

УДК 574.5

СПЕЦИФИКА СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ БИОМАСС ПЛАНКТОНА В СТРУКТУРЕ МАРГИНАЛЬНОГО ФИЛЬТРА УСТЬЯ РЕКИ СЕВЕРНАЯ ДВИНА

¹Мискевич И.В., ²Новикова Ю.В., ³Трошков В.А., ¹Мосеев Д.С.

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, e-mail: szoiran@mail.ru;

²Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики

им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН, Архангельск, e-mail: juli-nv@mail.ru;

³Научно-производственная фирма «Субарктика», Архангельск, e-mail: subarct@gmail.com

Рассмотрена сезонная изменчивость биомасс фитопланктона и зоопланктона на устьевом взморье реки Северная Двина в юго-восточной части Двинского залива Белого моря. Учитывались данные гидробиологических наблюдений на 5 станциях весной, летом и осенью в 2020 и 2022 годах. Выявлено, что в зоне коагуляционно-сорбционной ступени маргинального фильтра устья реки Северная Двина при солености 5-20‰ в вегетационный период наблюдаются минимумы биомассы фитопланктона и зоопланктона. Локальные максимумы биомасс планктона формируются в дельте реки при солености менее 5‰ и на прилегающей к взморью глубоководной акватории Двинского залива при солености более 20‰. Предположено, что биологическая трансформация растворенных биогенных веществ получает наибольшую интенсивность в дельте реки на гравитационной ступени, а трансформация нерастворенной органики, потребляемой гидробионтами-фильтрами – на биологической ступени маргинального фильтра. В сезонной изменчивости планктона в зоне коагуляционно-сорбционной ступени наблюдается аномальное совпадение максимального накопления биомасс фитопланктона и зоопланктона. Их медианные концентрации в этот сезон года составляют 0,88-2,31 и 7,7-42,0 мкг/м³. Массовое развитие микроводорослей в указанной зоне весной ограничивается гидрологическими условиями, в первую очередь высокой мутностью устьевых вод. В гравитационной зоне в дельте реки и в биологической зоне за пределами устьевого взморья реки для фитопланктона соблюдается стандартная ситуация с наличием весеннего максимума и осеннего минимума. Сезонная изменчивость биомассы зоопланктона во всех зонах маргинального фильтра не имеет каких-либо аномалий.

Ключевые слова: устье, Северная Двина, фитопланктон, зоопланктон, биомасса, сезоны, соленость, маргинальный фильтр

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Современные и древние донные осадки и взвесь Мирового океана – геологическая летопись изменений среды и климата: рассеянное осадочное вещество и донные осадки морей России, Атлантического, Тихого и Северного Ледовитого океанов – литологические, геохимические и микропалеонтологические исследования; изучение загрязнений, палеообстановок и процессов в маргинальных фильтрах рек» № FMWE-2021-0006.

THE SPECIFICITY OF SEASONAL VARIABILITY OF PLANKTON BIOMASS IN THE STRUCTURE OF THE MARGINAL FILTER OF THE SEVERNAYA DVINA RIVER MOUTH

¹Miskevich I.V., ²Novikova Yu.V., ³Troshkov V.A., ¹Moseev D.S.

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: szoiran@mail.ru;

²Federal Research Center for Comprehensive Study of the Arctic named after Academician N.P. Laverov Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, e-mail: juli-nv@mail.ru;

³Research and production firm «Subarctica», Arkhangelsk, e-mail: subarct@gmail.com

The seasonal variability of phytoplankton and zooplankton biomasses on the estuarine coast of the Northern Dvina River in the southeastern part of the Dvina Bay of the White Sea is considered. The data of hydrobiological observations at 5 stations in spring, summer and autumn in 2020 and 2022 were taken into account. It was revealed that in the zone of the coagulation-sorption stage of the marginal filter of the mouth of the Northern Dvina River at a salinity of 5-20 ‰, minima of phytoplankton and zooplankton biomass are observed during the growing season. Local maxima of plankton biomass are formed in the river delta at a salinity of less than 5 ‰, and in the deep water area of the Dvina Bay adjacent to the seashore at a salinity of more than 20 ‰. It is assumed that the biological transformation of dissolved biogenic substances is most intense in the river delta at the gravitational stage, and the transformation of undissolved organic matter consumed by filtrate hydrobionts is at the biological stage of the marginal filter. In the seasonal variability of plankton in the zone of the coagulation-sorption stage, an anomalous coincidence of the maximum accumulation of phytoplankton and zooplankton biomasses is observed. Their median concentrations in this season of the year are 0,88-2,31 µg/m³ and 7,7-42,0 µg/m³. The mass development of microalgae in this zone in the spring is limited by hydrological conditions, primarily by the high turbidity of the estuarine waters. In the gravitational zone in the river delta and in the biological zone outside the estuarine seashore of the river, phytoplankton observes the standard situation with the presence of a spring maximum and an autumn minimum. The seasonal variability of zooplankton biomass in all zones of the marginal filter does not show any anomalies.

Keywords: mouth, Northern Dvina, phytoplankton, zooplankton, biomass, seasons, salinity, marginal filter

В условиях наблюдаемого потепления климата на севере Европы должны происходить значительные изменения в процессах обмена веществом между сушей и морем. Такой обмен можно рассматривать в рамках реализации модели маргинального фильтра в устьях рек, разработанной академиком А.П. Лисицыным. Применительно к устьевой области р. Северной Двины указанная модель будет иметь гравитационную ступень в диапазоне солености менее 5‰, коагуляционно-сорбционную ступень при солености 5–20‰ и биологическую ступень при солености более 20‰ [1]. На первой ступени обычно наблюдается максимальная мутность зоны смешения речных и морских вод, на второй ступени наибольшую активность получают гидрохимические процессы, и для третьей зоны характерны наибольшие биомассы планктона, зообентоса и ихтиофауны.

Целью выполненных исследований было определение характера сезонной изменчивости биомасс микроводорослей и зоопланктона на устьевом взморье р. Северной Двины в разных зонах маргинального фильтра в современных условиях.

Материалы и методы исследования

Отбор проб воды производился весной (июнь), летом (август) и осенью (октябрь) в 2020 и 2022 годах на 5 станциях, расположение которых указано на рис. 1. Наблюдениями охватывался восточный сектор устьевого взморья р. Северной Двины в юго-восточной части Двинского залива Белого моря. Здесь располагается фронтальная зона смешения морских и речных вод, а глубины на станциях колеблются в диапазоне 8–12 метров.

Гидробиологические исследования выполнялись в соответствии с методическим пособием [2]. Пробы воды с поверхностного и придонного горизонтов для определения параметров фитопланктона отбирались батометром *Hydro-Bios* объемом 5 литров. Далее из них формировалась единая интегральная проба воды объемом 1 литр. В лабораторных условиях с помощью вакуумной установки фитопланктон осаждали на мембранные фильтры «Владисарт» (диаметр пор 0,65 мкм), покрытые $MgCO_3$ и диаметром 47 мм. Экстрагирование осадка, спектрофотометрирование экстракта, расчет концентрации хлорофилла «а» проводили согласно ГОСТ 17.1.4.02-90. Общая биомасса фитопланктона вычислялась по найденной концентрации хлорофилла «а».

Отбор проб зоопланктона производился сетью Джели диаметром 36 см, при этом об-

лавливался горизонт *дно* – 0 м. Затем пробы фиксировали 40% раствором формальдегида. Обработка велась в лабораторных условиях счетным методом в камере Богорова. Биомасса определялась по расчетным весам организмов и путем взвешивания гидробионтов на весах Kern 770.

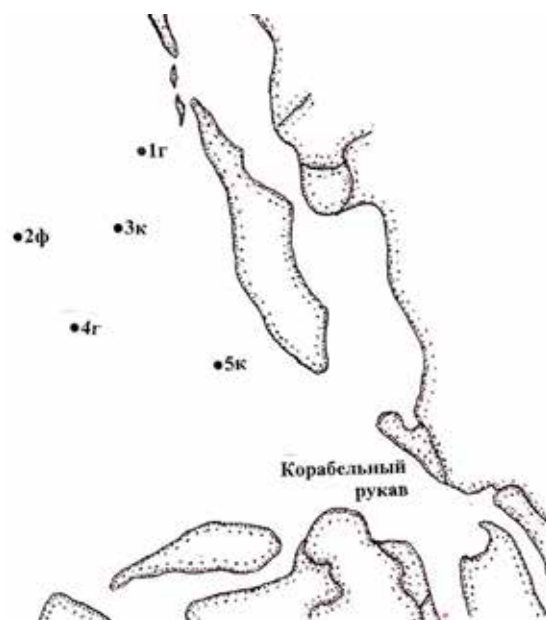


Рис. 1. Карта-схема расположения станций гидробиологических наблюдений в юго-восточной части Двинского залива Белого моря

В состав сопутствующих наблюдений входило определение температуры и солености воды на поверхностном и придонном горизонтах. Для этой цели использовался многопараметрический анализатор жидкости *Multi 3420* фирмы *WTW*.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты статистической обработки данных по биомассе планктона в каждый сезон на 5 мониторинговых станциях представлен в таблице. В ней вместо среднего значения использована медиана, как наиболее помехоустойчивая и наиболее показательная оценка центра распределения данных при использовании коротких выборок наблюдений [3]. Из таблицы видно, что в различные годы биомассы планктона на устьевом взморье р. Северной Двины могут существенно меняться. Можно предварительно предположить, что наименьшие междугодовые отклонения наблюдаются осенью в конце вегетационного периода, а наибольшие характерны для летнего периода.

Статистическая характеристика сезонной изменчивости биомассы планктона
на устьевом взморье р. Северной Двины в юго-восточной части
Двинского залива Белого моря в 2020 и 2022 годах.

Сезон	Фитопланктон (мкг/м ³)		Зоопланктон (мг/м ³)	
	C _м	C _{мин.} /C _{макс.}	C _м	C _{мин.} /C _{макс.}
2020 год				
Весна	1,13	0,79/1,81	1,1	0/29,2
Лето	2,31	1,06/3,21	7,7	3,0/25,6
Осень	0,44	0,25/0,68	1,1	0/29,2
2022 год				
Весна	0,55	0,31/1,89	11,5	4,2/16,0
Лето	0,88	0,52/1,37	42,0	32,0/66,0
Осень	0,45	0,37/1,10	3,6	1,4/5,9

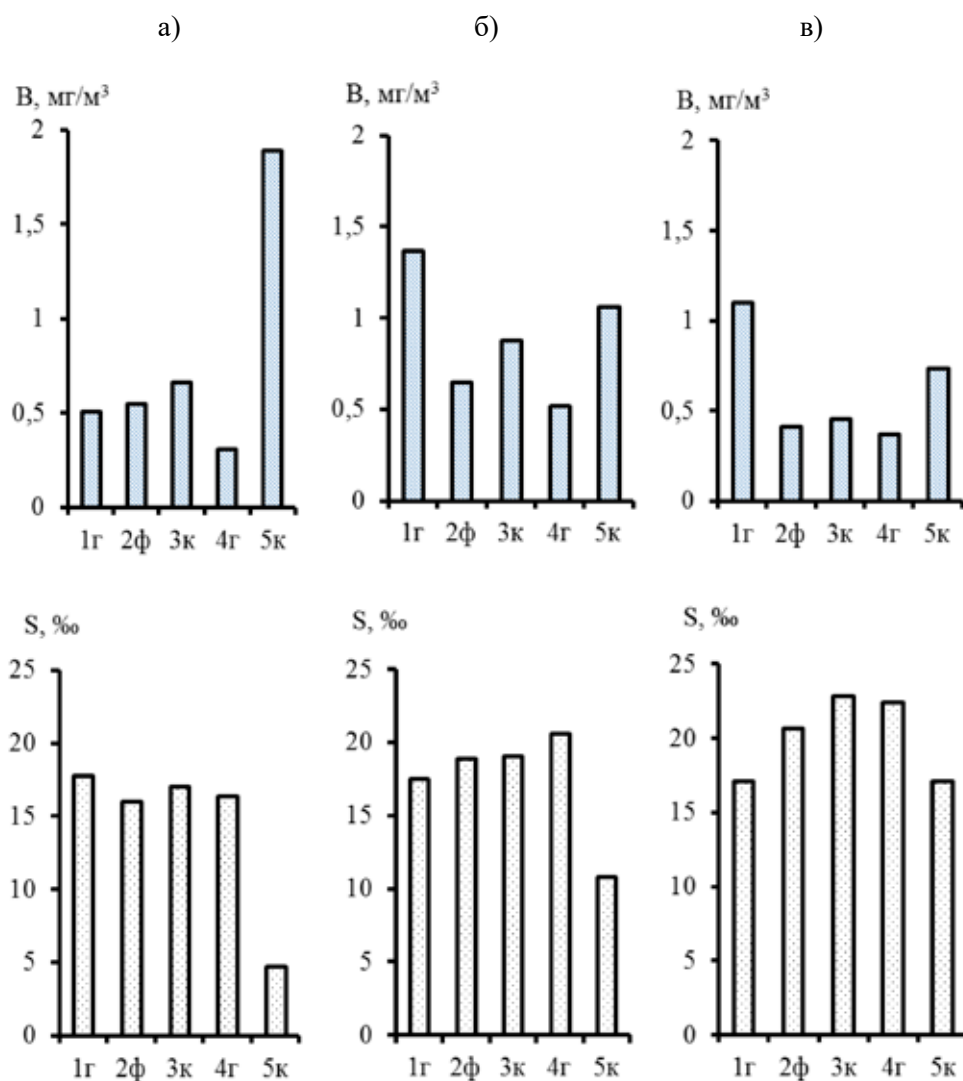


Рис. 2. Изменчивость биомассы планктона (B) и солёности (S) устьевых вод на различных станциях на устьевом взморье р. Северной Двины в июне (а), августе (б) и октябре (в) 2022 года

При этом для изменчивости биомассы микроводорослей отмечается нарушение сезонной закономерности, типичной для речных (озерных) и чисто морских вод, когда её максимум фиксируется в весенний период. На устьевом взморье р. Северной Двины такой максимум для биомассы фитопланктона, как и для зоопланктона, наблюдался летом.

Представленные в таблице биомассы планктона в основном наблюдались в водах с диапазоном солёности 5-20‰, т.е. в зоне коагуляционно-сорбционной ступени маргинального фильтра. Исключение составили воды на станции **5к** весной (солёность 4,7‰) и на станциях **3к** и **4г** (солёность 22,4-22,8‰) осенью 2022 года. На рис. 2 видно, что на станции **5к**, где солёность соответствовала гравитационной ступени, весной наблюдалась максимальная биомасса микроводорослей. При этом лишь для данной станции соблюдалась классическая изменчивость биомассы фитопланктона с наличием максимума весной и минимума осенью. Диапазон солёности, соответствующий биологической ступени (более 20‰), в районе мониторинговых исследований был охвачен лишь осенью. Но это был конец вегетационного периода, когда биомасса фитопланктона зависит от специфики функционирования пищевой цепочки «фитопланктон – зоопланктон – рыба» в весенний и летний сезоны и не имеет какой-либо значимой корреляции с распределением солёности.

В работе [4] на основании исследований связи биомассы зоопланктона с распределением солёности на устьевом взморье р. Северной Двины было показано, что её минимум соответствует коагуляционно-сорбционной ступени. Возрастание биомассы зоопланктона наблюдалось на гравитационной ступени и биологической ступени. При этом указывалось, что её максимум наиболее характерен для биологической ступени, где, в частности, она может достигать уровня 1000-2000 мг/м³ и даже более.

Анализ данных по распределению фитопланктона в различные сезоны 2020 и 2022 годов позволяет предположить, что минимум его биомассы на устьевом взморье р. Северной Двины, как и для зоопланктона, наблюдается на коагуляционно-сорбционной ступени маргинального фильтра. Это обусловлено присутствием в рассматриваемой зоне неблагоприятных условий для его развития, которые формируются при наличии сильных приливных течений и короткопериодной изменчивости термохалинных характеристик во фронтальной зоне сме-

шения морских и речных вод. В условиях мелководья устьевого взморья реки оседающие здесь взвеси, которые выносятся весной с речным стоком, четыре раза в сутки на пике скоростей течений (0,3-0,5 м/с) в фазы отлива и прилива вновь поступают в водную толщу, повышая мутность водной среды. Она, в свою очередь, снижает приток света в устьевые воды, уменьшая его доступ микроводорослям. Кроме этого, взвешенные частицы песка в сочетании с высокими скоростями течений могут оказывать деформирующее воздействие на некоторые виды планктона. В рассматриваемой зоне также наибольшее развитие получают геохимические процессы, в том числе связанные с загрязнением водной среды [5], что может препятствовать массовому развитию в её водах планктона.

В летнюю межень за счёт постепенного транзита мелкодисперсных наносов с мелководной акватории устьевого взморья р. Северной Двины на более глубоководные участки Двинского залива процессы взмучивания донных отложений перестают вызывать сильное замутнение устьевых вод в диапазоне солёности 5-20‰. Одновременно за счёт сильного прогрева речных и устьевых вод наблюдается усиление минерализации органического вещества, повышающей содержание солей азота и фосфора. Таким образом, можно предположить, что фитопланктон устьевого взморья реки летом получает лучшие условия для массового развития, чем весной. Это влечёт за собой локальную аномалию в сезонной динамике биомассы фитопланктона, которая накладывается на сопутствующее возрастание биомассы зоопланктона.

В дельте р. Северной Двины за счёт разнообразия геоморфологических условий даже на пике весеннего половодья имеются участки со слабыми течениями и сравнительно прозрачной водой, где могут происходить вспышки развития микроводорослей. К ним, в частности, относятся многочисленные микрозаливы и мелководные зоны между дельтовыми рукавами с наличием массовых зарослей галофитов. Но наилучшие условия для формирования высоких биомасс планктон получает за пределами устьевого взморья реки, где глубины повышаются до 20-30 и более метров и сильно ослабевают скорости приливных течений и литодинамические процессы. Здесь содержание взвесей на 1-2 порядка ниже, чем на устьевом взморье реки.

Аналогичная ситуация прослеживается и для донных беспозвоночных. По данным мониторинговых наблюдений НПФ «Су-

барктика», в восточном секторе устьевом взморья р. Северной Двины средняя биомасса зообентоса в 2020 и 2022 годах составила 2,70 и 2,91 г/м². При этом в восточной части дельты реки, по данным СевПИПРО [6], в период с 2012 по 2018 г. она в среднем равнялась 5,25 г/м². За пределами устьевом взморья в зоне биологической пробки маргинального фильтра на юго-востоке Двинского залива биомасса донных беспозвоночных возрастает на порядок [7].

Локализация минимальных биомасс планктона на устьевом взморье р. Северной Двины дает возможность рассматривать его как оптимальный в экологическом отношении район для дампинга грунта. Существующие здесь много лет отвалы грунта, вынимаемого на судоходных каналах в портах Архангельска и Северодвинска, создают более низкий рыбохозяйственный ущерб по сравнению с его возможным объемом, который бы наблюдался при дампинге грунта в зоне биологической ступени маргинального фильтра.

Выводы

Полученные результаты позволяют предположить, что минимум биомассы планктона в вегетационный период наблюдается в зоне коагуляционно-сорбционной ступени маргинального фильтра р. Северной Двины при солёности 5-20‰. Её локальные максимумы в вегетационный период формируются в дельте реки при солёности менее 5‰ и на прилегающей к взморью глубоководной акватории Двинского залива при солёности более 20‰. Наиболее вероятно, что био-

логическая трансформация растворенных биогенных веществ получает наибольшую интенсивность в дельте реки на гравитационной ступени, а трансформация нерастворенной органики, потребляемой гидробионтами-фильтрами – на биологической ступени маргинального фильтра. В условиях наблюдаемого потепления климата наибольшие изменения в его структуре, скорее всего, будут наблюдаться в зоне гравитационной ступени в дельте р. Северной Двины.

Список литературы

1. Гордеев В.В., Филиппов А.С., Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н., Покровский О.С., Шевченко В.П., Дара О.М. Особенности геохимии речного стока в Белое море // Система Белого моря. Т. II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. М.: Научный мир, 2012. С. 225-308.
2. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Ред. В.А. Абакумов. СПб: Гидрометеиздат, 1992. 318 с.
3. Микулинская С.М., Рожков В.А. Обработка малых выборок // Режимобразующие факторы, информационная база и методы ее анализа. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 167-176.
4. Мискевич И.В., Мосеев Д.С., Трошков В.А. Некоторые особенности распределения зоопланктона в маргинальном фильтре устья реки Северная Двина // Естественные и технические науки. 2022. № 4(167). С. 121-124.
5. Котова Е.И., Коробов В.Б., Шевченко В.П., Иглин С.М. Экологическая ситуация в устьевой области реки Северной Двины // Успехи современного естествознания. 2020. № 5. С. 121-129.
6. Студенова М.А., Студенов И.И., Чупов Д.В., Самодов А.С. Зообентос дельты реки Северная Двина // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 34-39.
7. Артемьев С.Н., Новоселов А.П., Левицкий А.Л. Таксономическое и видовое разнообразие макрозообентоса в Двинском заливе Белого моря // Arctic Environmental Research. 2017. Vol. 17. № 4. P. 302-320.