверхностных вод из Арконского и Борнхольмского бассейнов. Особенности гидрологической и гидрохимической ситуации способствовали значительной пространственной неоднородности распределения биомассы и формированию спорадических вспышек массового развития в ЮВБ диатомей, устойчивых к вариативности факторов среды.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны М.А. Герб и А.А. Володину (Институт океанологии РАН) за помощь при отборе проб фитопланктона.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при поддержке государственного задания ИОРАН (тема № FMWE-2024-0025).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Евтушенко Н.В., Шеберстов С.В. 2016. Использование данных спутникового сканера MODIS-Aqua для исследования циклов цветения фитопланктона в Балтийском море // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 13. № 3. С. 114.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-3-114-124>
- Колпаков Н.В., Бегун А.А. 2014. Состав и распределение микроводорослей в эстуарии река Суходол (Уссурийский залив, залив Петра Великого) в осенний период // Условия обитания промысловых объектов. Известия ТИНРО. Т. 176. С. 115.
- Кудрявцева Е.А., Александров С.В. 2019. Гидролого-гидрохимические основы первичной продуктивности и районирование российского сектора Гданьского бассейна Балтийского моря // Океанология. Т. 59. № 1. С. 56.
<https://doi.org/10.31857/S0030-157459156-71>
- Методические основы комплексного экологического мониторинга океана. 1988. М.: Гидрометеиздат. С. 185.
- Рябушко Л.И. 2003. Потенциально опасные микроводоросли Азово-Черноморского бассейна // Институт биологии Южных морей им. О.А. Ковалевского НАН Украины. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. С. 181.
- Радченко И.Г., Капков В.И., Федоров В.Д. 2010. Практическое руководство по сбору и анализу проб морского фитопланктона: Учебно-методическое пособие для студентов биологических специальностей университетов. М.: Мордвинцев. С. 60.
- Стельмах Л.В. 2023. Влияние абиотических факторов на структурные и функциональные характеристики *Cerataulina pelagica* (Cleve) Hendey // Биология внутр. вод. № 2. С. 174.
<https://doi.org/10.31857/S0320965223020237>
- Толмеев А.П., Дубовская О.П., Кравчук Е.С. и др. 2023. Горизонтальные неоднородности функционирования фито- и зоопланктона в озере с ветровыми течениями // Биология внутр. вод. № 2. С. 196.
<https://doi.org/10.31857/S0320965223020249>
- Система Балтийского моря. 2017. М.: Науч. мир. С. 251.
- Abdalla R.R., Zaghloul F.A., Hussein N.R. 1995. A statistical modelling of phytoplankton eutrophication in the Eastern Harbour // Alexandria. Egypt. Bulletin of the National Institute of Oceanography and Fisheries (Egypt). V. 21(1). P. 125.
- Ault T., Velzeboer R., Zammit R. 2000. Influence of nutrient availability on phytoplankton growth and community structure in the Port Adelaide River, Australia: bioassay assessment of potential nutrient limitation // Hydrobiologia. V. 429: P. 89.
<https://doi.org/10.1023/A:1004024630413>
- Carlsson P., Graneli E. 1999. Effects of N:P:Si ratios and zooplankton grazing on phytoplankton communities in the northern Adriatic Sea. I. Phytoplankton species composition // Aquatic Microbial Ecology. V. 18(1). P. 55.

- Clarke K.R., Gorley R.N. 2006. PRIMER v 6: User Manual. Tutorial // Plymouth: Marine Laboratory. P. 190.
- Dmitrieva O.A., Semenova A.S. 2011. Seasonal Dynamics of phyto- and zooplankton and their interactions in the hypereutrophic reservoir // *Inland Water Biol.* V. 4. № 3. P. 308.
<https://doi.org/10.1134/S1995082911030059>
- Hasle G.R., Syvertsen E.E. 1996. Marine diatoms // *Identifying Marine Phytoplankton*. San Diego: Acad. Press. P. 5.
- Kahru M., Elmgren R. 2014. Satellite detection of multi-decadal time series of cyanobacteria accumulations in the Baltic Sea // *Biogeosciences Discussions*. V. 11. P. 3319.
<https://doi.org/10.5194/bgd-11-3319-2014>
- Kraberger A., Baumann M., Durselen C.D. 2010. Coastal Phytoplankton: Photo Guide for Northern European Seas // Verlag Dr. Friedrich Pfeil, Munchen. Germany. P. 204.
- Lauria M.L., Purdie D.A., Sharples J. 1999. Contrasting phytoplankton distributions controlled by tidal turbulence in an estuary // *Journal of Marine Systems*. V. 1. P. 189.
[https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(99\)00013-5](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(99)00013-5)
- Łotocka M. 2006. The first observed bloom of the diatom *Dactyliosolen fragilissimus* (Bergon) Hasle 1996 in the Gulf of Gdańsk // *Oceanologia*. V. 48(3) P. 447.
- Nausch G., Feistel R., Lass H.U. et al. 2006. Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2005 // *Meereswiss. Ber./Mar. Sci.* V. 66 P. 82.
<https://doi.org/10.12754/msr-2013-0091>
- NEMO ocean engine. Scientific notes of climate modelling center. 2019. Vol. 27. ISSN 1288-1619, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL).
<https://doi.org/10.5281/zenodo.1464816>
- Olenina I., Kownacka J. 2010. An unusual phytoplankton event five years later: the fate of the atypical range expansion of marine species into the south-eastern Baltic // *HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheet*. P. 15.
- Philips E.J., Badylak S., Christman M.C., Las M.A. 2010. Climatic Trends and Temporal Patterns of Phytoplankton Composition, Abundance, and Succession in the Indian River Lagoon, Florida, USA // *Estuaries and Coasts*. V. 33(2). P. 498. <https://doi.org/10.1007/s12237-009-9166-8>
- Wasmund N., Nausch G., Matthaus W. 1998. Phytoplankton spring blooms in the southern Baltic Sea — spatio-temporal development and long-term trends // *J. Plankton Res.* V. 20. P. 1099.
<https://doi.org/10.1093/plankt/20.6.1099>
- Wasmund N., Alheit J., Pollehne F. et al. 1999. The biological state of the Baltic Sea in 1998 on the basis of phytoplankton, zooplankton and zoobenthos-investigations // *Meereswiss. Ber./Mar. Sci. Rep.* V. 37. P. 75.
- Wasmund N., Pollehne F., Postel L. et al. 2001. Biological state assessment of the Baltic Sea in 2000 // *Meereswiss. Ber./Mar. Sci. Rep.* V. 46. P. 74.
- Wasmund N., Andrushaitis A., Łysiak-Pastuszek E. et al. 2001. Trophic status of the south-eastern Baltic Sea: a comparison of coastal and open areas // *Estuar. Coast. Shelf Sci.* № 53. P. 849.
<https://doi.org/10.1006/ecss.2001.082>
- Wasmund N., Uhlig S. 2003. Phytoplankton trends in the Baltic Sea, ICES J. Mar. Sci. // *J. Cons. Int. Explor. Mer.* V. 60 (2). P. 177.
<https://doi.org/10.1016/S1054-3139%2802%2900280>
- Wasmund N., Dutz J., Kremp A., Zettler M.L. 2018. Biological assessment of the Baltic Sea // *Meereswissenschaftliche Berichte. Marine Science Reports*. V. 112. № 99. P. 30.
<https://doi.org/10.12754/msr-2019-0112>
- Yamada M., Tsuruta A., Yoshida Y. 1980. List of phytoplankton as eutrophic level indicator // *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.* V. 46. № 12. P. 1435.
- Żmijewska M., Niemkiewicz E., Bielecka L. 2000. Abundance and species composition of plankton in the Gulf of Gdańsk near the planned underwater outfall of the Gdańsk-Wschód (Gdańsk—East) sewage treatment plant // *Oceanologia*. V. 42(3). P. 335.

Электронный ресурс:

Служба мониторинга морской среды CMEMS. [Электронный ресурс]. URL: <https://marine.copernicus.eu/> [дата обращения 07.02.2023]

**Spatial Distribution of the Diatoms *Dactyliosolen fragilissimus*
and *Cerataulina pelagica* in the Autumn Phytoplankton
of the South-Eastern Baltic in 2020–2021**

A. S. Melnik^{1, *}, O. A. Dmitrieva^{1,2, **}, E. E. Eshova¹, A. Y. Sharton¹, A. A. Kondrashov¹

¹*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography “VNIRO”*

Atlantic branch of VNIRO (“AtlantNIRO”), Kaliningrad, Russia

**e-mail: AnastassizaHabar@mail.ru*

***e-mail: phytob@yandex.ru*

The mass development of diatom *Dactyliosolen fragilissimus* and *Cerataulina pelagica*, which are atypical of the South-East Baltic Sea water area, were registered along the Sambia peninsula coastline in the mid of October 2020. Both species were found in the coastal zone of the western and northern coast of the Sambia peninsula to a depth of 32 m, from the Baltic Strait to port Pionerskiy. In early November 2021 a mass vegetation of *C. pelagica* was recorded –both in the shallow coastal zone of the northern coast of the Sambia peninsula and in the deep water zone of the South-Eastern Baltic Sea. The biomass of this species reached 2.8 g/m³. Both diatom species were abundant within the entire Russian Exclusive Economic Zone. The prevailing hydrological situation during the study period probably facilitated penetration of the species into the study area by surface transport from the Arkona Basin.

Keywords: Baltic Sea, phytoplankton, bloom of diatom, *Dactyliosolen fragilissimus*, *Cerataulina pelagica*