



УДК 581.526.325

Структура и функционирование фитопланктона в эстуарии реки Невы в 2011–2016 гг.

В.Н. Никулина* и М.С. Голубков

Зоологический институт Российской академии наук, Университетская наб. 1, 199034, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: vera.nikulina@zin.ru, golubkov_ms@mail.ru

РЕЗЮМЕ

Многолетние (с 1982 г.) наблюдения, которые проводятся в эстуарии р. Невы, показали, что в период исследований 2011–2016 гг. общий характер распределения, видовой состав и обилие фитопланктона отличались от тех, которые были зафиксированы ранее. Наибольшие изменения отмечены в центральной части у северного побережья Невской губы. При наблюдающихся процессах эвтрофирования в Невской губе (ст. 12) и в восточной части Финского залива (ст. 19) в летнем фитопланктоне (конец июля – начало августа) доминировали разные группы водорослей. Основным механизмом, регулирующим видовой состав фитопланктона, в данной ситуации являлись гидрологические условия, наблюдающиеся в разных частях эстуария. Мелководность, активная ветровая деятельность, отсутствие кислородной и температурной стратификации, биогенная обеспеченность в Невской губе являлись благоприятными условиями для развития в фитопланктоне хлорококковых зеленых, криптофитовых, эвгленовых и др. групп водорослей. При высоком индексе разнообразия Шеннона (3.8–4.0) в Невской губе наибольшую долю в общем объеме биомассы составляли хлорококковые водоросли. В курортной зоне Финского залива в конце июля – начале августа обычно устанавливается прямая температурная стратификация, при достаточном количестве биогенных элементов создаются условия для развития в эпилимнионе стагнофильных планктонных водорослей с преобладанием цианобактерий. Здесь же чаще всего наблюдаются периоды поверхностного «цветения» воды. Для наиболее эвтрофируемых участков Невской губы и внутреннего эстуария проведено сравнение средних структурных, функциональных и относительных показателей планктона со средними величинами для всей акватории. Основные характеристики фитопланктона: биомасса, первичная продукция, концентрация хлорофилла и содержание общего фосфора на участке северной зоны Невской губы, практически в 2–3 раза превышали средние значения по губе. Достаточно высокому уровню трофии соответствовал и видовой состав водорослей. Во внутреннем эстуарии Финского залива (ст. 19) наблюдавшиеся средние значения также несколько превышали средние по эстуарию, но, в то же время, относительные показатели мало отличались от тех, которые рассчитаны для остальной акватории. Структурные и функциональные характеристики фитопланктона свидетельствуют, что при эвтрофировании в разных частях эстуария в летний период создаются условия, способствующие развитию разных групп водорослей планктона.

Ключевые слова: фитопланктон, видовой состав, биомасса, первичная продукция, хлорофилл

Structure and functioning of phytoplankton in the Neva estuary in 2011–2016

V.N. Nikulina* and M.S. Golubkov

Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences, Universitetskaya nab. 1, 199034, St. Petersburg, Russia

ABSTRACT

Long-term observations (since 1982), which had been carried out in the Neva River estuary, have shown that in 2011–2016 the general nature of distribution, species composition and abundance of phytoplankton differed from those that were recorded earlier. The greatest changes are noted in the central part close by northern coast of the

* Автор-корреспондент / Corresponding author.

Neva Bay. With observed eutrophication in the Neva Bay (st. 12) and in the eastern part of the Gulf of Finland (st. 19), different groups of algae dominated in the summer phytoplankton (late July – early August). The main mechanism regulating the species composition of phytoplankton were hydrological conditions observed in different parts of the estuary. Also Shallow water, wind activity, oxygen deficiency and temperature stratification, nutrient supply were favorable conditions for development of chlorococcal green, cryptophyte, euglenic and other algae groups. With a high Shannon index (3.8–4.0) in the Neva Bay, the largest share to the total biomass was given by chlorococcal algae. In the resort area of the Gulf of Finland at the end of July – early August, direct temperature stratification was usually established, with enough nutrients creating conditions for the development of stagnophilic planktonic algae with a predominance of cyanobacteria in the epilimnion. Here, more often, were periods of surface “blooms”. For the most eutrophied areas of the Neva Bay and the inner estuary the average structural, functional, and relative indicators of plankton were compared with average values for the entire water area. The main characteristics of phytoplankton: biomass, primary production, chlorophyll concentration and total phosphorus content in the northern zone of the Neva Bay, were 2–3 times higher than the average values on the Gulf. The species composition of algae corresponded to a sufficiently high trophic state. In the resort area of inner estuary of the Gulf of Finland (st. 19), the observed mean values also slightly exceeded the average values for the estuary, but the relative indicators differed little from those calculated for the rest of the water area. The structural and functional characteristics of phytoplankton indicated that during eutrophication in different parts of the estuary, in Summer, conditions were favorable to promote the development of different groups plankton algae.

Keywords: phytoplankton, species composition, biomass, primary production, chlorophyll

ВВЕДЕНИЕ

В период многолетнего строительства комплекса защитных сооружений г. Санкт-Петербурга от наводнений постоянно велись наблюдения за гидробиологическими характеристиками на акватории Невской губы и восточной части Финского залива (Алимов и Голубков, [Alimov, Golubkov] ред., 2008; 2012; Винберг и Гутельмахер, [Winberg and Gutelmakher] ред., 1987; Шишкин и др. [Shishkin et al.], 1989; и др.).

Основные строительные работы на комплексе защитных сооружений были завершены в 2010 г, официальная церемония ввода в эксплуатацию произошла 12 августа 2011 года.

В настоящее время такой антропогенный фактор, как активное воздействие на акваторию эстуария во время инженерных работ, следует признать состоявшимся фактом. Проведенные исследования преследовали цель оценить состояние экосистемы в настоящее время по структурным и функциональным характеристикам фитопланктона, при воздействии естественных и антропогенных факторов, определяющих функционирование экосистемы.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Многолетнее изучение фитопланктона Невской губы показало, что акватория губы под-

разделяется согласно гидрологическому режиму на центральную зону транзита невских вод (с наибольшей скоростью стокового течения) северную и южную. Поэтому довольно сложно судить об экологическом состоянии всей губы по средним величинам каких-либо гидробиологических показателей. Курортную зону восточной части Финского залива также принято разделять на три: курортную, переходную и южную. Общий район исследований в 2011–2016 гг. приведен на Рис. 1. Исследования проводили в конце июля–начале августа. Предыдущими работами показано, что этот период наиболее показателен для оценки экологического состояния системы по фитопланктону (Никулина [Nikulina], 1996). В 2013 г. были также проведены наблюдения в поздневесенний период, 4–5 июня.

В период объездов по акватории эстуария пробы отбирали из фотического слоя, который считался равным двум прозраностям. Воду отбирали батометром через каждый метр, сливали в одну емкость, перемешивали и пробу помещали в склянки объемом 0.5 л, сразу же фиксировали раствором Люголя. При дальнейшем хранении проб добавляли формалин. Определение видового состава и подсчет водорослей проводили в осадочных цилиндрах объемом 5–10 мл с использованием инвертированного микро-

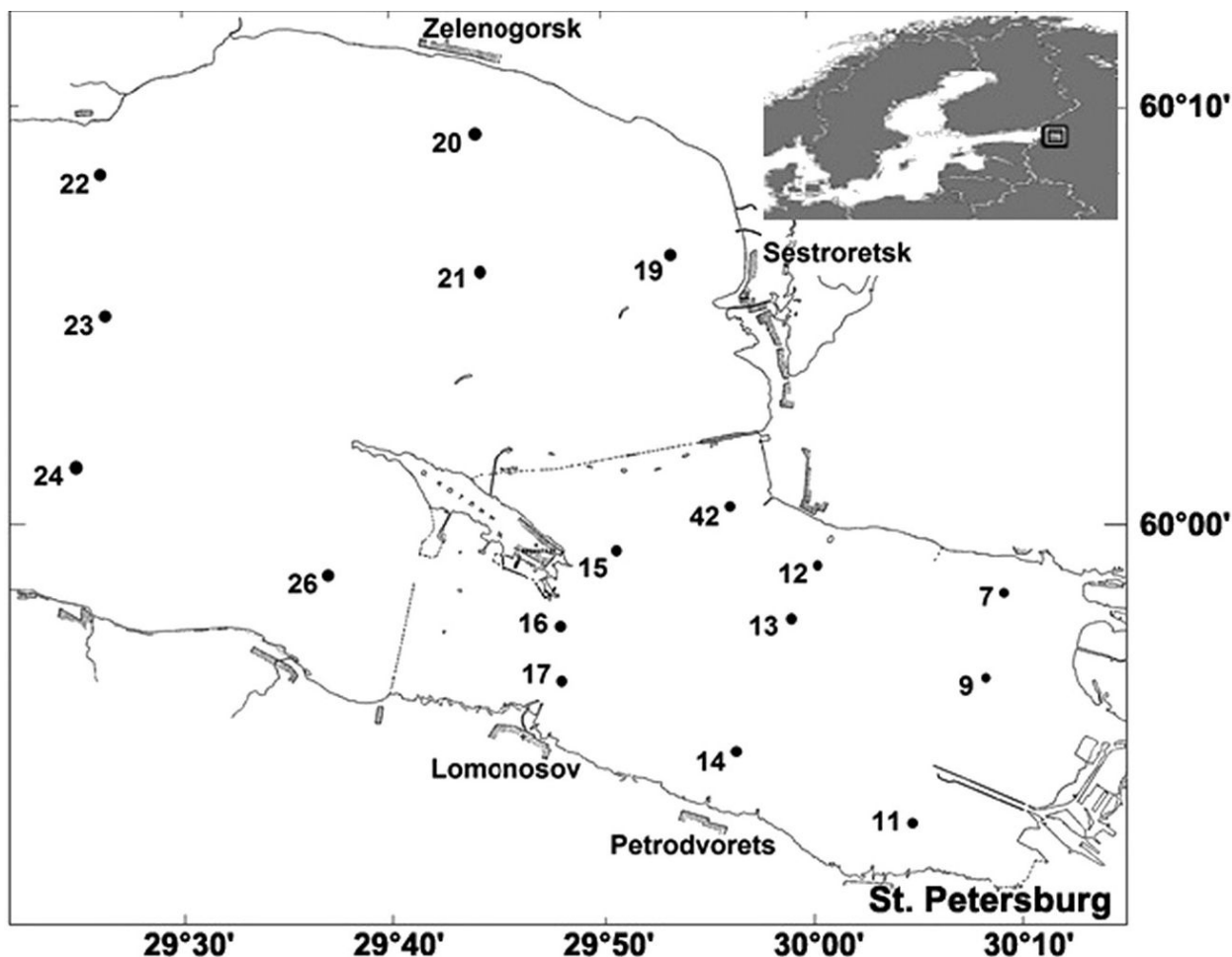


Рис. 1. Карта-схема района исследований

Fig. 1. A map of the Study area

скопа Hydro-Bios или микроскопа БИМАМ с использованием камеры Нажотта. Биомассу рассчитывали общепринятым способом по суммарному объему клеток водорослей, принимая, что 10^9 мкм³ соответствует 1 мг сырой биомассы фитопланктона. К доминирующим видам отнесены те, численность и/или биомасса которых в тот или иной период превышали 10% общей.

Одновременно в этой же интегральной пробе скляночным методом в кислородной модификации измеряли скорость фотосинтеза планктона и скорость деструкции органического вещества, (Бульон [Bouillon] 1994); содержание хлорофилла *a* измеряли спектрофотометрическим методом (Strickland and Parsons, 1968). Концентрацию общего фосфора определяли стандартным

методом сжигания нефилтрованной пробы воды с последующим определением минерального фосфора молибдатным методом. Определяли также содержание общего и взвешенного органического вещества. Используемые методы подробно изложены в монографии (Алимов и Голубков, [Alimov, Golubkov], 2008).

На основании полученных данных рассчитаны так называемые «относительные» характеристики планктона, принятые в гидробиологии. Отношение первичной продукции к деструкции (А/Д) – важный показатель, характеризующий направленность процесса в водоеме при загрязнении и эвтрофировании. Суточный Р/В-коэффициент отражает фотосинтетическую активность единицы биомассы. Соотно-

шение биомассы фитопланктона и взвешенного органического вещества позволяет судить о доли водорослей в планктонном сообществе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сезонные наблюдения, которые проводили ранее на акватории эстуария, показали, что по видовому составу водорослей планктона в весенний период можно четко идентифицировать воды, поступающие в Невскую губу и курортную зону залива, с одной стороны, из Ладоги, с другой – из Финского залива (Макарова [Makarova], 1997; Никулина [Nikulina], 1987; 1991; 1997; Nikulina, 2003 и др.).

Весеннее цветение в восточной части Финского залива и в Ладожском озере чаще всего отмечается в апреле–мае. В то же время сроки и интенсивность максимального развития водорослей планктона весной могут значительно меняться от года к году. Наблюдения, проведенные 4–5 июня 2013 г., свидетельствуют, что в этот период еще сохранились остатки весеннего комплекса фитопланктона. Общая биомасса фитопланктона в Невской губе приведена на Рис. 2. В центральной части Невской губы (ст. 9 и 13) достоверным весенним представителем ладожского планктона были диатомовые водоросли *Aulacoseira islandica* O.Mull., составляя 46 и $54 \cdot 10^3$ кл л⁻¹. В общей биомассе на комплекс диатомовых водорослей приходилось 50%, куда входили *Asterionella formosa* Hass., *Tabellaria fenestrata* (Lyngb.) Kütz., *Cyclotella kuetzingiana* Thwait., т.е. виды, обычные и для летнего периода. Остальную половину биомассы составляли различные группы, при этом более 30% – криптофитовые водоросли, доля цианобактерий была от 1 до 6% общей биомассы (Рис. 2а).

На ст. 16 и 16а, у южных ворот, численность весенних диатомовых Ладожского озера составила только $13 \cdot 10^3$ кл л⁻¹. Общая биомасса была выше, чем в центральной части губы – 1.2–1.5 мг л⁻¹. Доля цианобактерий в биомассе, при доминировании мелкоклеточных колоний *Microcystis reinboldii* (Richter) Forti, не превысила 2%. Значение цианобактерий несколько увеличилось на ст.16 за счет изредка встреченных нитчатых водорослей *Planktothrix agardhii* (Gom.) Anagn. et Komarek. При численности

цианобактерий $784 \cdot 10^3$ кл л⁻¹ доля в общей биомассе составила 8.4% (Рис. 2а).

В восточной части Финского залива характер весеннего цветения во многом определяется режимом солености в различных участках акватории. В районе, находящемся в непосредственном влиянии невских вод, комплекс фитопланктона формируется пресноводными диатомовыми *A. islandica* и *A. formosa*. В период наших исследований отмечен характерный представитель весеннего комплекса мелководной части залива – вид *Diatoma tenuis* Ag. В пробах из Невской губы данный вид в проведенных исследованиях не встречен. Во внутреннем эстуарии численность *D. tenuis* менялась в зависимости от солености воды. Так, в районе ст. 21, при солености 0.93‰, численность этого вида составляла $0.8 \cdot 10^6$ кл. л⁻¹, а на ст. 24 при солености 2.2‰ – $5 \cdot 10^6$ кл. л⁻¹.

Как показано в прежних работах, в первый период весеннего развития фитопланктона преобладают диатомовые, позже добавляются динофитовые водоросли *Peridiniella catenata* (Lev.) Kof. В начале июня 2013 г. солоноватоводные виды значимую роль играли только на ст. 24 при солености 2.2‰ – это диатомовые *Achnanthes taeniata* Grunow ($2.5 \cdot 10^6$ кл л⁻¹), *Chaetoceros wighamii* Brightwell ($78 \cdot 10^3$ кл л⁻¹), *Melosira numuloides* C.A. Agardh ($456 \cdot 10^3$ кл л⁻¹), и динофитовые *P. catenata* ($18 \cdot 10^3$ кл л⁻¹). В других районах исследованной акватории доля солоноватоводных водорослей была ничтожно мала.

Величина общей биомассы и доля различных отделов водорослей приведены на Рис. 3 и 3а. В отличие от Невской губы, практически на всей обследованной акватории залива в биомассе фитопланктона преобладали диатомовые водоросли, особенно их роль была значительной в районе ст. 24, там же отмечена и наибольшая величина биомассы. На долю водорослей из других отделов приходилось менее 10%.

Несмотря на то, что летний период только начинался, 4–5 июня в районе станций 19, 21 и 26 доля цианобактерий в биомассе составляла около 5.5%. На ст. 21а значительную долю составляли зеленые жгутиковые водоросли, относящиеся к классу вольвоксовых. Таким образом, видовой состав водорослей и их количественное развитие, зафиксированные в начале июня 2013 г., мало отличались от тех, которые

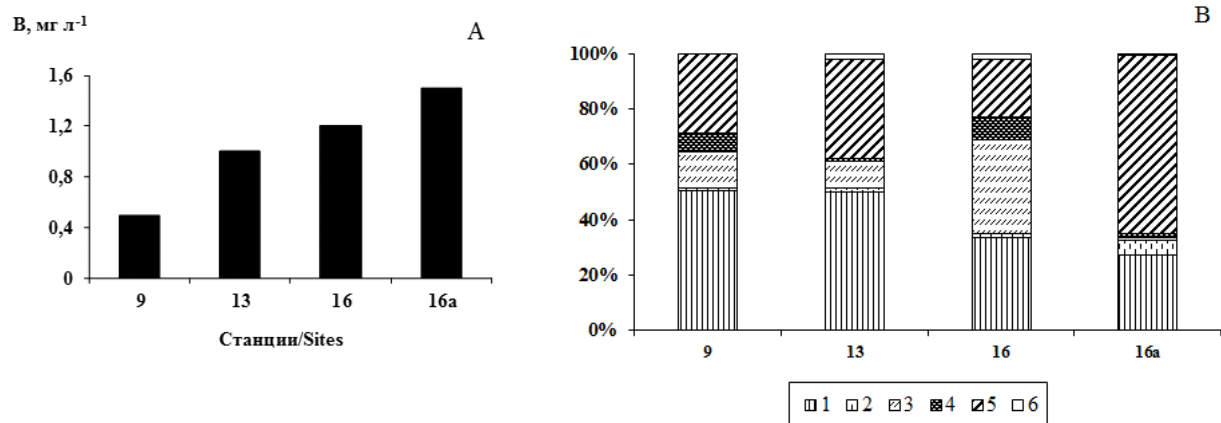


Рис. 2. Характеристика сообщества фитопланктона в Невской губе весной 2013 г. А – биомасса фитопланктона (мг л⁻¹). В – относительное значение отдельных групп водорослей: 1 – диатомовые, 2 – зеленые, 3 – золотистые, 4 – цианобактерии, 5 – криптофитовые, 6 – прочие.

Fig. 2. Characteristic of phytoplankton in the Neva Bay in spring 2013. А – Phytoplankton biomass (mg L⁻¹), В – share of different algal groups in biomass: 1 – Bacillariophyta, 2 – Chlorophyta, 3 – Chrysophyta, 4 – Cyanobacteria, 5 – Cryptophyta, 6 – Others

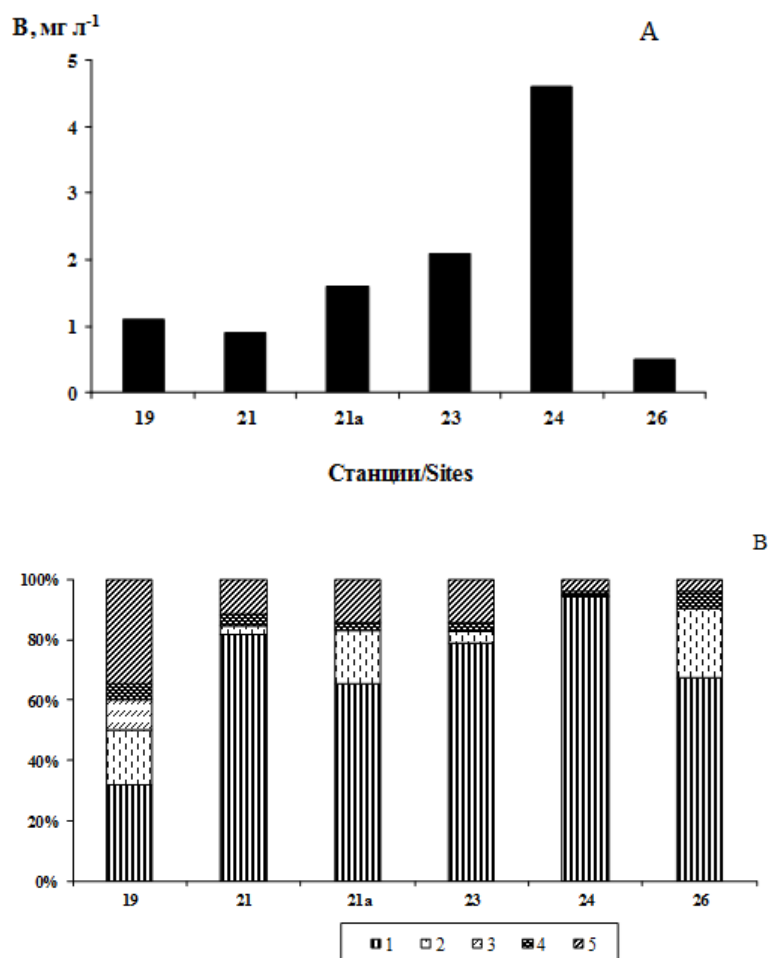


Рис. 3. Характеристика сообщества фитопланктона во внутреннем эстуарии весной 2013 г. А – биомасса фитопланктона (мг л⁻¹). В – относительное значение отдельных групп водорослей: 1 – диатомовые, 2 – зеленые, 3 – золотистые, 4 – цианобактерии, 5 – криптофитовые, 6 – прочие.

Fig. 3. Characteristic of phytoplankton in the inner estuary in spring 2013. А – Phytoplankton biomass (mg L⁻¹), В – share of different algal groups in biomass: 1 – Bacillariophyta, 2 – Chlorophyta, 3 – Chrysophyta, 4 – Cyanobacteria, 5 – Cryptophyta, 6 – Others.

наблюдались ранее, при изучении сезонной динамики фитопланктона (Nikulina 2003).

Общий характер распределения водорослей планктона, видовой состав и обилие в летний период последних 6 лет несколько отличались от тех, которые наблюдались ранее (Никулина [Nikulina], 2012). Наибольшая неоднородность между станциями отмечена вдоль северного побережья губы. Более, чем за 30-летний период наблюдений, биомасса фитопланктона в северной части Невской губы в летний период никогда не превышала 1–2 мг/л. В районе восточной ст. 7 средняя за исследованный период биомасса фитопланктона, как и прежде, не превысила 1 мг л⁻¹. В районе ст. 12 в среднем за 2011–2016 гг. она составила – 7.9±2.7 мг л⁻¹. Такие величины биомассы соответствуют водам эвтрофного типа. (Китаев [Kitaev] 2007). А по биомассе, наблюдавшейся в конце июля 2016 г., этот участок Невской губы следует характеризовать как высокоэвтрофный (Рис. 4). В последние годы по характеру фитопланктона акватория средней северной зоны по структурному составу и по количественным показателям сравнялась с теми, что обычно наблюдаются на юге губы.

В центральной части губы (ст. 9, 13, 15) фитопланктон представлен несколько обедненным ладожским планктоном. Биомасса в летний период редко превышала 2 мг л⁻¹, в среднем за рассматриваемый период составила 1.6±0.33 мг л⁻¹.

Южная часть губы всегда резко отличалась от основной акватории. В конце июля – начале августа отмечалось наибольшее разнообразие водорослей (до 60 видов в пробе), где, кроме ладожского планктона, значительную долю составляли зеленые хлорококковые, эвгленовые и десмидиевые водоросли, характерные для эвтрофных и мелководных водоемов прудового типа. В летний период 2011–2016 гг. эта зона губы характеризовалась как эвтрофная, средняя биомасса составляла 8.6±2 мг л⁻¹ (Рис. 5).

В качестве особенности летнего фитопланктона Невской губы можно отметить обильное развитие криптофитовых водорослей. В общей биомассе доля криптофитовых иногда составляла от 50 до 79%. Благодаря значительному индивидуальному весу, даже при невысокой общей численности фитопланктона, величины биомассы (13.8 мг л⁻¹ на ст. 17) характеризуют юго-западную часть губы как высокопродуктивную.

Восточная часть Финского залива по гидрологическим и гидробиологическим признакам условно разделена на курортный (ст. 19, 20, 21), переходный (ст. 23, 24) и южный (ст. 26) районы, входящие в так называемый «внутренний эстуарий». По составу и количественному развитию отдельных видов фитопланктона эти участки весьма неоднородны. Общая биомасса водорослей планктона приведена на Рис. 6, 6 а. Величина биомассы свидетельствует, что обилие фитопланктона изменяется от года к году. Наиболее продуктивной следует признать курортную зону, здесь же чаще всего отмечаются периоды «цветения» воды цианобактериями. Благодаря особым гидрологическим условиям, складывающимся в мелководной северной курортной зоне Финского залива, фитопланктон здесь представлен озерным комплексом, что особенно отчетливо проявляется в летне-осенний период. В период девяностых – начале двухтысячных годов в планктоне преобладали цианобактерии осцилляториевого комплекса. Высокой численности достигали нитчатые формы *Limnothrix planctonica*, (Wolosz.) Meff., *Planktolyngbia limnetica* (W. West) Anagn. a. Komarek. Доля этих видов в общей биомассе фитопланктона из-за небольшой ширины трихомов (1.5–2.5 мкм) была незначительной. В биомассе преобладал вид *Plankthotrix agardhii*, (Gomont) Anagn. также входящий в осцилляториевый комплекс. (Никулина [Nikulina], 1996). При этом из состава водорослей вызывающего «цветение» воды, тогда совершенно исчез вид *M. aeruginosa* Kütz. С 2011 г. этот вид опять постоянно присутствует в группе цианобактерий, даже когда «цветения» воды не отмечается. Многолетние наблюдения свидетельствуют, что, несмотря на возрастание летней биомассы, доля водорослей *P. agardhii*, показателя органического загрязнения, в общем комплексе фитопланктона значительно снизилась. Виды, способные вызывать поверхностное «цветение» воды – *Aphanizomenon flos-aquae* (Linné) Ralfs, *Aphanizomenon gracile* Lemm. *Anabaena flos-aquae* Bréb, *Anabaena circinalis* Rabenh., *Microcystis aeruginosa*, и др. в последние годы довольно широко представлены в летне-осеннем комплексе планктона. Особенно сильное «цветение» воды наблюдалось в 2012 году в районе ст. 19. Общая биомасса в этот период

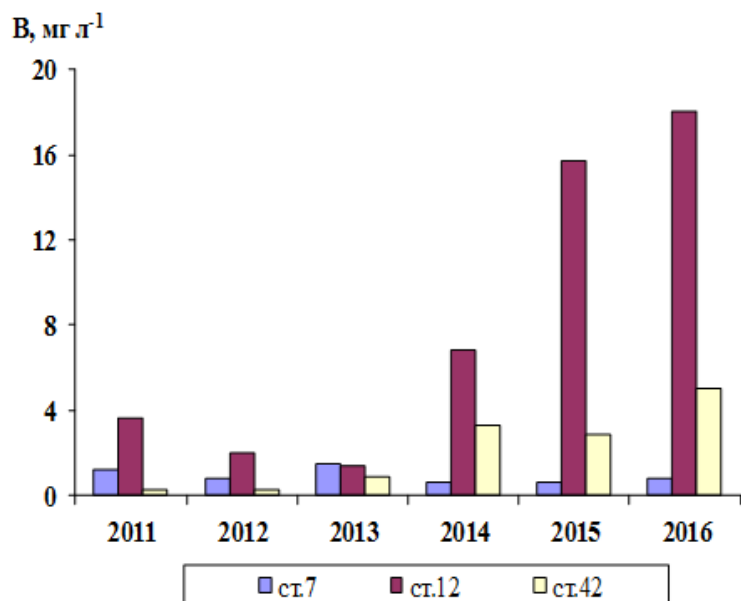


Рис. 4. Биомасса фитопланктона (mg L^{-1}) в северной зоне Невской губы.

Fig. 4. Phytoplankton biomass (mg L^{-1}) in the Neva Bay northern zone.

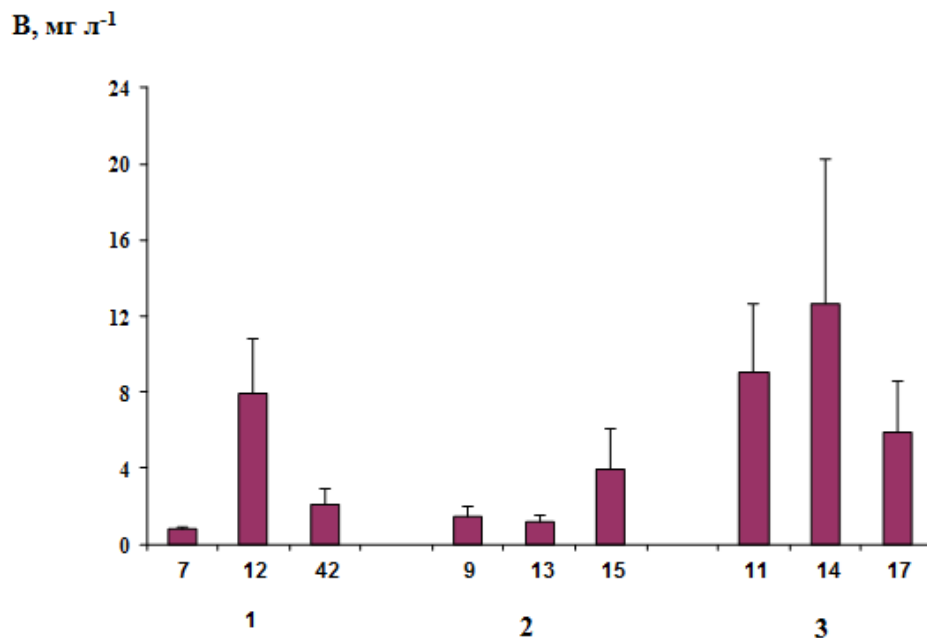


Рис. 5. Биомасса фитопланктона (mg L^{-1}) в Невской губе в 2011–2016 гг: 1 – север, 2 – центральная часть, 3 – юг.

Fig. 5. Phytoplankton biomass (mg L^{-1}) in the Neva Bay in 2011–2016: 1 – northern part, 2 – central part, 3 – southern part.

составляла более 22 mg L^{-1} . Такой уровень «цветения» может быть оценен как экологически опасный (Кривошалева и Танаева [Krivopalova and Tanaeva], 1985).

В курортном районе в 2014 г. более 50% общей биомассы приходилось на нитчатые формы цианобактерий, такие как *Anabaena*, *Aphanizomenon*,

Oscillatoria, при этом 22% биомассы цианобактерий опять составлял вид *P. agardhii*.

Периодическое проведение гидротехнических работ в Невской губе и курортной зоне Финского залива приводит к значительному увеличению мутности воды, что вызывает ингибирующее воздействие, как на водорос-

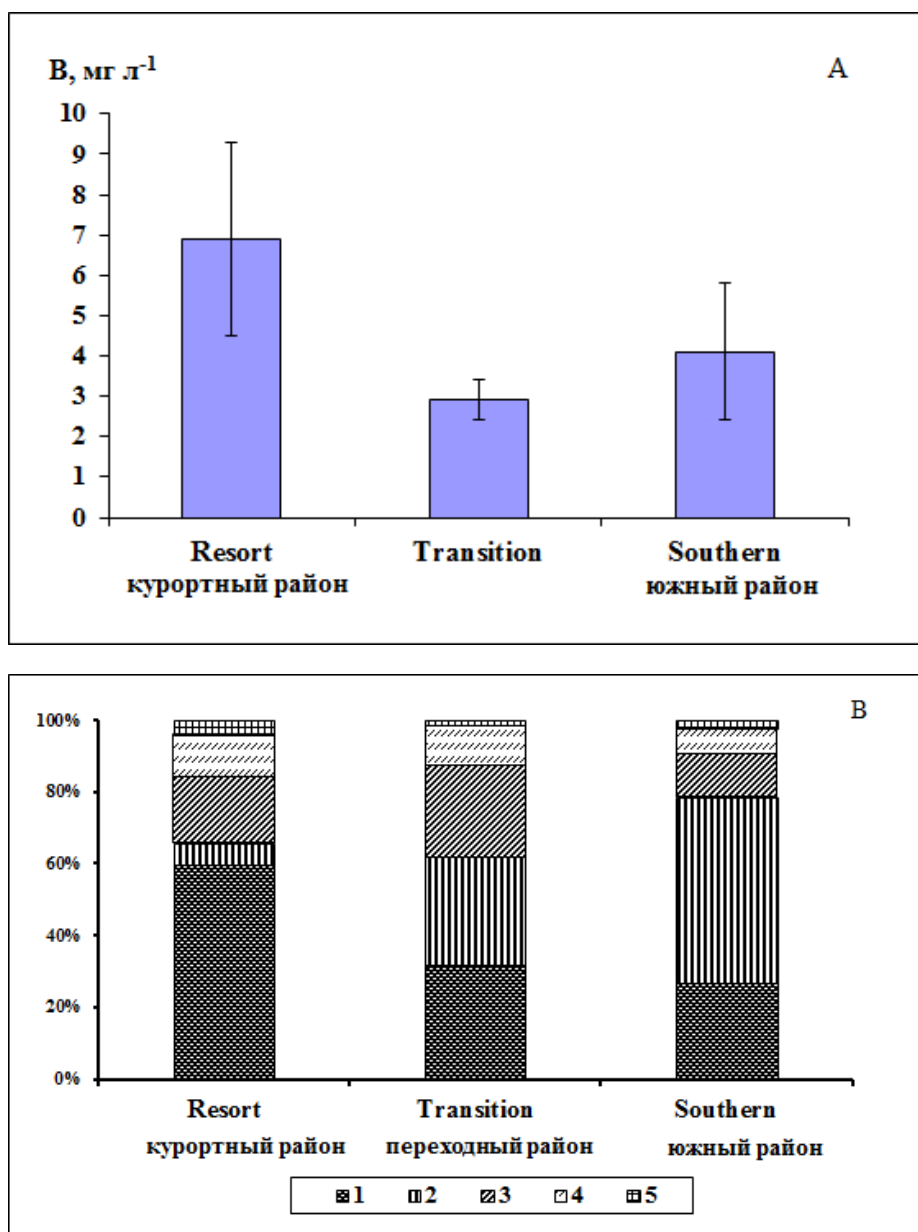


Рис. 6. Характеристика сообщества фитопланктона в Невской губе в 2011–2016 гг. А – Биомасса фитопланктона (мг л^{-1}). В – относительное значение отдельных групп водорослей: 1 – диатомовые, 2 – зеленые, 3 – золотистые, 4 – цианобактерии, 5 – криптофитовые, 6 – прочие.

Fig. 6. Characteristic of phytoplankton in the Neva bay in 2011–2016. А – Phytoplankton biomass (mg L^{-1}), В – share of different algal groups in biomass: 1 – Bacillariophyta, 2 – Chlorophyta, 3 – Chrysophyta, 4 – Cyanobacteria, 5 – Cryptophyta, 6 – Others.

ли планктона, так и обрастаний (Никулина и Губелит [Nikulina and Gubelit], 2012). В то же время по мере оседания минеральной взвеси наблюдается стимулирующий эффект для некоторых групп водорослей планктона, за счет биогенных элементов и органических веществ, вымывающихся из взмученного грунта. Отмечено особенно значительное развитие криптофитовых водорослей *Chroomonas acuta* Uterm., *Cryptomonas erosa* Ehr., *Cr.marssonii* Skuja и др.,

Увеличение хозяйственной деятельности, несомненно, ведет к эвтрофированию эстуария реки Невы. Процессы эвтрофирования особенно отчетливо проявляются во внутреннем эстуарии Финского залива. В курортной зоне чаще всего в летний период наблюдается «цветение» воды цианобактериями и массовое развитие в прибрежье нитчатых водорослей *Cladophora glomerata* (L.) Kütz. Эвтрофирование связано не только с высокой нагрузкой биогенными эле-

ментами из-за хозяйственной деятельности, но и с особенностью функционирования эстуарной экосистемы. Показано, что именно внутренний эстуарий наиболее уязвим для процесса эвтрофирования (Голубков и др. [Golubkov et al.], 2008). Кроме того, поступление биогенных элементов с водосбора в разные годы во многом определяется погодными характеристиками. Статистический анализ долгосрочных данных выявил положительную корреляцию между концентрацией фосфора и количеством июльских атмосферных осадков (Голубков и Голубков [Golubkov and Golubkov] 2018).

В соответствии с Рис. 6, где представлена средняя летняя биомасса фитопланктона за 2011–2016 гг. курортный и южный районы по величине биомассы водорослей планктона характеризуются как эвтрофные. В переходной зоне средняя летняя биомасса фитопланктона составляла менее 5 мг л^{-1} , что соответствует мезотрофному уровню. По структурному составу фитопланктона курортный и южный районы значительно отличаются. Относительное значение различных отделов водорослей в общей биомассе фитопланктона в среднем за 2011–2016 гг. приведено на Рис. 6а. Доля диатомовых водорослей увеличивается от курортного района к южному, а доля цианобактерий снижается. Многолетние наблюдения позволили отметить также значительные изменения, произошедшие в комплексе диатомовых водорослей. Исследованиями показано, что доля вида *Skeletonema subsalsum* (A. Cleve) Bethge. в летнем планктонном комплексе курортного района в 80-е годы составляла около 50%, в 90-е сократилась почти до нуля или 5% и, начиная с 2000-х, стала возрастать (Никулина, [Nikulina] 2012). В 2011–2016 гг. этот вид диатомовых водорослей составил менее 30% общей биомассы фитопланктона.

В переходном районе внутреннего эстуария состав фитопланктона был представлен теми же видами, но в значительно меньшем количестве.

Состав фитопланктона в южной части (ст. 26) резко отличался от выше названных районов. В пробах часто отмечалось большое количество неорганической мелкой взвеси, что вызвано проводимыми гидротехническими работами. Значительную долю в общей биомассе составляли солоноватоводные диатомовые водоросли *Skeletonema costatum* (Grev.) Cleve, в

других районах исследованной части эстуария они не встречены.

Таким образом, данные о видовом составе и биомассе фитопланктона в последние годы наблюдений свидетельствуют об эвтрофировании эстуария реки Невы. Курортная зона внутреннего эстуария в летний период 2011–2016 гг., как и южная часть Невской губы, постоянно характеризовались как эвтрофные. Резко возросла биомасса фитопланктона в северной зоне Невской губы в последние три года. Эвтрофирование эстуария реки Невы подтверждается не только возрастанием биомассы фитопланктона, но и высокой нагрузкой биогенными элементами, увеличением первичной продукции планктона и хлорофилла (Golubkov et al., 2016), массовым развитием в прибрежье нитчатых водорослей (Nikulina and Gubelit, 2011).

Изменение функционирования экосистемы часто связывается с изменением видового состава сообществ под воздействием антропогенных и каких-либо других факторов (Vinebrooke et al., 2004; Cardinale et al., 2004). Степень сложности структуры сообщества в гидробиологии часто оценивают информационным индексом Шеннона (H). Индекс учитывает общее количество и степень доминирования отдельных видов. Наши наблюдения в эстуарии реки Невы показали, что индекс разнообразия незначительно изменялся в течение вегетационного сезона. Снижение индекса, как правило, отмечалось на участках акватории в период «цветения» воды, при значительном доминировании двух-трех видов цианобактерий. Слабая обратная зависимость между общей биомассой фитопланктона и индексом разнообразия отмечена только в многолетней динамике в летний период (Никулина [Nikulina], 2011). Зависимость общего числа видов и индекса разнообразия Шеннона в количественных пробах фитопланктона представлена на Рис. 7. Характер этой зависимости вполне согласуется с данными, полученными для других сообществ не сильно эвтрофных и не сильно загрязненных водных экосистем (Алимов и др. [Alimov et al.], 2013). При сопоставлении значения индекса разнообразия и биомассы фитопланктона, так же, как и величины скорости продуцирования органического вещества, четкой закономерности не выявлено.

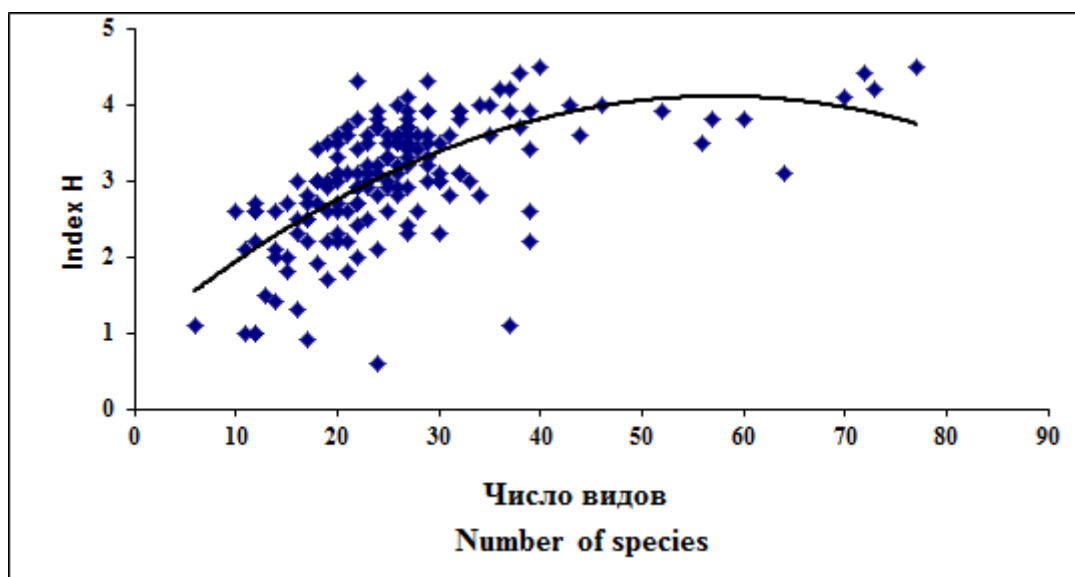


Рис. 7. Соотношение индекса разнообразия (H) и числа видов в количественных пробах фитопланктона.

Fig. 7. The ratio of the diversity index (H) and the number of species in quantitative phytoplankton samples.

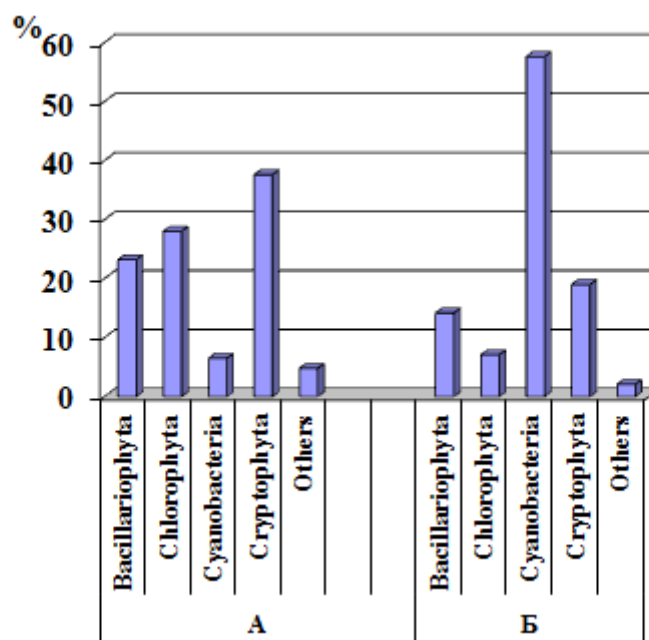


Рис. 8. Соотношение различных отделов водорослей и цианобактерий в биомассе фитопланктона, А – Невская губа, ст. 12, В – Финский залив, ст. 19.

Fig. 8. Relative ratio of different groups of algae and cyanobacteria in phytoplankton biomass, A – in the Neva Bay, St.12, B – in the Gulf of Finland, St. 19.

Таблица 1. Средние функциональные и относительные показатели планктона в наиболее эвтрофируемых участках Невской губы (ст. 12) и внутреннего эстуария Финского залива (ст. 19) и на всей акватории этих районов.

Table 1. Average functional and relative indicators of plankton in the most eutrophied areas of the Neva bay (st. 12), the inner estuary of the Gulf of Finland (st. 19) and in average on these areas.

Показатели Indicators	Невская губа Neva Bay		Внутренний эстуарий Inner estuary	
	ст. 12	Невская губа The Neva Bay	ст. 19	Внутренний эстуарий The inner estuary
Биомасса, мг л ⁻¹ Biomass (B), mg L ⁻¹	7.9 ± 2.7	4.3 ± 1.6	9.1 ± 3	5.9 ± 0.7
Хлорофилл «а», мкг/л ⁻¹ Chlorophyll (Chl), µg L ⁻¹	43.6 ± 13.6	16.3 ± 4.3	25.3 ± 6.5	17.3 ± 1.1
Первичная продукция, г С м ⁻³ Primary production (A), g C м ⁻³	2.06 ± 0.5	0.7 ± 0.16	1.74 ± 0.49	1.01 ± 0.16
Общий фосфор, мкг л ⁻¹ Total Phosphorus, µ L ⁻¹	148.1 ± 37	71 ± 16	61.7 ± 19	54.8 ± 11.8
Хлорофилл/Биомасса (%); Chl/B (%)	0.55 ± 0.07	0.38 ± 0.02	0.39 ± 0.1	0.45 ± 0.07
Биомасса/ВОВ (%); B/SOM (%)	55.2 ± 27	39 ± 5	57.6 ± 11.9	42.5 ± 9
Продукция/Деструкция, сутки A/D, day	1.92 ± 0.38	0.84 ± 0.13	0.84 ± 0.08	0.85 ± 0.19
P/B-коэффициент, сутки; P/B day	2.7 ± 0.7	1.9 ± 0.4	1.4 ± 0.14	1.7 ± 0.6

В Невской губе средние значения скорости фотосинтеза на оптимальной глубине за исследованный период изменялись от 0.34 г С м⁻³ сутки в 2012 году до 1.1 в 2016 г. Наибольшие величины фотосинтеза, так же, как и количество хлорофилла обычно наблюдались в южной части губы. Исключения составили максимальные значения, отмеченные в 2014–2016 по всем показателям – биомасса, хлорофилл, первичная продукция, в районе ст. 12.

Во внутреннем эстуарии в среднем скорость фотосинтеза составила 1 г С м⁻³ сутки, наибольшие значения, около 3 г С м⁻³ отмечались в 2012–2013 гг. в курортной зоне.

В Табл. 1 приведены средние функциональные и относительные показатели планктона в наиболее эвтрофируемых участках Невской губы (ст. 12) и внутреннем эстуарии Финского залива (ст. 19). Сравнение со средними значениями, наблюдавшимися на всей акватории

губы, показывает, что основные характеристики фитопланктона, концентрация хлорофилла и общего фосфора на участке северной зоны Невской губы, практически, в 2–3 раза превышали средние значения по губе. Структурная характеристика фитопланктона свидетельствует, что достаточно высокому уровню трофии этого района соответствует и видовой состав водорослей. При высоком индексе разнообразия Шеннона (-3.8–-4.0) в пробах преобладали зеленые хлорококковые водоросли: различные виды рода *Scenedesmus*, *Actinastrum hantzschii* Lagerh., *Coelastrum microporum* Näg., *Dictyosphaerium pulchellum* Wood и др.; эвгленовые *Trachelomonas planctonica* Swir., *T. volvocina* Ehr. *Euglena acus* Ehr., криптофитовые и динофитовые *Cryptomonas marssonii* Skuja, *Ceratium hirundinella* (O.F.M.) Bergh. – виды, характерные для эвтрофных вод, которые ранее и сейчас преобладают в наиболее продуктивной южной зоне губы.

Относительные характеристики также были выше средних показателей. Соотношение хлорофилла и биомассы зависит от условий среды, видового состава водорослей, от физиологического состояния клеток. По данным И.Л. Пыриной и В.А. Елизаровой [Pyrina и Elizarova] (1971) доля хлорофилла в зеленых водорослях почти в 2 раза выше, чем в диатомовых и цианобактериях. Именно зеленые водоросли преобладали в летний период в районе ст.12. Биомасса водорослей планктона здесь составляла половину концентрации взвешенного органического вещества. Более высокий суточный Р/В коэффициент также характерен для мелких хлорококковых водорослей, преобладавших в исследованном районе. Индекс самоочищения – А/Д значительно превышающий единицу свидетельствует о высокой степени эвтрофирования центральной части северной зоны Невской губы.

На ст. 19 биомасса фитопланктона, концентрация хлорофилла и скорость фотосинтеза превышали средние значения, наблюдавшиеся во внутреннем эстуарии, тогда как относительные показатели мало отличались от тех, которые рассчитаны для остальной акватории. Величины относительных показателей во внутреннем эстуарии вполне подтверждают данные полученные В.В. Бульоном [Boulion] (2017) на основании балансовой модели потока углерода с привлечением большого количества литературы. Тогда как в наиболее эвтрофируемом участке Невской губы, относительные характеристики фитопланктона чаще превышали максимальные величины, наблюдаемые в водных экосистемах, что может свидетельствовать о разбалансированности системы в данном районе.

Как показано выше, в летний период в курортной части эстуария видовой состав водорослей планктона представлен, главным образом, цианобактериями, в Невской губе – хлорококковыми водорослями. Таким образом, структурный состав фитопланктона в эвтрофируемой зоне Невской губы и внутреннего эстуария значительно отличались.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных данных в 2011–2016 гг. выделены наиболее эвтрофируемые участки в Невской губе (ст. 12) и во внутреннем

эстуарии залива (ст. 19). В летний период в этих районах наблюдались более высокие показатели, чем на остальной акватории, биомассы фитопланктона, концентрации хлорофилла, общего фосфора и др. При этом видовой состав водорослей планктона значительно различался. Преобладание разных групп водорослей в основном, определялось гидрологическими условиями. Небольшие глубины, активная ветровая деятельность, отсутствие кислородной и температурной стратификации в Невской губе не позволяли развиваться цианобактериям, способным вызывать «цветение» воды. В этих условиях наибольшую долю в общей биомассе составляли зеленые хлорококковые, криптофитовые, эвгленовые и др. группы водорослей.

В курортной зоне Финского залива в конце июля – начале августа обычно наблюдается прямая температурная стратификация, где, при достаточном количестве биогенных элементов, создаются условия для развития в эпилимнионе планктонных водорослей с преобладанием цианобактерий, способных вызывать «цветение» воды.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность Л.Г. Рюминой за большую помощь в полевых работах по сбору и некоторой обработке материалов. Работа выполнена при поддержке гос. задания № АААА-А19-119020690091-0

ЛИТЕРАТУРА

- Alimov A.F. and Golubkov S.M. (Ed). 2008. Ecosystem of the Neva river estuary: biological diversity and environmental problems. КМК, St. Petersburg, Moscow, 477 p. [In Russian].
- Alimov A.F. and Golubkov S.M. (Ed). 2012. Dynamics of biological diversity and bioresources of continental reservoirs. St. Petersburg, Nauka, 367 p. [In Russian].
- Alimov A.F., Bogatov V.V. and Golubkov S.M., 2013. Production Hydrobiology. St. Petersburg, Nauka, 343 p. [in Russian].
- Boulion V.V. 1994. Patterns of Primary Production in limnic ecosystems, St. Petersburg, Nauka, 222 p. [In Russian].
- Boulion V.V. 2017. Chlorophyll “a” as an indicator of phytoplankton biomass. *Water: chemistry and ecology*, 8: 39–47. [In Russian].

- Cardinale B.J., Ives A.R. and Inchausti P. 2004.** Effects of species diversity on the primary productivity of ecosystems: extending our spatial and temporal scales of inference. *Oikos* **104**: 437–450. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2004.13254.x>
- Golubkov M.S., Golubkov S.M. and Umnova L.P. 2008.** Ecosystem of the Neva Estuary: biological diversity and environmental problems. KMK, St. Petersburg, Moscow: 311–337 [In Russian].
- Golubkov S., Golubkov M., Tiunov A. and Nikulina V. 2017.** Long-term changes in primary production and mineralization organic matter in the Neva Estuary (Baltic Sea). *Journal of Marine Systems*, **171**: 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.12.009>
- Golubkov M.S. and Golubkov S.M. 2018.** The Effect of Weather Conditions on Eutrophication in the Neva River Estuary. *Doklady Biological Sciences*, **480**: 110–113. <https://doi.org/10.1134/S0012496618030122>
- Eriksson B.K. and Johansson G. 2005.** Effects of sedimentation on macroalgae: species-specific responses are related to reproductive traits. *Oecologia*, **143**: 438–448. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1810-1>
- Kitaev S.P. 2007.** Basics of limnology for hydrobiologists and ichthyologists. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center RAS. 395 p. [In Russian].
- Krivopalova Z.F. Tanaeva G.V. 1985.** Temporary guidelines for phytoplankton state prediction in small reservoirs and flowing lakes of the Southern Urals, Chelyabinsk, 29 p. [In Russian].
- Nikulina V.N. 2003.** Seasonal dynamics of phytoplankton in the shallow zone of the eastern part of the Gulf of Finland in the 1980s and 1990s. *Okeanologia*, **45**(1): 25–39. [In Russian].
- Nikulina V.N. 2011.** Indicator value planktonic algae in the Neva River Estuary. Bioindication in monitoring of freshwater ecosystems II. Book of papers of the II International Conference St. Petersburg: 85–90. [In Russian].
- Nikulina V.N. 2012.** Changes in species composition and quantitative development of algal plankton under anthropogenic impact. Dynamics of biological diversity and bioresources of continental reservoirs. St. Petersburg, Nauka: 145–155. [In Russian].
- Nikulina V.N. and Gubelit Y.I. 2011.** Cyanobacteria and macroalgae in ecosystem of the Neva estuary. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems* **402**(06): 1–12. <https://doi.org/10.1051/kmae/2011049>
- Nikulina V.N. and Gubelit Y.I. 2012.** Phytoplankton and phyto-fouling in the eastern part of the Gulf of Finland in the last decade under conditions of anthropogenic impact. In: Environmental safety of coastal regions. Mather. Conf. dedicated to the 150th anniversary of N. Knipovich. Rostov-on-Don, Publishing House of the Russian Academy of Sciences: 170–174. [In Russian].
- Pyrina I.L. and Elizarova V.A. 1971.** Spectrophotometric determination of chlorophyll in cultures of some algae. *Proceedings of the Institute of Biology of Inland Waters of the USSR Academy of Sciences*, **21**: 56–66. [In Russian].
- Shishkin B.A., Nikulina V.N., Maksimov A.A. and Silina N.I. 1989.** The main characteristics of the biota of the top of the Gulf of Finland and its role in the formation of water quality. Leningrad. Gidrometeoizdat 95 p. [In Russian].
- Strickland J.D.H. and Parsons T.R. 1968.** A practical book of seawater analysis. Fisheries Research Board of Canada. Bull. 167. Ottawa. 311 p.
- Winberg G.G. and Gutelmacher B.L. (Ed.). 1987.** The Neva Bay. Hydrobiological research. L. Nauka, 216 p. [In Russian].
- Vinebrooke R.D., Cottingham K.L., Norberg J., Scheffer M., Dodson S.I., Maberly S.C., and Sommer U. 2004.** Impacts of multiple on biodiversity and ecosystem functioning the role of species co-tolerance. *Oikos* **104**: 451–457. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2004.13255.x>

Представлена 26 февраля 2019; принята 10 августа 2019.