

УДК 504:557.2/.4:574.5

**ОЦЕНКА ВНУТРИГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ  
ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЭКОСИСТЕМЫ  
НЕВСКОЙ ГУБЫ ФИНСКОГО ЗАЛИВА  
И ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ НА СКОРОСТИ ПРОЦЕССОВ  
МАССООБМЕНА В ВОДНОЙ ЭКОСИСТЕМЕ****Акулич Э.В., Дмитриев В.В.***Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,  
e-mail: Eduard.akulich@inbox.ru*

Невская губа Финского залива по своим гидрохимическим и гидробиологическим характеристикам, а также по уровню загрязнения вод подразделяется на три района: северный, центральный и южный. Проблемой мониторинга состояния водной экосистемы Невской губы являются ледовые условия, которые препятствуют проведению гидробиологических исследований в акватории. Для решения данной проблемы идеальным инструментом является имитационное моделирование массообменных процессов. Имитационное моделирование также позволяет оценить реакцию водной системы на внутренние и внешние воздействия и спрогнозировать их изменение во времени. Целью данного исследования является оценка скоростей процессов массообмена в водной экосистеме Невской губы с помощью методов имитационного моделирования. Авторами были поставлены задачи исследования: обобщить и оценить влияние физических факторов на скорость первичного биосинтеза планктонных водорослей с помощью моделирования и оценить данные гидробиологических наблюдений на акватории Невской губы в 2022 году. В проведенном исследовании было акцентировано внимание на изменчивость скоростей массообмена в водном фитоценозе под воздействием внешних факторов и внутрисистемных особенностей функционирования водной экосистемы, в которой учитывались только агрегированные фито- (F) и зоопланктон (Z); процессы первичного продуцирования и ассимиляции пищи, выедания фитопланктона зоопланктоном, траты на обмен и естественное отмирание организмов.

**Ключевые слова:** Невская губа, фитопланктон, влияние факторов среды, имитационное моделирование, продукция, скорости массообмена

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-27-10011, и при финансовой поддержке Санкт-Петербургского научного фонда.*

**ASSESSMENT OF THE INTRA-ANNUAL VARIABILITY OF THE MAIN  
COMPONENTS OF THE NEVA BAY ECOSYSTEM OF THE GULF  
OF FINLAND AND THE INFLUENCE OF FACTORS ON THE SPEED  
OF MASS EXCHANGE PROCESSES IN THE WATER ECOSYSTEM****Akulich E.V., Dmitriev V.V.***Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, e-mail: Eduard.akulich@inbox.ru*

The Neva Bay of the Gulf of Finland is divided into three regions, North, Central and South, by its hydrochemical and hydrobiological characteristics and by the level of water pollution. The problem of monitoring the state of the aquatic ecosystem of the Neva Bay are ice conditions that hinder hydrobiological research in the water area. To solve this problem, the ideal tool is simulation of mass exchange processes. Simulation simulations also allow to assess the response of the water system to internal and external effects and to predict their change over time. The aim of this study is to assess the velocities of mass transfer processes in the aquatic ecosystem of the Neva Bay using simulation methods. The authors set the tasks of the study: to generalize and assess the influence of physical factors on the rate of primary biosynthesis of planktonic algae with the help of modelling and to evaluate hydrobiological observations on the Neva Bay in 2022. The study focused on the variability of mass transfer velocities in aquatic phytoecosis under the influence of external factors and intrasystemic features of the aquatic ecosystem functioning, which considered only aggregated phyto-(F) and zooplankton (Z); processes of primary production and assimilation of food, phytoplankton removal by zooplankton, exchanging and natural extinction of organisms.

**Keywords:** Neva Bay, phytoplankton, influence of environmental factors, simulation modeling, primary productivity, mass exchange rates

*The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, grant No. 23-27-10011, and with the financial support of the St. Petersburg Science Foundation.*

Водная экосистема представляет собой сложную многокомпонентную систему, которая включает в себя химические компоненты (азот, фосфор, загрязнители различного вида и состава и др.), биологические компоненты (фито-, зоо-, бактериопланктон и т.д.), физические условия и особенности среды. Все компоненты взаимодействуют друг с другом посредством прямых и обратных и/или множественных связей. Одним из инструментов изучения процессов массообмена в водных экосистемах является имитационное моделирование. Моделирование позволяет выражать процессы в водных экосистемах на основании математических закономерностей между участниками данных процессов. Положительными сторонами имитационных моделей являются возможность более глубоко познать процессы, спрогнозировать реакцию системы на воздействия на уровне отдельных процессов и интегративных свойств экосистемы в целом, провести различные эксперименты без больших временных затрат [1,2].

Целью исследования было провести оценку скоростей процессов массообмена с помощью методов имитационного моделирования в водной экосистеме Невской губы.

Задачами исследования было:

1. Обобщить данные гидробиологических наблюдений на акватории Невской губы в 2022 году;

2. Оценить влияние освещенности, температуры воды, содержания в воде биогенных элементов (минерального фосфора и азота) на скорость первичного биосинтеза планктонных водорослей;

3. Оценить скорости балансового уравнения водного фитоценоза по трем моделям совместного влияния факторов для вегетационного периода развития водной экосистемы;

4. Оценить по результатам моделирования первичную продукцию в различных частях Невской губы.

#### Материалы и методы исследований

В проведенном исследовании для оценки удельных скоростей процессов массообмена использовались 2 первых уравнения баланса скоростей из точечной (пространственно – однородной) модели водной экосистемы [1]:

$$dF / dt = B_F - G_{FZ} - S_F - R_F \pm Q_F,$$

$$dZ / dt = A_Z - S_Z - R_Z \pm Q_Z,$$

где  $B_F$  – скорость валового первичного биосинтеза фитопланктона,  $G_{FZ}$  – скорость выедания фитопланктона зоопланктоном,  $S_F$ ,  $S_Z$  – скорости естественной смертности

фитопланктона и зоопланктона,  $R_F$ ,  $R_Z$  – скорости трат на обмен фито- и зоопланктона,  $A_Z$  – скорость ассимиляции пищи зоопланктоном,  $Q_F$ ,  $Q_Z$  – скорости внешнего поступления вещества в систему. Все скорости в выполненных расчетах имеют размерность  $\text{мг сух. веса} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ . Важнейшим компонентом имитационной модели является первое слагаемое в первом уравнении  $B_F$  – скорость первичного валового биосинтеза фитопланктона, эта составляющая баланса скоростей описывает преобразование вещества и энергии (минеральное питание, свет, температура) в живое вещество, синтезируемое водорослями, поэтому выбор и обоснование моделей учета влияния факторов, правильность их расчёта определяют адекватное изменение  $F$  в водоеме и успешность модели в целом.

Скорость валового первичного биосинтеза в модели определяется как:

$$B_F = (\mu_F + r_F) F,$$

где  $\mu_F$  – интенсивность чистого первичного биосинтеза фитопланктона,  $r_F$  – интенсивность трат на обмен,  $F$  – биомасса фитопланктона.

Интенсивность чистого первичного биосинтеза  $\mu_F$ , является основополагающим параметром системы балансовых уравнений, т.к. она является основой для вычисления первичного биосинтеза, трат на обмен фитопланктона и чистой продукции. В данной работе она может рассчитываться на основе трех моделей:

1. Модель Либиха. Концепция лимитирующего фактора.

$$\mu_F = f(T) \min \{ f(I), f(N), f(P), \dots \}$$

«Л-модель»

2. Модель Митчерлиха. Многофакторная зависимость.

$$\mu_F = f(T) * f(I) * f(N), f(P) * \dots$$

«М-модель»

3. Модель Митчерлиха-Либиха.

$$\mu_F = f(T) * f(I) \min \{ f(N), f(P), \dots \}$$

«МЛ-модель»

где  $f(T)$  – зависимость удельной скорости роста от температуры (максимальная удельная скорость роста), рассчитывается по формуле Lehman et al [3],  $f(I)$  – влияние освещенности на удельную скорость роста фитопланктона, её рассчитывали по формуле Райтера и Дж. Стила;  $f(N)$ ,  $f(P)$  – влияние биогенов на удельную скорость роста, расчёт выполнен по формуле Михаэлиса – Ментен – Моно. В проведенном ис-

следования использовались все три модели и сравнивались полученные результаты с данными наблюдений.

Для оценки изменчивости основных компонентов водного фитоценоза были использованы данные ФГБУ “Северо-Западное УГМС”, полученные при натурных исследованиях на станциях в Невской губе (НГ) в 2022 году. Наблюдения проводились неравномерно по времени, так для химических и гидрофизических параметров наблюдения выполнялись на протяжении всего года раз в месяц, а данные по численности и биомассе фитопланктона и зоопланктона исследовались лишь в мае, августе и октябре. В ходе исследований [4,5], было показано, что Невская губа по гидробиологическим и гидрохимическим показателям разделяется на три части, северную и южную, где происходит контакт воды с берегом и транзитную (центральную) со свободным водообменом. Это обуславливает внутригодовое изменение гидрохимических компонентов в эстуарии р. Невы и определяет загрязнение водного объекта в целом.

#### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1а приведен внутригодовой ход температуры воды в поверхностном слое

воды в водоеме. В июле – августе температура превышала 20°C, что является аномальным для Невской губы. Так в 2018-20 года температура воды в поверхностном слое не превышала 20°C, а в 2022 максимальная температура воды достигла 25°C, что оказывало угнетающее воздействие на фитопланктон, так как каждый вид фитопланктона имеет свой интервал толерантности с оптимальной температурой воды. При превышении оптимальной температуры воды и при стремлении к границам интервала рост фитопланктона будет угнетаться.

На рис.1б приведено изменение биомассы фитопланктона в вегетационный период. Для возможности сравнения биомасс фитопланктона проводимыми другими авторами в своих исследованиях, на рис.1б и 1в биомассы приведены в мг сыр.веса/л. Интересно отметить, что в майскую вспышку максимум биомассы наблюдался в центральной части Невской губы – 2,6 мг сыр. веса/л, довольно близко и северная часть – 2,3 мг сыр. веса/л, а на юге всего 1,6 мг сыр. веса/л. В октябре ситуация диаметрально, максимум приходится на южную часть – 1,13 мг сыр. веса/л, а биомассы центрального и северного районов совпадают. В работах [4,5] авторами приведены схожие показатели биомассы фитопланктона в целом для весны.

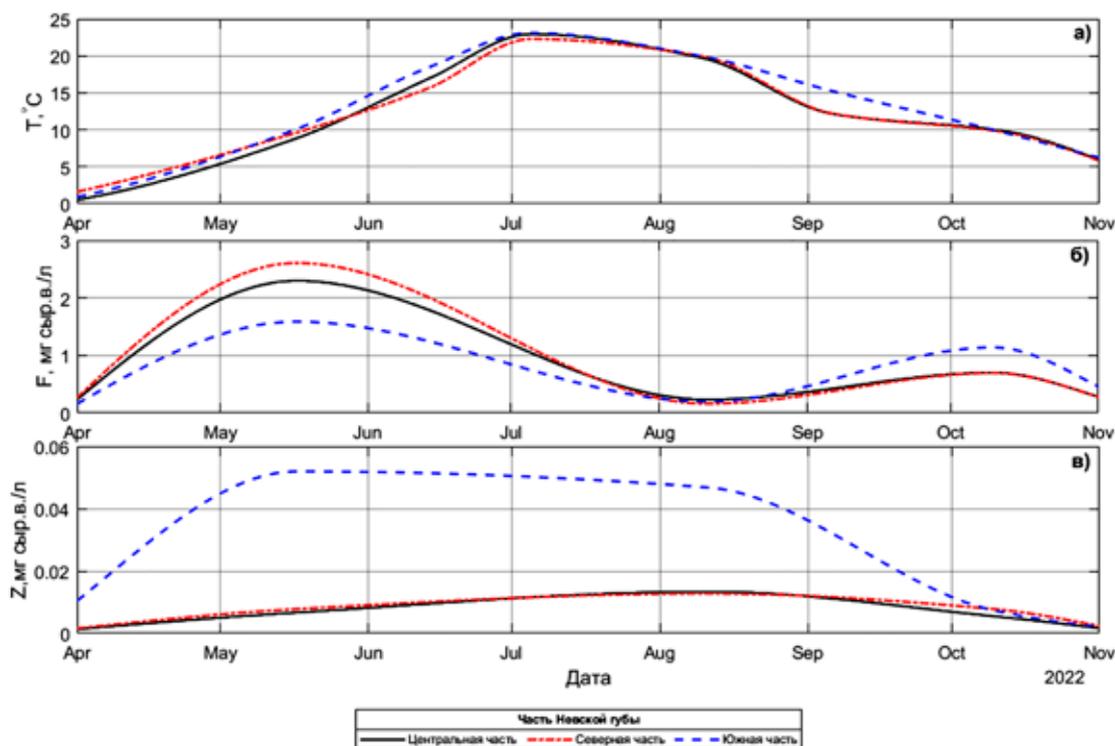


Рис. 1. Годовой ход температуры воды (а), биомассы фитопланктона (б) и зоопланктона (в) для районов Невской губы в 2022 году

Биомасса зоопланктона (рис.1в) в южной части Невской губы сильно превышала аналогичные показатели для центральной и северных частей: 0,05 – 0,04 мг сыр. веса/л в летний сезон против 0,006-0,013 мг сыр. веса/л в северной и центральных частях. Интересно отметить, что максимум биомассы зоопланктона для южной части наступает в мае, а в центральной и северных частях в августе. В дальнейшем, для моделирования всех процессов массообмена и имитации поведения системы в целом, мы перейдем в расчетах от биомассы в сыром весе к биомассе в сухом весе.

Максимальные показатели  $\mu$  (рис. 2) характерны для северной части, так по М-модели в пик весеннего развития фитопланктона  $\mu$  имеет значение 0,27 сут<sup>-1</sup>, а для L-модели – 0,72 сут<sup>-1</sup>.

Во всех районах Невской губы лимитирующим фактором выступает концентрация минерального фосфора, её недостаток уменьшает  $\mu$  в 11 раз весной и в 2 раза летом, особенно сильно недостаток фосфатов сказывается именно в центральной и южных частях, недостаток освещенности уменьшает  $\mu$  в 2 раза весной (эффект самозатенения), а летом из-за повышения мутности, начинает быстро расти, достигая осенью уменьшения  $\mu$  в 60 раз. Нехватки азота в Невской губе не наблюдается, и сильного влияния на  $\mu$  он не оказывает.

Максимум  $\mu$  в разных районах не достигается в одно время (рис. 2), так в северной

и южных частях губы весенний пик приходится на начало июня, а в центральной части уже после середины июля, осенью пик в центральной и северных частях НГ приходится на середину августа, а на юге, ближе к сентябрю. Траты на обмен фитопланктона (единый дыхательно-выделительный процесс) в процентном соотношении от  $\mu$  составили 20% летом и 60% осенью для всей Невской губы.

Скорость первичной биосинтеза по М-модели составила соответственно: для весеннего пика – северная часть НГ – 0,08 мг сух. веса/л\*сут, центральная и южная части НГ – около 0,02 мг сух. веса/л, осенью максимумов скорости первичной биосинтеза не наблюдалось, что связано с высокими тратами на обмен фитопланктона. По L – модели весенний пик для севера НГ составил 0,25 мг сух. веса/л, для южной и центральных частей – 0,12 мг сух. веса/л, зато для данной модели был выраженный весенний пик он составил 0,01 мг сух. веса/л для центральной части НГ и 0,03 мг сух. веса/л для южной части НГ. Скорость трат на обмен имела два выраженных пика для южной части НГ, в остальных наблюдался только выраженный весенний пик, показатели для М – модели составили от 0,003 до 0,015 мг сух. веса/л в весенний пик. Для L – модели траты на обмен составили: осенний пик – 0,02-0,045 мг сух. веса/л, осенний пик в южной части НГ – 0,008 мг сух. веса/л.

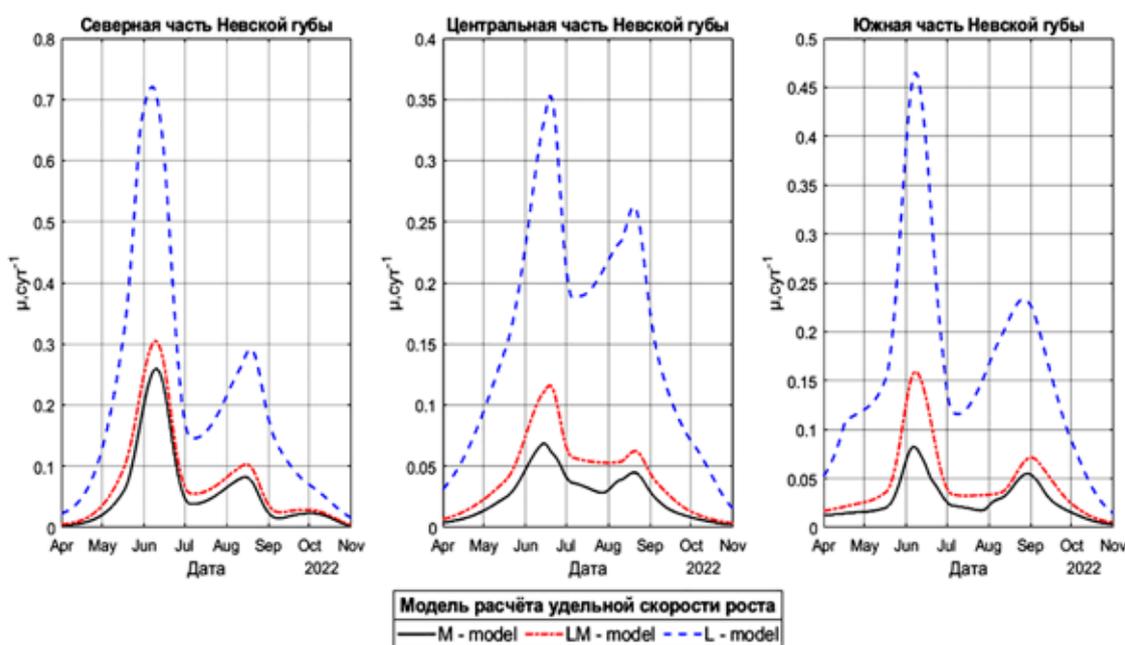


Рис. 2. Удельная скорость роста, рассчитанная по 3-м моделям для каждой части Невской губы

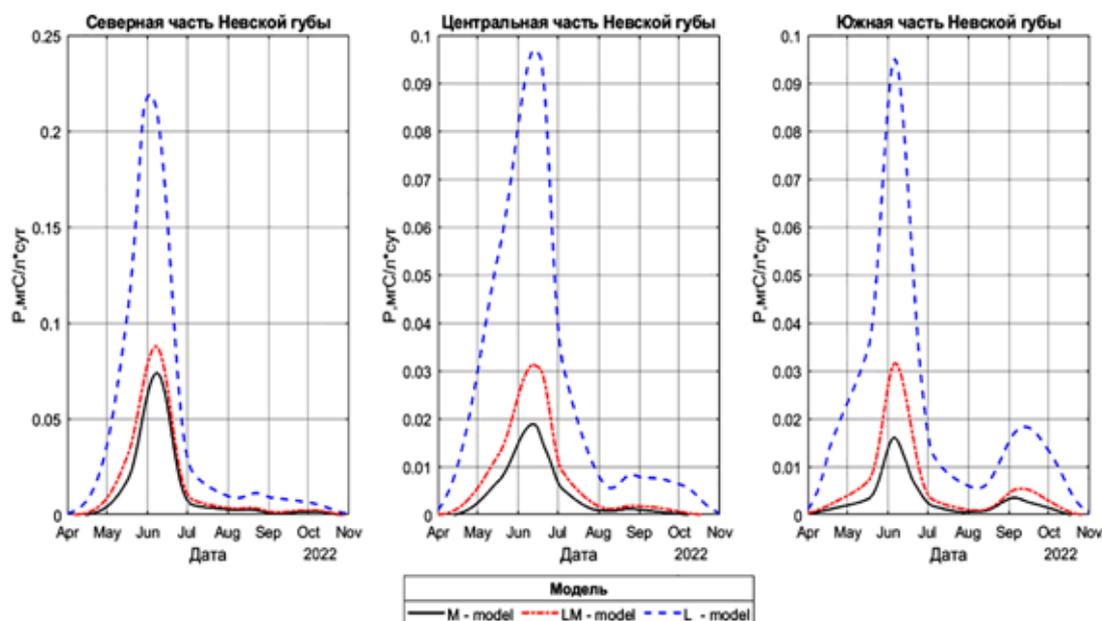


Рис. 3. Продукция фитопланктона, рассчитанная по трем моделям для Невской губы за период апрель – ноябрь 2022 года

Продукция фитопланктона (рис. 3) в 2022 году оказалась невысокой. По М-модели суточная продукция составила 0,015 – 0,019 – 0,075 мг сух. веса/л. для южной, центральной и северных частей НГ соответственно. Значимого пика, кроме южной части НГ, осенью не отмечается, на юге продукция осенью составила 0,004 мг сух. веса/л. Совсем иная картина для L – модели, так в южной и центральных частях НГ продукция в весенний пик цветения составляет около 0,1 мг сух. веса/л., а в северной части – 0,22 мг сух. веса/л., также осенью в центральной части продукция фитопланктона составляет 0,01 мг сух. веса/л., а в южной – около 0,02 мг сух. веса/л.

Интересно отметить, что по показателям продукции фитопланктона по М и LM моделям, южная и центральные части Невской губы, а также северная часть, за исключением короткого пика цветения, по всему периоду вегетации принадлежат к олиготрофному типу вод. Однако, если рассчитывать продукцию по L – модели, то в момент весеннего цветения воды трофический статус во всех 3-х районах будет соответствовать мезотрофному типу, а вне диапазона цветения – олиготрофному типу. Это также подтверждает, что L – модель дает более адекватные результаты по продуктивности водной экосистемы.

## Заключение

В Невской губе биомассы фито- и зоопланктона, довольно низкие. Во время весеннего цветения максимум биомассы приходится на центральную часть НГ, минимум на южную часть. В осеннем пике цветения максимум достигается в южной части НГ. Биомасса зоопланктона южной части максимальна при весеннем пике и остается достаточно высокой до сентября, в центральной и северных областях биомасса очень низкая и максимума достигает только весной.

Исследование влияния температуры, освещенности и биогенных элементов на скорость первичного биосинтеза показало, что в весенне-летний период лимитирующим фактором для всех частей Невской губы является наличие фосфатов, а осенью, из-за повышения мутности воды – является освещенность. Показано, что максимальные значения удельной скорости первичного биосинтеза для трёх частей НГ достигаются не одновременно.

Проведенная оценка основных составляющих уравнения баланса скоростей водного фитоценоза показала, что скорости трат на обмен и первичного биосинтеза имеют выраженные максимумы для весеннего периода цветения, и для осеннего цветения выраженные пики есть только в южной части НГ.

По уравнению баланса скоростей была рассчитана продукция, где максимум продукции был получен по L – модели для весеннего цветения фитопланктона и составляет 0,22 мг сух. веса/л. По M – модели максимальная продукция была 0,075 мг сух. веса/л. В весенний пик более интенсивные массообменные процессы происходили в северной части НГ, в осенний пик – в южной части НГ.

#### Список литературы

1. Седова С.А., Дмитриев В.В. Использование композитных индексов для исследования адекватности моделей водной экосистемы и оценки воздействия на них // Европейский журнал естественной истории. 2020. № 5. С. 12-19.
2. А.В. Рахуба. Имитационное моделирование роста биомассы фитопланктона в Куйбышевском водохранилище // Водное хозяйство России. 2018. № 1. С. 76-87.
3. Lehman T.T., Botkin D.B., Likens G.E. The assumption and rationales of a computer model of phytoplankton dynamics // Limnol. and Oceanogr. 1975. Vol. 20. № 3.
4. Никулина В.Н. Фитопланктон как показатель экологического состояния эстуария реки Невы, 2011–2015 // Сибирский экологический журнал. 2019. № 3. С. 341–347. DOI: 10.15372/SEJ20190310.
5. Никулина В.Н., Голубков М.С. Структура и функционирование фитопланктона в эстуарии реки Невы в 2011–2016 гг. // Труды Зоологического института РАН. Том 324. 2020. № 1. С. 162–174. DOI: 0.31610/trudyzin/2020.324.1.162.