

УДК 574.583

**Гоголицын В.А.**

*Институт океанологии им. Ширшова РАН  
(северо-западное отделение, г. Архангельск)*

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХЛОРОФИЛЛОВ В УСТЬЕВОЙ ЧАСТИ РЕКИ СЕВЕРНАЯ ДВИНА

**V. Gogolitzyn**

*P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS  
(The North-Western Branch, Arkangelsk)*

## THE DISTRIBUTION OF CHLOROPHYLLS IN THE MOUTH OF THE NORTHERN DVINA RIVER

*Аннотация.* На обширном мониторинговом материале показана структурная стабильность пигментного комплекса (хлорофиллов) фитопланктона. Она не зависит от абиотических, биотических и антропогенных факторов. Выявлена характерная закономерность в соотношении основного хлорофилла а и дополнительных b, с к их сумме, как показатель А:В:С, где  $A=a/(a+b+c)$ ,  $B=b/(a+b+c)$ ,  $C=c/(a+b+c)$  в процентах. Показатель отражает общую структуру и функциональность фитопланктона (видовой состав, варианты метаболизма, «зрелость» фитоценоза. Применим к любому водному фитоценозу.

*Ключевые слова:* фитопланктон, фитоценоз, пигментный комплекс (хлорофиллы), абиотические, биотические, антропогенные факторы.

*Abstract.* Structural stability of a pigmentary complex (chlorophylls) of the phytoplankton is shown on extensive material. It does not depend on abiotic, biotic and anthropic factors. Characteristic law has been revealed in the ratio of the basic chlorophyll a and additional b and c to their sum as parameter A:B:C, where  $A=a/(a+b+c)$ ,  $B=b/(a+b+c)$ ,  $C=c/(a+b+c)$  in percentage. The parameter reflects the general structure and functionality of phytoplankton (specific structure, versions of metabolism, "maturity" of phytocenosis) and can be applied to any water phytocenosis.

*Key words:* phytoplankton, phytocenosis, chlorophyll, abiotic, biotic, and anthropic factors.

**Актуальность темы.** В экологической практике разрабатываются различные подходы к оценке состояния биоты (от локального уровня до биосферы в целом) под воздействием антропогенного фактора. Объектом оценки становятся самые разнообразные характеристики различных уровней. Чаще всего берутся, в зависимости от профессионализма и экологического мышления автора, отдельные составляющие произвольно взятых сообществ, по которым выводят различные показатели, индексы и т. п. качества воды или состояния биоты в целом. Таковы система сапробности Колквитца-Марсона, «виды-индикаторы» Пантле-Букка или Сладечека, пигментный индекс E480/E664 и т. п. Все это частные показатели, при которых отсутствует экосистемный подход.

В работе рассмотрен пигментный комплекс (хлорофиллы), отвечающий за поступление в экосистему «бесплатной» энергии кванта. Содержание хлорофиллов пигментного комплекса в биогеоценозе (хотя носителем его является только «живой» фитоценоз) и степень его функциональности (выходная «мощность» через АТФ, НАДФ+, молекулярный кислород в световой реакции) могут быть показателями состояния биогеоценоза в целом. В данной статье представлена новая интерпретация отношений основного и дополнительных пигментов к их

сумме как показатель структурного и функционального состояния фитопланктоценоза в целом.

**Материал и методы.** В основу данной работы положены материалы автора по устьевой части реки Северной Двины (г. Архангельск) за 1975-2000 гг. Рассматриваются уникальные данные по пигментному комплексу на створе водного поста «Соломбала» в 1994-2000 гг. за весь вегетационный период: апрель (май) – ноябрь (декабрь), с периодичностью отбора раз в 3-4 дня за все семь лет и ежемесячные наблюдения за весь вегетационный период по створу «железнодорожный мост» с точками отбора проб «левый» и «правый» берег за 1975-1993 гг., 488 проб [1, 300-304; 2; 3, 33-37; 4; 6].

Для сбора и оценки численности фитопланктона, для определения видового состава использовались планктонные сети (газ № 75), отстойный метод, прямая и обратная фильтрация, счётный метод в камере Фукса – Розенталя. Для разделения фитопланктона «живой»-«мёртвый» пробы обрабатывались методом флуоресцентной микроскопии. Пробы на пигменты фильтровались через ультрафильтры «Сынпор» № 6, осадок на фильтре покрывался тонким слоем углекислого магния и обрабатывался непосредственно, экстракция – 90 % ацетоном. Обработка – спектрофотометрия при длинах волн 480,

630, 647, 664, 750 нм. Расчёт хлорофиллов *a*, *b*, *c* и каротиноидов проводился по общепринятым в мировой практике методикам [7; 8; 9].

**Результаты и их обсуждение.** Фитопланктон всех крупных водотоков Северной Двины как носитель пигментного комплекса имеет одну и ту же структуру: доминирует всегда диатомовый комплекс с преобладанием родов *Asterionella*, *Melosira*, *Cyclotella* с включением *Diatoma*, *Tabellaria*, *Fragilaria*, *Synedra*, *Nitzschia*, т. е. представителями хромофитной линии. Среди зелёных доминанты *Scenedesmus*, *Pediastrum*, *Hyaloraphidium*, *Actinastrum*, *Dictyosphaerium*, *Coelastrum*, из сине-зелёных – *Microcystis*, *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Gomphosphaeria*, *Merismopedia*, *Glaeocapsa*, из золотистых – *Dinobryon*, из эвгленовых – *Trachelomonas*, *Euglena*, *Facus*, *Monomorphyra*. Указанные роды являются планктонными и в сумме составляют более 80-90% общей численности. Виды, встречающиеся редко, очень разнообразны. Как правило, это формы, вымываемые из бентоса и перифитона, а также вынесенные из мелких водоёмов, почв и т. п. Количественно этот аллохтонный материал фактически не играет функциональной роли. Но с его учётом общий флористический список для водотоков Сев. Двины превышает 300 видов и форм. Сезонные изменения по

Таблица 1

**Хлорофилл а. Река Северная Двина, г. Архангельск, створ «ж/д-мост», точки «левый», «правый» берег, 1979-93 гг. и в/пост «Соломбала», 1994-2000 гг.**

годы	пункт	кол-во проб	выше 10 мкг/л	%	выше15 мкг/л	%
1979-1993	ждм, л	62	9	14	2	3
	ждм, п	62	7	11	2	1,6
1994-2000	в/п С.	364	23	6,3	1	0,2
примечание: из 23 проб с величинами выше 10 мкг/л, 13 приходятся на 1997 год.						
максимальные величины по а из 124 проб по створу ждм			левый	18,9 мкг/л	сентябрь	1982
			правый	18,0 мкг/л	сентябрь	1982
максимальные величины из 364 проб по а, b, c, каротиноиды:			a	17,2 мкг/л	20августа	1999
			b	5,2мкг/л	11октября	1999
			c	7,3мкг/л	11октября	1999
			каротиноиды	9,6мкг/л	30августа	1999

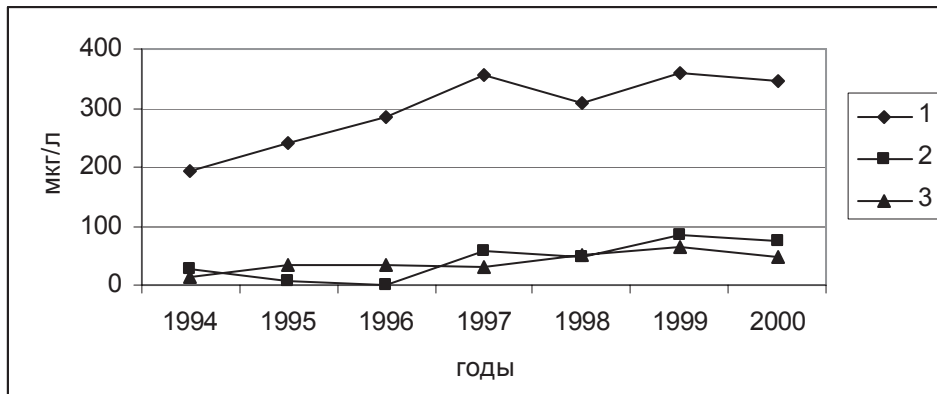


Рис. 1. 1 – хлорофилл а, 2 – хлорофилл в, 3 – хлорофилл с, суммарно по вегетационному сезону за каждый год. Река Северная Двина, г. Архангельск, в/пост Соломбала, 1994-2000

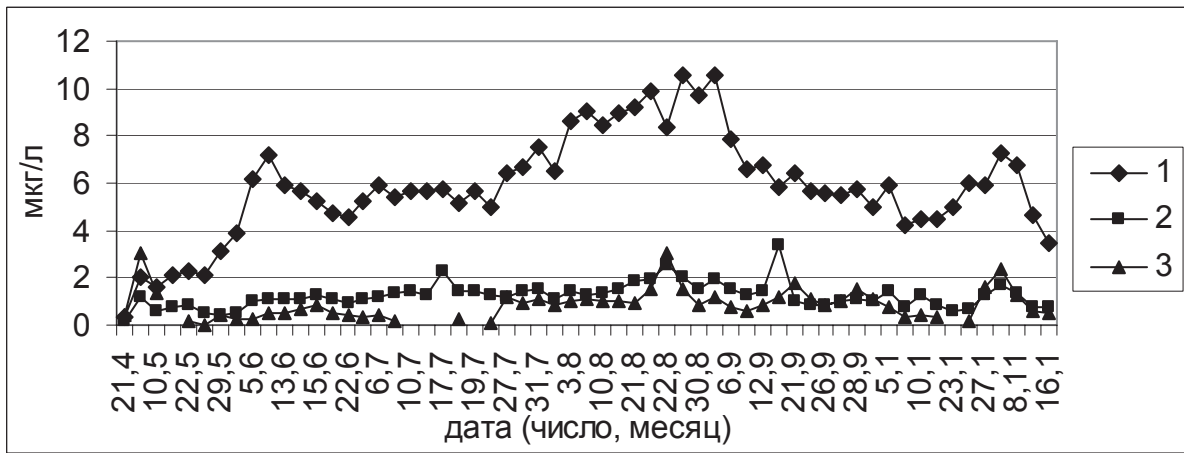


Рис. 2. 1 – хлорофилл а, 2 – хлорофилл в, 3 – хлорофилл с. Река Северная Двина, г. Архангельск, в/пост Соломбала, вегетационный период 2000

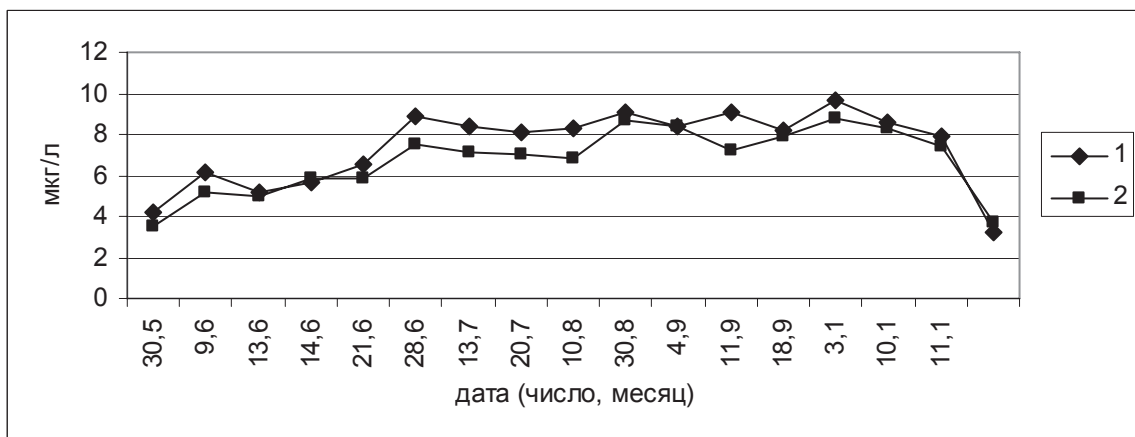


Рис. 3. Хлорофилл а: 1 – отлив, 2 – прилив. Река Северная Двина, г. Архангельск, в/пост Соломбала, весь вегетационный период 1995 г.

видам внутри отделов незначительны. При сильном прогреве воды могут доминировать сине-зелёные (как правило, виды рода *Anabaena*).

Фактический материал по пигментам (основной хлорофилл) представлен в табл. 1. Анализ материала выявляет очень стабильную общую структуру: содержание хлорофилла *a* – 4-10 мкг/л, хлорофилла *b* 0,2-2 мкг/л, хлорофилла *c* – 0,1-1,6 мкг/л и каротиноидов 1-7 мкг/л. Число проб с содержанием хлорофилла *a* (из общего числа проб 364) выше 10 мкг/л составляет 5 %, а выше 15 мкг/л – всего лишь 0,2 % (одна проба). Причём все максимальные величины пришлось на 1999 г.: по хлорофиллу *a* и каротиноидам – на август (17,2 и 9,6 мкг/л соответственно), по хлорофиллам *b* и *c* – на октябрь (5,2 и 7,3 мкг/л соответственно).

Аналогичная картина по распределению основного и дополнительных хлорофиллов и по створу «ж/д мост» («левый» берег и «правый» берег) за период 1979-1993 гг.: из 124 проб (по 62 на каждую точку «левый» и «правый» берег с синхронным отбором проб), пробы с содержанием хлорофилла *a* свыше 10 мкг/л составляют 14 и 11 %, свыше 15 – 2 и 2 % соответственно, причём максимальная величина по хлорофиллу *a* за 15 (!) лет составила 18,9 и 18,0 мкг/л соответственно только раз – в сентябре 1982 г. Распределение по хлорофиллам хорошо прослеживается и на их суммарных величинах за каждый год, учитывая, в первую очередь, климатические условия года: «растянутость» или «сжатость» вегетационного периода (рис. 1). По этой же причине динамика величин основного и дополнительных хлорофиллов демонстрирует межгодовую и сезонную изменчивость, но с сохранением пределов варьирования величин и их соотношений. Для примера представлена расшифровка всей съёмки за 2000 г. (рис. 2).

Содержание хлорофилла *a* в начале июня достигает 4 мкг/л и, заметно варьируя вплоть до 10 мкг/л, остаётся в этих пределах (4-10-4 мкг/л) практически до ледостава (середина ноября). Величины хлорофил-

лов *b* и *c* за единичными исключениями не превышают 2 мкг/л. В 1997 г. ход кривых содержания хлорофиллов в ледостав (10-23 октября) «обрывается» на высоких значениях: 10-12 мкг/л – хлорофилла *a*, 1,5-1,7 мкг/л – хлорофилла *b* и 0,7-1,2 мкг/л хлорофилла *c*. Из анализа рассматриваемых материалов, учитывая гидрологию, выявляется ряд обобщений. Так, в любых случаях содержание основного хлорофилла не зависит от температуры воды (хотя видовой состав, численность, биомасса фитопланктона зависят несомненно).

Учитывая особенности рассматриваемого водного биотопа (устьевая часть с сильно выраженной приливо-отливной динамикой), были проведены наблюдения за содержанием пигментов в течение всего вегетационного периода строго по фазам «прилив-отлив» (рис. 3). Кривые содержания хлорофилла *a* (и дополнительных тоже) практически совпадают. Незначительные изменения могут быть вызваны постоянным перемешиванием водной толщи и привнесением материала из многочисленных локальных микробиотопов.

Литературные источники дают противоречивые сведения по некоторым индексам оценки состояния водных объектов, к примеру, «пигментному индексу» E480/E664 (отношение оптических плотностей на 480 и 664 нм, безразмерная величина), но, как правило, на единичных или немногочисленных наблюдениях, иногда с противоположными выводами у одного и того же автора [5, 162-167]. На всём протяжении вегетационных периодов в наших наблюдениях индекс практически равен 1,0 и только в начале вегетационного сезона (особенно) и в конце он повышается до 2 и чуть выше (рис. 4). Очевидно, что величина больше 1,0 характеризует будущие зрелые фитоценозы в стадии формирования, а также нестабильные фитоценозы в зонах смешения, к примеру, в зоне смешения двинских вод и вод вершины Двинского залива Белого моря (острова Лебедин и Мудьюг), где E480/664 составлял 1,9-2,3 в съёмке 25-26 мая 2004 [10]. Здесь же заметим, что

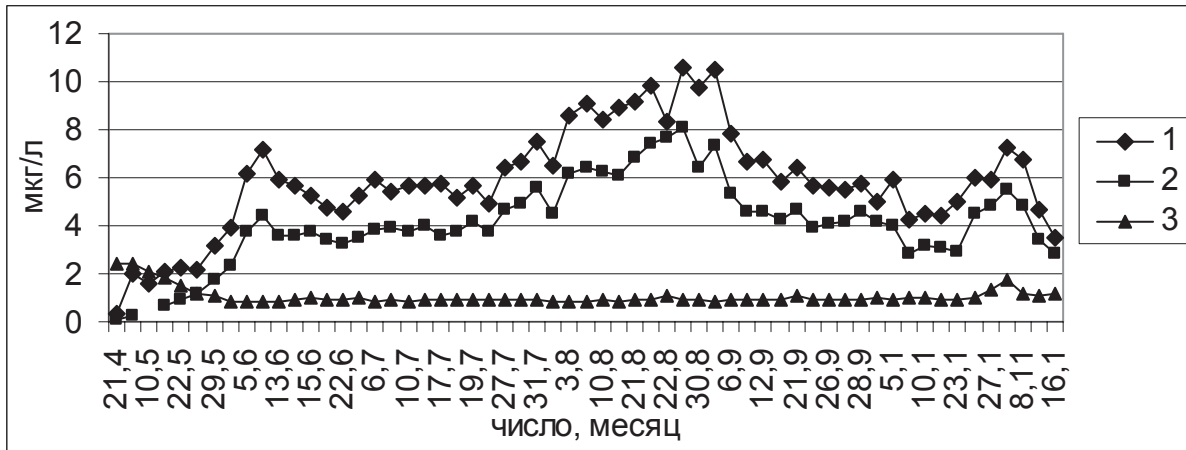


Рис. 4. Хлорофилл а, каротиноиды и «пигментный индекс». 1 – хлорофилл а, 2 – каротиноиды, 3 – E480/664. Река Северная Двина, г. Архангельск, в/пост Соломбала, весь вегетационный период, 2000 г.

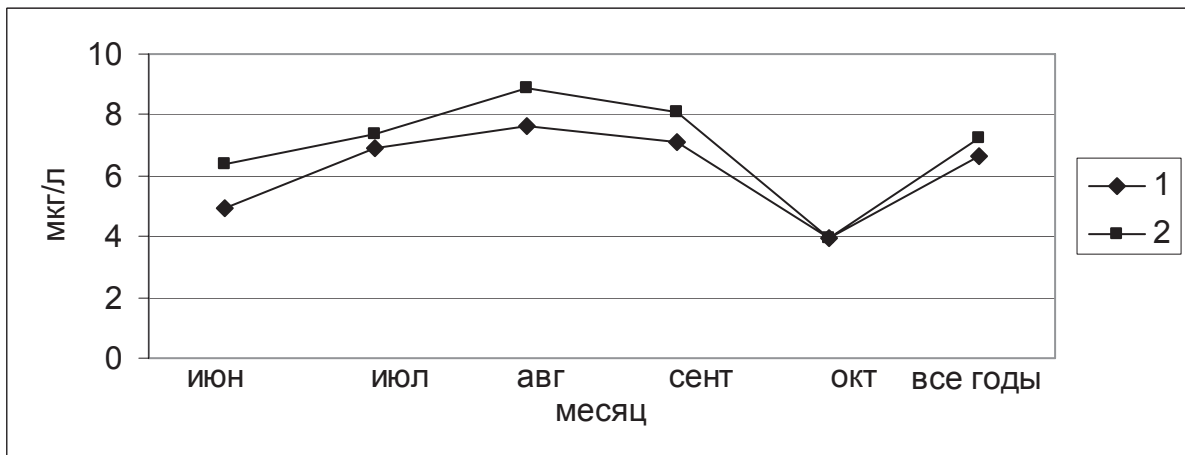


Рис. 5. Хлорофилл а: средний по месяцам вегетационного периода за 15 лет и суммарно по всем данным («все годы»), р. Северная Двина, г. Архангельск, створ «ж/д мост»: 1 – точка «правый берег», 2 – точка «левый берег», 1979-1993 гг.

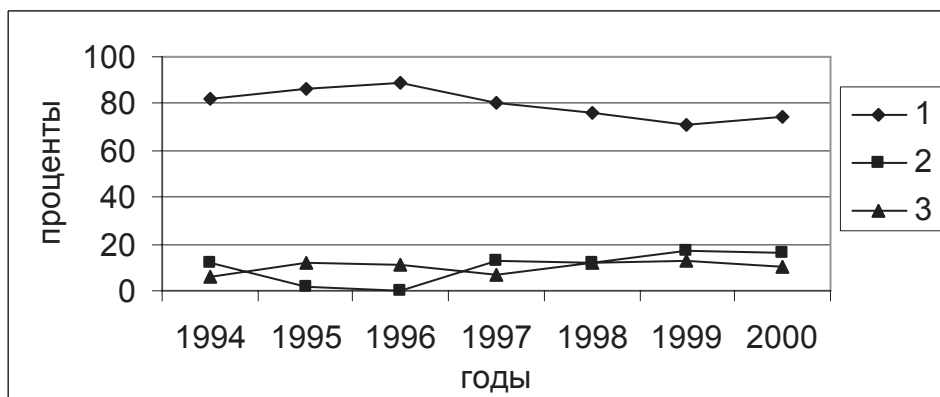


Рис. 6. Хлорофиллы. Отношения: 1 –  $A=a/(a+b+c)$ , 2 –  $B=b/(a+b+c)$ , 3 –  $C=c/(a+b+c)$ ; суммарно по каждому году. Река Северная Двина, в/пост Соломбала, 1994-2000 гг.

при всех наблюдениях за хорошо выраженными фитоценозами кривые содержания основного хлорофилла и каротиноидов идут практически параллельно (но каротиноидов всегда меньше).

Устьевая часть особенно подвергалась и подвергается сильнейшему антропогенному воздействию на все компоненты водной биоты (Архангельский и Соломбальский целлюлозно-бумажные комбинаты). Но пигментный комплекс, защищённый и эволюционно и генетически, теоретически должен менее всего испытывать подобные влияния. Данные по пигментам в точках отбора «левый» и «правый» берег створа «ж/д мост» за 15-летний период наблюдений в течение всего вегетационного периода подтверждают это (рис. 5). Хорошо просматривается параллельность кривых за весь вегетационный период, при этом величины хлорофилла *a* несколько выше по левому берегу. По абсолютным величинам расхождение также весьма незначительно: 99,73 мкг/л (правый) и 108,42 мкг/л (левый) – для суммарных данных по месяцам и 6,65 мкг/л (правый) и 7,23 мкг/л (левый) – для средних данных по месяцам. При такой относительной стабильности пигментного комплекса на обеих точках, по остальным синхронным гидробиологическим и гидрохимическим данным (микробиология, биогены, «загрязнители»), отличие по этим точкам очень велико: именно водоток левого берега подвержен постоянному влиянию сбросов Архангельского ЦБК [4].

Рассматривая и сопоставляя любые отдельные годы, не отмечаем никаких корреляций по точечным величинам хлорофиллов. Это вполне объяснимо климатическими особенностями вегетационного периода (отсюда варибельность видового состава, численности, биомассы фитопланктона, водной массы, биогенов) каждого года. В нашем случае величина **A** за все годы составляет от 71 до 89%, **B** – от 0 до 17% и **C** – от 6 до 13%; показатель же по абсолютным величинам (суммарно за все 7 лет) **A:B:C = 78:11:10**.

Характерно, что кривые **A** (по основному хлорофиллу) и **B**, **C** (по дополнительным)

идут зеркально (в противофазе, особенно между **A** и **B**) и с большим разрывом. Этот вариант показателя уже *a priori* может показывать, что данный фитоценоз структурно и функционально хорошо развит (а это подтверждено синхронными наблюдениями за структурой фитоценоза и скоростью фотосинтеза): основной хлорофилл максимально превалирует в пигментном комплексе (фотоавтоаккумулируемая энергия фотосинтеза). Водоросли хлорофитной линии, т. е. зелёные и эвгленовые, могут «выпадать» из фитопланктона (1996 г.) или переходить на другие пути метаболизма (как и гетеротрофы хромофитной линии). Хорошо просматривается общая структура и функциональность фитоценоза по годам: «благоприятный» (с точки зрения ввода в экосистему аккумуляированной энергии кванта) 1996 г. и, наоборот, – 1999 гг. Фактически, по таким отношениям в многолетних (временных) или сезонных рядах мы можем определять динамику функционирования биоты в целом: обеспеченность её фотоавтоаккумулируемой энергией, направленностью метаболизма, влиянием внешних («стрессовых») факторов и т. п. Что касается функциональности пигментного комплекса, укажем только (по нашим синхронным опытам), что при одинаковой структуре пигментного комплекса, валовая продукция, чистая продукция, общая деструкция и АЧ значительно варьируют по створам и месяцам: от практического отсутствия до величин 1,72, 1,61, 1,18 мг кислорода/л/сутки и 3,35 мг углерода/хлорофилл *a* / час соответственно. Это значит, что функциональный выход пигментного комплекса не связан линейно с видовым составом, численностью или биомассой его носителя – фитоценоза и что объём хлорофилла *a* вероятно всегда достаточен для выполнения своей функции по «запросу» биоты.

**Заключение.** Характеристики фитоценоза (видовой состав, численность, биомасса) устьевой части Северной Двины в вегетационный период изменяются. Содержание хлорофилла *a* – 3-9 мкг/л, хлорофилла *b* – 0,2-1,8, хлорофилла *c* – 0,1-1,6 и каротиноидов – 1-7.



Относительное соотношение хлорофиллов (по показателю **A:B:C**) показывает стабильную структуру пигментного комплекса, в среднем составляя **78:11:10**.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гоголицын В.А. Стабилизирующая (регуляторная) роль фитопланктона (пигментный комплекс) в системе реопланктона // Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря. Материалы X Международной конференции. 18-20 сентября 2007.. Архангельск.
2. Гоголицын В.А. Регуляторная роль фитоценоза (хлорофилла «а») в системе реопланктона водотоков бассейна р. Северная Двина 1979 – 2000 гг. Доклад на международной Конференции «Лоир». М., 2005.
3. Гоголицын В.А. Фитопланктон (фикопланктоценоз). Экологический подход. Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Водные экосистемы: трофические уровни и проблемы поддержания биоразнообразия». 24-28 ноября 2008. Вологда.
4. Ежегодники качества поверхностных вод по гидробиологическим показателям (раздел «Северо-запад» под ред. Гоголицына В.А.). Москва. Гидрометеоиздат. 1979-2000.
5. Сиделев С.И, Бабаназарова О.В.. Анализ связей пигментных и структурных характеристик фитопланктона высокоэвтрофного озера Неро // Journal of Siberian Federal University. Biology. 2 (2008 1).
6. Gogolitzyn V. A. Planktonic biocenose of the mouth parts of the river Northern Dvina. 1975-2001. // Seventh Workshop on Land Ocean Interactions in the Russian Arctic, LOIRA projet. November 15-18. 2004. IASC. Moscow
7. Jeffrey S.W., Humphrey G.F. (1975). New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants algae and natural phytoplankton. Biochem. Phys. Pflanz. 2: 191-194
8. Lorenzen G.J. (1967) Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equations. Limnology and Oceanography. 2: 343-346
9. Parsons T.R., Strickland J.D.H. (1963) Discussion on spectrophotometric determination of marine plant pigments with revised equations for ascertaining chlorophylls and carotenoids. J. Marine Res. 3: 155-163
10. Shevchenko P. .... Gogolitzyn V.A. System approach in biogeochemical studies in the Northern Dvina delta during the flood period. May 2004// Seventh Workshop on Land Ocean Interactions in the Russian Arctic. LOIRA projet. November 15-18. 2004. IASC. Moscow