



DOI [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(4\)-7](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(4)-7)

EDN <https://elibrary.ru/mfyufy>

УДК 551.465

© А. В. Исаев*, В. А. Рябченко, 2025

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36

*isaev1975@gmail.com

Модельные оценки вкладов изменений климата и биогенной нагрузки в изменения экосистемы Ладожского озера в 1980–2020 гг.¹

Статья поступила в редакцию 06.09.2025, после доработки 12.11.2025, принята в печать 17.11.2025

Аннотация

Получены количественные оценки реакции экосистемы Ладожского озера на изменения климатических атмосферных воздействий и внешней биогенной нагрузки в период 1980–2020 гг. Для их получения использована трехмерная модель гидротермодинамики MITgcm, объединенная с биогеохимическим модулем SPBEM, адаптированным для фосфоро-лимитированных условий озера.

Численные эксперименты проведены по трем следующим сценариям: 1) опорному с заданием реалистичных изменений внешней биогенной нагрузки и атмосферных воздействий в 1980–2020 гг.; 2) с заданием реалистичных изменений внешней биогенной нагрузки и «среднего» внутригодового хода атмосферных воздействий для этого периода; 3) с заданием реалистичных изменений атмосферных воздействий и постоянной внешней биогенной нагрузки, равной среднему за рассматриваемый период значению.

Результаты работы демонстрируют выраженное доминирование внешней биогенной нагрузки как основного фактора, определяющего динамику характеристик экосистемы озера в 1980–2020 гг. Вклад изменений климата в высоко детерминированные линейные тренды изменения зимней концентрации фосфатов, летней биомассы фитопланктона и годовой продукции фитопланктона в фотическом слое составил всего лишь соответственно 24 %, 10 % и 21 %. Согласно результатам расчётов, происходит заметное уменьшение указанных характеристик экосистемы озера во второй половине рассматриваемого периода 1980–2020 гг. При этом для продукции фитопланктона отмечается заметное (более 20 %) компенсирующее влияние климатических изменений, нивелирующее часть эффекта от снижения биогенной нагрузки.

Показано, что недиаомовые водоросли, вносящие основной вклад (63 %) в суммарную продукцию фитопланктона, сильно реагируют на климатические изменения температуры воды в рассматриваемый период. Диаомовые водоросли демонстрируют меньшую зависимость от климатических изменений, сохраняя тесную связь с зимними запасами фосфатов.

Ключевые слова: озерная экосистема, климат, внешняя биогенная нагрузка, математическое моделирование, Ладожское озеро

© А. В. Исаев*, В. А. Рябченко, 2025

Shirshov Institute of Oceanology RAS, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia

*isaev1975@gmail.com

Model estimates of the contributions of interannual changes of climate and nutrient load to changes in the Lake Ladoga ecosystem in 1980–2020¹

Received 06.09.2025, Revised 12.11.2025, Accepted 17.11.2025

Abstract

Quantitative estimates of the Lake Ladoga ecosystem response to changes in climatic atmospheric forcing and external nutrient loads were obtained for the period 1980–2020. The estimates were obtained using the MITgcm three-dimensional hydrothermodynamic model combined with the SPBEM biogeochemical module adapted to the phosphorus-limited conditions of the lake.

¹ Перевод статьи на английский язык представлен в электронном формате этого выпуска на сайте журнала
The English translation of the article is available in the electronic format of this issue on the journal's website

Ссылка для цитирования: Исаев А.В., Рябченко В.А. Модельные оценки вкладов изменений климата и биогенной нагрузки в изменения экосистемы Ладожского озера в 1980–2020 гг. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18, № 4. С. 94–104. EDN MFYUFY. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(4\)-7](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(4)-7)

For citation: Isaev A.V., Ryabchenko V.A. Model estimates of the contributions of interannual changes of climate and nutrient load to changes in the Lake Ladoga ecosystem in 1980–2020. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(4):94–104. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(4\)-7](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(4)-7)

Numerical experiments were conducted using the following three scenarios: 1) a reference scenario with realistic changes in the external nutrient load and atmospheric forcing for 1980–2020, 2) with realistic changes in the external nutrient load and the “average” intra-annual course of atmospheric forcing for this period, and 3) with realistic changes in atmospheric forcing and a constant external nutrient load equal to the average value for the period under consideration.

The results of the study demonstrate a pronounced dominance of the external nutrient load as the main factor determining the dynamics of the lake ecosystem characteristics in 1980–2020. The contribution of climate change to the highly deterministic linear trends of the change in winter phosphate concentrations, summer phytoplankton biomass, and annual phytoplankton production in the photic layer amounted to only 24 %, 10 %, and 21 %, respectively. According to the calculation results, there is a noticeable decrease in these characteristics of the lake ecosystem in the second half of the considered period 1980–2020. At the same time, a noticeable (more than 20 %) compensating effect of climate change is noted for phytoplankton production, leveling out part of the effect of the decrease in nutrient load.

It is shown that non-diatoms, which make the main contribution (63 %) to the total phytoplankton production, strongly respond to climatic changes in water temperature in the considered period. Diatoms show less dependence on climate change, maintaining a close relationship with winter phosphate reserves.

Keywords: lake ecosystem, climate, external nutrient load, mathematical modeling, Lake Ladoga

1. Введение

Ладожское озеро, являясь крупнейшим озером Европы, занимает особое место среди великих озер мира не только благодаря своим размерам, но и в силу своего уникального северного положения, располагаясь между 59°54' и 61°47' с. ш. Этот огромный природный водоем и его обширный водосборный бассейн играют критически важную хозяйственную и экологическую роль в жизнеобеспечении Северо-Западного региона России [1–3]. Значение Ладоги многогранно: оно служит ключевым источником питьевого и промышленного водоснабжения многомиллионного Санкт-Петербурга, Ленинградской области и Республики Карелия, выступает важнейшим звеном Волго-Балтийского водного пути, обеспечивающим транспортную связность, а также обладает колоссальным туристско-рекреационным и рыбохозяйственным потенциалом.

Экосистема Ладожского озера классифицируется как фосфоро-лимитированная [1], что означает, что доступность фосфора является основным фактором, лимитирующим продуктивность озера. В связи с этим, центральное место в исследовании его многолетней изменчивости закономерно принадлежит анализу цикла фосфора. Анализ межгодовой динамики внешней фосфорной нагрузки за период с 1980 по 2020 гг. (рис. 1, а) выявляет три четко выраженных периода. Первый период (1980–1992 гг.) характеризуется экстремально высоким уровнем антропогенного поступления фосфора со средним значением около 5900 т в год. Затем следует короткий, но крайне значимый второй период (1993–1995 гг.), в течение которого произошло резкое, обвальное снижение нагрузки. Наконец, третий период (1995–2020 гг.) отмечается стабилизацией нагрузки на значительно более низком уровне со среднегодовым значением около 3400 т [3].

Оценки состояния экосистемы озера, основанные на данных натурных наблюдений, демонстрируют, что, несмотря на почти двукратное снижение внешней фосфорной нагрузки после 1991 г., ожидаемого пропорционального уменьшения биомассы и первичной продукции фитопланктона не происходит [4, 5]. Существующие гипотезы, объясняющие эту слабую реакцию экосистемы, связывают её с компенсирующим влиянием климатических изменений. В частности, предполагается, что эффект повышения температуры воды, обусловленного глобальным потеплением, нивелирует, хотя бы частично, эффект от сокращения нагрузки. Данный механизм реализуется, с одной стороны, за счёт увеличения продолжительности вегетационного сезона, а с другой — благодаря интенсификации внутренних процессов, таких как скорость метаболизма и оборота (рециклинга) органического вещества. Тем не менее, достоверно подтвердить или опровергнуть эти предположения исключительно на основе натурных данных затруднительно из-за недостаточного пространственно-временного охвата акватории озера при его мониторинге [3].

Таким образом, возникает очевидная потребность в привлечении методов математического моделирования для того, чтобы оценить реакцию экосистемы на изменения различных внешних воздействий. Целью настоящей работы является количественная оценка реакции ключевых компонентов экосистемы Ладожского озера (биомасса и первичная продукция фитопланктона, концентрация биогенных элементов) в период 1980–2020 гг. на сценарии внешнего воздействия, исключаящие последовательно межгодовую изменчивость атмосферных воздействий и внешней фосфорной нагрузки.

2. Материалы и методы

2.1. Модель

Исследование реакции экосистемы Ладожского озера при различных сценариях внешних условий проводилось с использованием трехмерной математической модели гидротермодинамики, объединенной с моделью биогеохимических циклов. Основой для воспроизведения гидротермодинамики озера и решения уравнений адвекции-диффузии примеси послужила модель Массачусетского технологического института MITgcm [6, 7]. Моделирование биогеохимических процессов осуществлялось на основе модели SPBEM, адаптированной для условий Ладожского озера с использованием данных натурных наблюдений (как контактных, так и дистанционных) [8]. Подробное описание конфигурации модели, ее адаптации для исследуемого водоема и процедуры верификации представлено в работах [8–10]. Биогеохимический модуль используемой модели описывает взаимодействие круговоротов азота и фосфора в водной толще и донных отложениях озера. В пелагической подсистеме учитываются биомассы зоопланктона и двух функциональных групп фитопланктона (диатомовые и недиадомовые), детритный азот и фосфор, растворенные органические соединения азота и фосфора различной степени лабильности, неорганические формы азота (аммоний, нитриты и нитраты), фосфаты, а также растворенный кислород как индикатор баланса продукционно-деструкционных процессов. Подсистема донных отложений описывает динамику бентических форм азота и фосфора.

Биогеохимические взаимодействия включают комплекс ключевых процессов: первичную продукцию фитопланктона, его потребление зоопланктоном, процессы отмирания организмов с образованием детрита, регенерацию минеральных соединений через экскрецию и минерализацию органического вещества, процессы минерализации донных отложений с выделением биогенных элементов в водную толщу, а также денитрификацию в водной среде и донных отложениях. Детальное описание уравнений, параметров и коэффициентов биогеохимического модуля представлено в работах [9, 10], а особенности его адаптации для пресноводных фосфор-лимитированных экосистем — в исследованиях [8, 11].

Граничные условия модели включали поля атмосферного воздействия и данные о речном стоке для гидротермодинамического модуля, а также параметры поступления биогенных элементов из атмосферы и с водосборного бассейна для биогеохимического модуля. Атмосферные воздействия задавались на основе данных реанализа ERA-5 [12], содержащих ежеhourные значения атмосферного давления, компонентов скорости ветра, температуры и влажности воздуха, количества осадков, а также потоков коротковолнового и длинноволнового излучения. Внешняя биогенная нагрузка формируется за счет речного стока, атмосферных выпадений, точечных источников загрязнения и диффузного стока, включающего поступление биогенных элементов с дождевыми и тальными водами, поступающими непосредственно в водоем. Динамика внешней биогенной нагрузки в межгодовом аспекте, использованная в настоящем исследовании, подробно рассмотрена в [1, 8].

2.2. Сценарии

Для исследования влияния межгодовой изменчивости на характеристики экосистемы были выполнены расчеты по трем сценариям.

Опорный сценарий (1) учитывает естественную межгодовую изменчивость, как атмосферного воздействия, так и внешней биогенной нагрузки. В рамках данного сценария использовались данные реанализа ERA-5 [12] за период 1980–2020 гг. о полях атмосферного воздействия и данные о межгодовых колебаниях внешней биогенной нагрузки за тот же период из [1, 8].

Второй сценарий (2) предназначен для анализа реакции экосистемы на межгодовые колебания внешней биогенной нагрузки. При его реализации применялись фактические данные о нагрузке за период 1980–2020 гг., в то время как атмосферное воздействие задавалось по параметрам «среднего» года, в течение которого внутригодовые изменения метеорологических характеристик были наиболее близки к их среднемноголетним средним.

Третий сценарий направлен на оценку влияния климатических изменений на озерную экосистему. При этом атмосферное воздействие было таким же, как и в опорном сценарии, а внешняя биогенная нагрузка задавалась постоянной, равной среднему значению за период с 1980 по 2020 гг.

В опорном сценарии задание начальных условий расчёта на 40 лет производилось на основе предварительного интегрирования системы модельных уравнений до достижения квазиравновесного состояния, которое было получено при повторяющихся атмосферном воздействии и внешней биогенной нагрузке,

соответствующих 1979 г. В сценарии 2 аналогичное квазиравновесное состояние было получено при «среднем» атмосферном воздействии и внешней биогенной нагрузке 1979 г., в сценарии 3 — при повторяющемся атмосферном воздействии 1979 г. и средней (за период с 1980 по 2020 гг.) внешней биогенной нагрузке. Как показано ниже, использованная процедура задания начальных условий привела к тому, что средняя по периоду температура воды в сценарии 2 оказалась несколько завышенной (по сравнению со сценарием 1). В сценарии 3 начальная фосфорная нагрузка была ниже на 30 % по сравнению со сценарием 1.

2.3. Выбор «среднего» года

Для выбора года, наиболее репрезентативного с климатической точки зрения, был применен метод многокритериального анализа временных рядов. Его целью являлось выявление года с поведением метеорологических характеристик, наиболее близким к многолетней климатической норме.

Исходные данные включали ежедневные значения температуры воздуха, атмосферного давления, скорости ветра и интенсивности солнечной радиации за период с 1980 по 2020 г. Для количественной оценки отклонений метеорологических параметров каждого года от нормы использовался набор метрик: среднеквадратическая ошибка, коэффициент корреляции Пирсона и среднее абсолютное отклонение. Для учёта временных сдвигов и сезонных особенностей в анализ был дополнительно включен метод динамического временного выравнивания.

На заключительном этапе рассчитывалась интегральная оценка для каждого года как взвешенная сумма всех нормированных метрик. Данный подход позволил объективно ранжировать годы и идентифицировать наиболее типичный.

В результате в качестве наиболее репрезентативного был определён 2004 г., чьи метеорологические показатели показали наименьшее интегральное отклонение от климатической нормы.

3. Результаты и обсуждение

Основными характеристиками экосистемы, определяющими трофический статус водоема, являются *биомасса фитопланктона* и *первичная продукция*, поскольку именно эти параметры непосредственно отражают уровень продуктивности водной системы и круговорот органического вещества в трофической цепи. Лимитирующим биогеном в экосистеме Ладожского озера является фосфор, что подтверждается многочисленными исследованиями [1, 3], демонстрирующими, что *концентрация фосфатов* определяет интенсивность развития фитопланктона и степень эвтрофикации. Среди физических факторов первостепенное значение играет *температура воды*, контролирующая продукционно-деструктивные процессы преобразования органического вещества. Поэтому при анализе полученных результатов будем рассматривать перечисленные факторы, дополненные обменными потоками фосфора (рециклинг, выход фосфора из донных отложений)

3.1. Оценка изменчивости характеристик экосистемы за счёт межгодовой изменчивости отдельно атмосферных воздействий и внешней биогенной нагрузки

На рис. 1 представлена межгодовая динамика внешней фосфорной нагрузки, осреднённой за вегетативный период (май—октябрь) температуры, осредненных за март-апрель фосфатов, средней за вегетативный период биомассы фитопланктона в фотическом слое и годовой первичной продукции для трех указанных выше сценариев. В первых двух сценариях происходит снижение всех исследуемых характеристик экосистемы в ответ на снижение внешней биогенной нагрузки. Отметим временной лаг в 4–5 лет между началом снижения поступления фосфора из внешних источников и началом снижения биогеохимических характеристик. Это объясняется временем оборота фосфора в озере, которое составляет 5,4 г. [13].

Отличительной особенностью сценария 2 (по сравнению со сценарием 1) является более интенсивное снижение годовой первичной продукции: её линейный тренд на 17,2 % больше, чем в сценарии 1 (табл. 1). Это объясняется тем, что в этом случае рост первичной продукции, вызванный климатическим потеплением, отсутствует. Более интенсивное уменьшение первичной продукции вместе с отсутствием усиления рециклинга способствовало росту зимних фосфатов в фотическом слое и уменьшению модуля тренда этой характеристики на 24 % (табл. 1). Модуль тренда биомассы фитопланктона в фотическом слое в вегетативный период также стал меньше, но всего лишь на 9,5 % из-за противоположных эффектов отсутствия роста первичной продукции (падение биомассы) и отсутствия усиления рециклинга (рост биомассы) за счёт роста температуры.

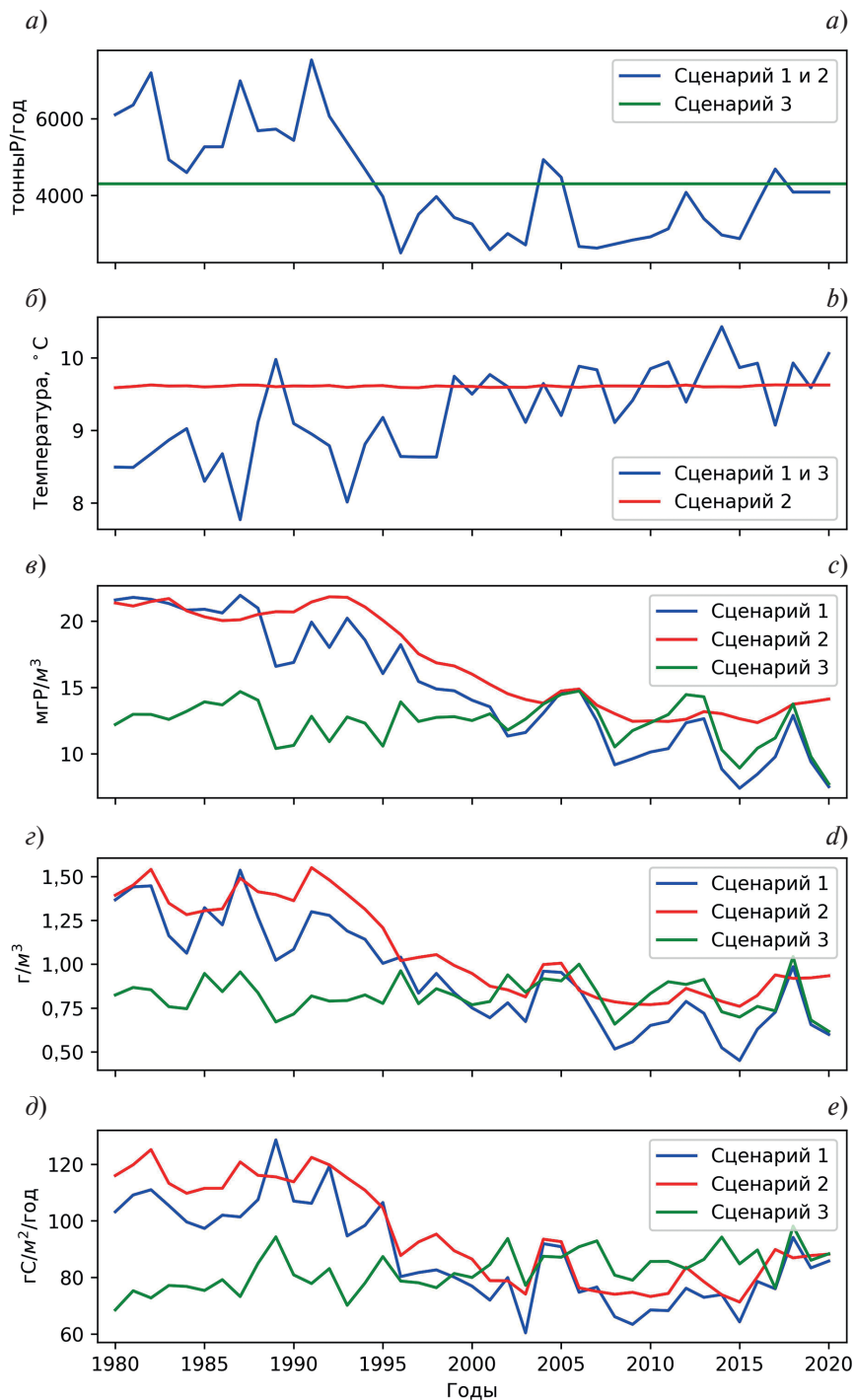


Рис. 1. Межгодовая изменчивость годовой внешней фосфорной нагрузки (а), осреднённой за вегетативный период (май–октябрь) температуры в фотическом слое (б), осредненных за март–апрель фосфатов в фотическом слое (в), средней за вегетативный период (май–октябрь) биомассы фитопланктона (г) и годовой первичной продукции (д) в сценариях 1, 2, 3

Fig. 1. Interannual variability of the annual external phosphorus load (a), averaged over the growing season (May–October) temperature in the photic layer (b), averaged over March–April phosphates in the photic layer (c), average over the growing season (May–October) phytoplankton biomass (d) and annual primary production (d) in scenarios 1, 2, 3

Другая отличительная особенность сценария 2 — более гладкие кривые межгодовой изменчивости исследуемых характеристик по сравнению со сценарием 1, что свидетельствует о значительном вкладе межгодовых изменений атмосферных воздействий в изменчивость характеристик экосистемы. Однако среднеквадратиче-

ское отклонение (табл. 2), рассчитанное по исходным данным сценариев 1 и 2, не показывает уменьшения интенсивности изменчивости для всех характеристик экосистемы в сценарии 2. Это связано с существенным влиянием линейного тренда на стандартное отклонение. При оценке стандартного отклонения по временным рядам, из которых исключён линейный тренд, снижение интенсивности межгодовой изменчивости в сценарии 2 становится очевидным. Так, для зимних запасов фосфатов значение стандартного отклонения в сценарии 1 составляет 1,65 мг/м³, а в сценарии 2—1,43 мг/м³. Для биомассы фитопланктона стандартное отклонение уменьшается с 1,52 до 1,35 г/м³, а для первичной продукции фитопланктона — с 11,58 до 9,77 гС/м²/год.

Таблица 1

Table 1

Уравнения линейной регрессии с коэффициентами детерминации (R^2) для основных характеристик экосистемы при различных сценариях

Linear regression equations with determination coefficients (R^2) for main ecosystem characteristics under different scenarios

	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3
Внешняя фосфорная нагрузка, тоннР/год	$-76,207t + 156684$ ($R^2 = 0,429$) (p-value = 0,000)	$-76,207t + 156684$ ($R^2 = 0,429$) (p-value = 0,000)	4270*
Температура (°C) фотического слоя в вегетативный период (май-октябрь)	$0,037t - 64$ ($R^2 = 0,515$) (p-value = 0,000)	9,6*	$0,037t - 64$ ($R^2 = 0,515$) (p-value = 0,000)
Концентрация фосфатов (мг/м ³) в фотическом слое в период максимального зимнего накопления	$-0,363t + 741$ ($R^2 = 0,874$) (p-value = 0,000)	$-0,276t + 569$ ($R^2 = 0,842$) (p-value = 0,000)	$-0,045t + 102$ ($R^2 = 0,109$) (p-value = 0,035)
Биомасса (г/м ³) фитопланктона в фотическом слое в вегетативный период (май-октябрь)	$-0,021t + 42$ ($R^2 = 0,731$) (p-value = 0,000)	$-0,019t + 39$ ($R^2 = 0,743$) (p-value = 0,000)	$-0,001t + 2,7$ ($R^2 = 0,015$) (p-value = 0,448)
Годовая первичная продукция фитопланктона (гС/м ² /год)	$-1,022t + 2131$ ($R^2 = 0,527$) (p-value = 0,000)	$-1,235t + 2565$ ($R^2 = 0,696$) (p-value = 0,000)	$0,349t - 615$ ($R^2 = 0,356$) (p-value = 0,000)

Примечания: * — средние значения за период 1980—2020 гг. В уравнениях регрессии для межгодовой изменчивости характеристик переменная “t” обозначает годы.

Notes: 1) * — Average values for the period 1980—2020 are given; 2) in the regression equations for interannual variability of characteristics, the variable “t” denotes years.

Таблица 2

Table 2

Основные характеристики экосистемы, осредненные за период 1980—2020 годы, и стандартное отклонение (указано в скобках) в сценариях 1, 2 и 3

Main ecosystem characteristics averaged over the period 1980—2020 and standard deviation (indicated in brackets) in scenarios 1, 2 and 3

	Сценарий 1	Сценарий 2	% изменения относительно сценария 1	Сценарий 3	% изменения относительно сценария 1
Температура (°C) фотического слоя в вегетативный период (май-октябрь)	9,24 (0,62)	9,60 (0,00)	3,8 %	9,24 (0,62)	0 %
Концентрация фосфатов (мг/м ³) в фотическом слое в период максимального зимнего накопления	15,01 (4,65)	16,85 (3,61)	12,3 %	12,37 (1,63)	−17,7 %
Биомасса (г/м ³) фитопланктона в фотическом слое в вегетативный период (май-октябрь)	0,93 (0,29)	1,08 (0,27)	16,1 %	0,82 (0,09)	−11,8 %
Годовая первичная продукция фитопланктона (гС/м ² /год)	88,57 (16,85)	95,58 (17,73)	7,9 %	82,83 (7,01)	−6,5 %
Годовая первичная продукция фитопланктона (тоннР/год)	36920 (7024)	39842 (7390)	7,9 %	34524 (2920)	−6,5 %
Реминерализация/ рециклинг (тоннР/год)	33372 (6855)	36369 (7258)	8,9 %	31543 (2778)	−5,4 %
Выход фосфора из донных отложений (тоннР/год)	2876 (250)	2939 (237)	2,1 %	2448 (37)	−14,8 %

В сценарии 2 средние значения всех характеристик (табл. 2) превышают их значения в опорном сценарии (сценарий 1). В среднем за рассматриваемый период температура фотического слоя в вегетативный период оказалась в сценарии 2 выше ($\approx$ на $0,4^\circ\text{C}$), чем в опорном сценарии (см. табл. 2). Это увеличение температуры воды способствовало интенсификации продукционных и деструкционных биогеохимических потоков: первичная продукция фитопланктона и реминерализация увеличились соответственно на 7,9 % и 8,9 %, а поступление фосфатов из донных отложений — на 2,1 %. В результате увеличились зимняя концентрация фосфатов в фотическом слое (на 12,3 %) и биомасса фитопланктона (на 16,1 %). Более точно, повышенный уровень зимних концентраций фосфатов объясняется дисбалансом между процессами их поступления и потребления: суммарное увеличение поступления фосфатов за счёт реминерализации и выхода из донных отложений превышает рост потребления в процессе фотосинтеза, что и приводит к накоплению их зимних запасов.

Напротив, сценарий 3 демонстрирует заниженные средние значения основных характеристик экосистемы (см. табл. 2) Это объясняется тем, что в качестве начальных условий для третьего сценария использовались поля, полученные в результате адаптации моделируемой системы к уровню внешней нагрузки, равному среднесноголетнему. В то же время начальные условия для опорного сценария соответствовали адаптации к высоким значениям внешней фосфорной нагрузки в начале 1980-х гг. В результате общий запас фосфора в системе «вода-донные отложения» в начале расчета в третьем сценарии был ниже, чем в опорном, что и обусловило заниженные средние значения основных характеристик экосистемы.

Наибольшие отличия между средними значениями характеристик в сценариях 1 и 3 имеют место для зимних фосфатов (17,7 %) и выхода фосфора из донных отложений (14,8 %). Это связано с тем, что на данные показатели в основном влияют изменения в биогенной нагрузке, а не повышение температуры воды, компенсирующее эффекты изменения биогенной нагрузки. В случае годовой первичной продукции и реминерализации эффекты роста температуры оказываются сильнее, увеличивая значения этих характеристик, так что суммарное снижение средней за рассматриваемый период первичной продукции и реминерализации оказывается меньше, чем для зимних фосфатов и выхода фосфора из донных отложений и составляет 6,5 % и 5,4 %, соответственно.

В третьем сценарии только первичная продукция имеет положительный тренд, в то время как для концентрации фосфатов в зимний период и биомассы фитопланктона тренды близки к нулю (табл. 1). Отсутствие тренда в изменениях биомассы фитопланктона вызвано практически полной компенсацией эффектов климатического увеличения температуры воды на первичную продукцию (рост биомассы) и реминерализацию органического вещества (убыль биомассы). В результате тренд зимней концентрации фосфатов, который, помимо взаимодействия с фитопланктоном, определяется поступлением фосфатов из донных отложений и внешних источников, при постоянном поступлении из внешних источников оказывается также малым. Дисперсии всех характеристик экосистемы в сценарии 3 значительно уменьшаются по сравнению со сценарием 1.

Таким образом, отсутствие межгодовой изменчивости атмосферных воздействий и вызванных ими изменений температуры воды приводит к сравнительно небольшим изменениям трендов и дисперсии основных характеристик экосистемы Ладожского озера в рассматриваемый период 1980–2020 гг. Вклад межгодовой изменчивости атмосферных воздействий в линейные тренды изменения зимней концентрации фосфатов, летней биомассы фитопланктона и годовой продукции фитопланктона в фотическом слое в 1980–2020 гг. составляет приблизительно 24 %, 10 % и 21 %, соответственно.

Напротив, отсутствие межгодовой изменчивости внешней нагрузки фосфора сопровождается сильным изменением трендов и дисперсии основных характеристик экосистемы (для зимних фосфатов и особенно биомассы фитопланктона тренд практически исчезает, а для первичной продукции он даже меняет знак). В этом случае относительные оценки вкладов межгодовой изменчивости атмосферных воздействий и внешней нагрузки фосфора в линейные тренды не имеют смысла из-за низких значений коэффициента детерминации.

Расчёт по сценарию 1 (см. рис. 1) ясно демонстрирует определённое уменьшение основных характеристик экосистемы Ладожского озера во второй половине рассматриваемого периода 1980–2020 гг. Заметим, что при отсутствии климатических изменений скорость снижения первичной продукции увеличивается с $1,022\text{ гС/м}^2/\text{год}$ (сценарий 1) до $1,235\text{ гС/м}^2/\text{год}$ (сценарий 2). В сценарии 3 отмечается восходящий тренд со скоростью $0,349\text{ гС/м}^2/\text{год}$. Таким образом, уменьшение первичной продукции фитопланктона, связанное со снижением внешней нагрузки, частично компенсируется её увеличением, вызванным изменениями климата.

3.2. Корреляционные связи между характеристиками экосистемы при климатических изменениях атмосферного воздействия и постоянной внешней биогенной нагрузке (сценарий 3)

Биомасса фитопланктона в каждый момент времени формируется в результате действия нескольких разнонаправленных биогеохимических процессов. Увеличение биомассы происходит за счёт первичного продуцирования органического вещества, а её уменьшение — за счёт процессов отмирания, выедания зоопланктоном и гравитационного опускания. Все перечисленные процессы зависят как от температуры воды, так и от концентрации самого фитопланктона.

С целью нахождения корреляционных связей между биогеохимическими характеристиками экосистемы Ладожского озера в условиях сценария 3, была построена матрица корреляций (рис. 2). Как видно из рисунка, существует тесная корреляционная связь между межгодовой изменчивостью зимних запасов минерального фосфора и биомассой диатомовых водорослей ($r = 0,79$), а также, как следствие, и общей биомассой фитопланктона ($r = 0,82$). В то же время отсутствует влияние зимних запасов фосфора на биомассу недиадомовых водорослей ($r = 0,11$). Нет значимой связи между осреднённой за вегетативный период температурой фотического слоя и биомассами фитопланктона в целом, диатомовых и недиадомовых водорослей.

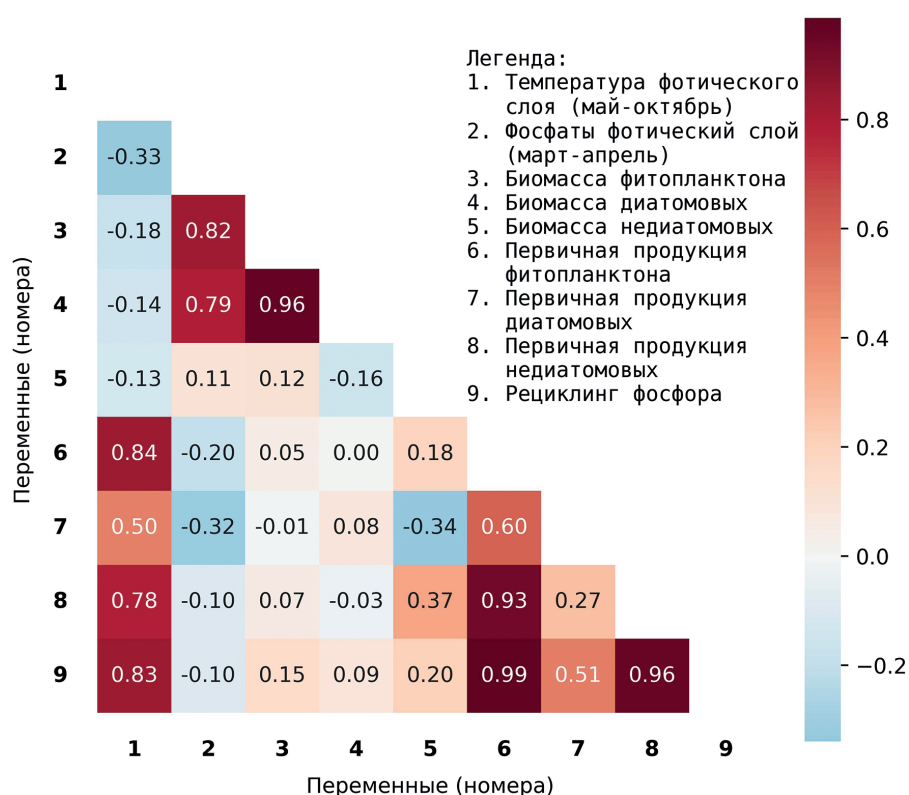


Рис. 2. Корреляционная матрица характеристик экосистемы Ладожского озера для сценария 3

Fig. 2. Correlation matrix of Lake Ladoga ecosystem characteristics for scenario 3

В то же время увеличение температуры фотического слоя оказывает значительное влияние на первичную продукцию недиадомовых водорослей ($r = 0,78$) и, как следствие, на общую первичную продукцию ($r = 0,84$). При этом заметного влияния повышения температуры на первичную продукцию диатомовых водорослей не отмечается. Отметим тесную связь между изменчивостью первичной продукции недиадомовых водорослей и процессом рециклинга ($r = 0,96$), который обеспечивает реминерализацию органического вещества за счёт экскреции зоопланктона и минерализации. Влияние рециклинга на воспроизводство первичной продукции диатомового фитопланктона невелико ($r = 0,51$).

Таким образом, проведённый анализ показывает, что при условии постоянной внешней биогенной нагрузки в экосистеме Ладожского озера наблюдаются следующие основные закономерности. Уровень зимних запасов фосфатов остаётся практически неизменным, как и биомасса фитопланктона. Основным фактором, определяющим уровень биомассы диатомовых водорослей, является запас фосфатов, накопленных

в фотическом слое в зимний период. Цветение недиатомовых водорослей в вегетативный период обеспечивается в основном за счёт оборота фосфора в фотическом слое посредством рециклинга. Отсутствие роста биомассы фитопланктона как ответной реакции на повышение температуры воды объясняется синхронным увеличением, как первичной продукции, так и процессов, вызывающих уменьшение биомассы.

Как показано выше, влияние климатических изменений, проявляющееся в устойчивом повышении температуры воды в фотическом слое Ладожского озера, оказывает комплексное воздействие на функционирование экосистемы. Данное воздействие выражается не столько в прямом увеличении биомассы фитопланктона, сколько в интенсификации ключевых биогеохимических процессов и потоков вещества. Наиболее значимым следствием наблюдаемого потепления является активизация продукционно-деструкционных процессов, что находит отражение в увеличении первичной продукции и ускорении процессов рециклинга.

В связи с этим представляет особый интерес анализ влияния климатических изменений на продукционные характеристики основных групп фитопланктона. На рис. 3 представлена межгодовая динамика первичной продукции диатомовых и недиатомовых водорослей за исследуемый период. Полученные данные, дополненные расчетами статистически значимых трендовых характеристик, демонстрируют выраженную положительную динамику продукционных процессов.

Под влиянием климатических изменений общая первичная продукция фитопланктона увеличивается со средней скоростью $0,35 \text{ гС/м}^2/\text{год}$. Детализация этого тренда по отдельным функциональным группам показывает выраженную асимметрию вкладов: наибольший вклад (примерно 63 %) в общий прирост вносит увеличение первичной продукции недиатомовых водорослей, составляющее $0,22 \text{ гС/м}^2/\text{год}$. Вклад диатомовых водорослей оказывается существенно меньше — примерно 37 % от общего прироста, что соответствует увеличению на $0,13 \text{ гС/м}^2/\text{год}$.

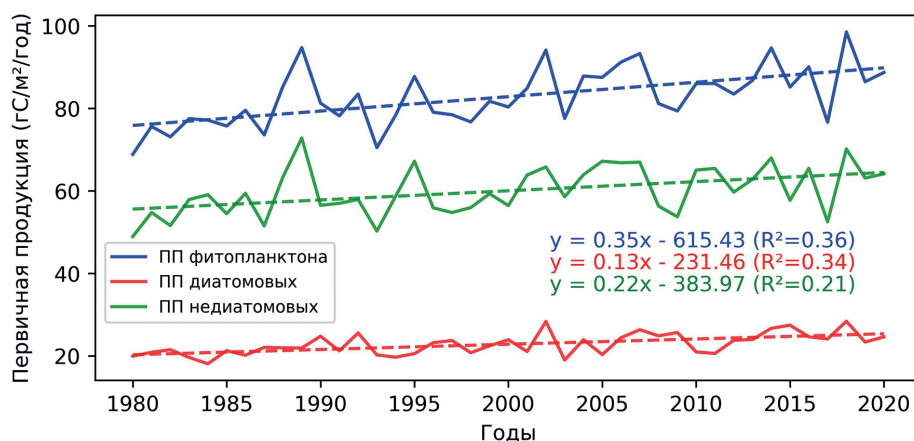


Рис. 3. Межгодовая динамика первичной продукции фитопланктона (синяя линия), в том числе диатомовых (красная линия) и недиатомовых (зелёная линия) водорослей в сценарии 3. Пунктирной линией показан линейный тренд

Fig. 3. Interannual dynamics of phytoplankton primary production (blue line), including diatoms (red line) and non-diatoms (green line) algae in scenario 3. The dashed line shows a linear trend

В соответствии с расчетными значениями коэффициента детерминации (R^2), повышение температуры воды объясняет примерно 34 % межгодовой изменчивости первичной продукции недиатомового фитопланктона и лишь 21 % вариабельности продукции диатомовых водорослей. Это существенное различие указывает на то, что межгодовые колебания погодных условий (такие как изменения интенсивности солнечной радиации и ветрового перемешивания, смена ледового режима) вносят значительный дополнительный вклад в формирование годовых величин первичной продукции фитопланктона.

4. Заключение

Выполненные численные эксперименты по переменному отключению межгодовой изменчивости атмосферных воздействий и внешней фосфорной нагрузки на Ладожское озеро позволили выявить роль изменений климата и внешней фосфорной нагрузки в межгодовой изменчивости экосистемы озера. Результаты работы демонстрируют выраженное доминирование внешней биогенной нагрузки как основного

фактора, определяющего многолетнюю динамику характеристик экосистемы озера в 1980–2020 гг., Вклад изменений климата в высоко детерминированные линейные тренды изменения зимней концентрации фосфатов, летней биомассы фитопланктона и годовой продукции фитопланктона в фотическом слое составил всего лишь соответственно 24 %, 10 % и 21 %. Согласно результатам расчётов, происходит заметное уменьшение указанных характеристик экосистемы озера во второй половине рассматриваемого периода 1980–2020 гг. При этом для продукции фитопланктона отмечается существенное (более 20 %) компенсирующее влияние климатических изменений, нивелирующее часть эффекта от снижения биогенной нагрузки.

Согласно результатам анализа корреляционных связей между характеристиками экосистемы при фиксации внешней биогенной нагрузки, неламеллярные водоросли, вносящие основной вклад (63 %) в суммарную продукцию фитопланктона, сильно реагируют на климатические изменения температуры воды в рассматриваемый период. Диатомовые водоросли демонстрируют меньшую зависимость от климатических изменений, сохраняя тесную связь с зимними запасами фосфатов. Приведенные оценки подчеркивают сложный характер взаимодействия абиотических факторов в регуляции продуктивности экосистемы: эффекты температуры воды объясняют лишь часть наблюдаемой межгодовой изменчивости, уступая значительную роль другим физическим факторам, таким как фотосинтетически активная радиация, ветровой режим и ледовые условия.

Использованный подход к выделению климатического сигнала на фоне сильной изменчивости внешней нагрузки представляет существенную ценность для прогнозных оценок развития экосистемы Ладожского озера. Полученные результаты имеют важное практическое значение для разработки научно обоснованной стратегии управления экологическим состоянием этого уникального водоема в условиях меняющегося климата и антропогенного пресса, обеспечивая основу для принятия взвешенных управленческих решений по сохранению его природного потенциала.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке грантов Российского научного фонда (проект № 23-17-20010) и Санкт-Петербургского научного фонда (проект № 23-17-20010).

Funding

This work was supported by grants from the Russian Science Foundation (project No. 23-17-20010) and the St. Petersburg Science Foundation (project No. 23-17-20010).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Литература

1. Ладога / Под ред. В.А. Румянцева и С.А. Кондратьева. СПб.: Нестор-История, 2013. 467 с.
2. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / Под ред. В.А. Румянцева. СПб.: Нестор-История, 2015. 200 с.
3. Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата // Под ред. С.А. Кондратьева, Ш.Р. Позднякова и В.А. Румянцева. М.: Изд. РАН, 2021. 640 с.
4. Летанская Г.И., Протопопова Е.В. Современное состояние фитопланктона Ладожского озера (2005–2009 гг.) // Биология внутренних вод. 2012. № 4. С. 17–24. EDN PFEZMX
5. Петрова Н.А., Петрова Т.Н., Сусарева О.М., Иофина И.В. Особенности эволюции экосистемы Ладожского озера под влиянием антропогенного эвтрофирования // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 580–589. EDN MVNXUZ
6. Marshall J., Adcroft A., Hill C., et al. A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1997. Vol. 102, No. C3. P. 5753–5766. <https://doi.org/10.1029/96JC02775>
7. Marshall J., Hill C., Perelman L., et al. Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1997. Vol. 102, No. C3. P. 5733–5752. <https://doi.org/10.1029/96JC02776>

8. Исаев А.В., Рябченко В.А., Коник А.А. Воспроизведение современного климатического состояния экосистемы Ладожского озера // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 2. С. 50–65. EDN MWTKC. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(2\)-5](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(2)-5)
9. Savchuk O.P. Nutrient biogeochemical cycles in the Gulf of Riga: scaling up field studies with a mathematical model // Journal of Marine Systems. 2002. Vol. 32, No. 4. P. 253–280. EDN LZXTGP. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(02\)00039-8](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(02)00039-8)
10. Isaev A., Vladimirova O., Eremina T., et al. Accounting for dissolved organic nutrients in an SPBEM-2 model: Validation and verification // Water. 2020. Vol. 12, No. 5. P. 1307. EDN NSXOTT. <https://doi.org/10.3390/w12051307>
11. Isaev A.V., Savchuk O.P., Filatov N.N. Three-Dimensional Hindcast of Nitrogen and Phosphorus Biogeochemical Dynamics in Lake Onego Ecosystem, 1985–2015. Part I: Long-Term Dynamics and Spatial Distribution // Fundamental and Applied Hydrophysics. 2022. Vol. 15, No. 2. P. 76–97. EDN BOSGAU. <https://doi.org/10.48612/fpg/e1m2-63b5-rhvg>
12. ECMWF: ECMWF Reanalysis v5 (ERA5). URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5> (дата обращения: 19.09.2025).
13. Исаев А.В., Рябченко В.А. Модельные оценки межгодовой изменчивости характеристик экосистемы Ладожского озера в период с 1980 по 2020 годы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 4. С. 32–42. EDN EHTXVP. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(4\)-2](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(4)-2)

References

1. Ladoga. Rummyantsev VA, Kondratiev SA, editors. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2013. 467 p. (In Russ).
2. Lake Ladoga and Sights of its Coast. Atlas. Rummyantsev VA, editor. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2015. 200 p. (In Russ).
3. Current State and Problems of Anthropogenic Transformation of Lake Ladoga's Ecosystem in a Changing Climate. Kondratiev SA, Pozdnyakov ShR, Rummyantsev VA, editors. Moscow: Russian Academy of Sciences Press; 2021. 640 p. (In Russ).
4. Letanskaya GI, Protopopova EV. The current state of phytoplankton in Lake Ladoga (2005–2009). *Inland Water Biology*. 2012;5:310–316. <https://doi.org/10.1134/S1995082912040104>
5. Petrova NA, Petrova TN, Susareva OM, et al. Specific features of Lake Ladoga ecosystem under the effect of anthropogenic eutrophication. *Water Resources*. 2010;37(5):674–683. <https://doi.org/10.1134/S0097807810050076>
6. Marshall J, Adcroft A, Hill C, et al. A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1997;102(C3):5753–5766. <https://doi.org/10.1029/96JC02775>
7. Marshall J, Hill C, Perelman L, et al. Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1997;102(C3):5733–5752. <https://doi.org/10.1029/96JC02776>
8. Isaev AV, Ryabchenko VA, Konik AA. Reproduction of the current climatic state of the Lake Ladoga ecosystem. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(2):50–65. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(2\)-5](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(2)-5)
9. Savchuk OP. Nutrient biogeochemical cycles in the Gulf of Riga: scaling up field studies with a mathematical model. *Journal of Marine Systems*. 2002;32(4):253–280. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(02\)00039-8](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(02)00039-8)
10. Isaev A, Vladimirova O, Eremina T, et al. Accounting for dissolved organic nutrients in an SPBEM-2 model: validation and verification. *Water*. 2020;12(5):1307. <https://doi.org/10.3390/w12051307>
11. Isaev AV, Savchuk OP, Filatov NN. Three-dimensional hindcast of nitrogen and phosphorus biogeochemical dynamics in Lake Onego ecosystem, 1985–2015. Part I: long-term dynamics and spatial distribution. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022;15(2):76–97. <https://doi.org/10.48612/fpg/e1m2-63b5-rhvg>
12. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. ECMWF Reanalysis v5 (ERA5). Available from: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>. (Accessed September 19, 2025).
13. Isaev AV, Ryabchenko VA. Model estimates of interannual variability of the Lake Ladoga ecosystem characteristics in the period from 1980 to 2020. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(4):32–42. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(4\)-2](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(4)-2) (In Russ).

Об авторах

ИСАЕВ Алексей Владимирович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, СПбФ ИО РАН, ORCID: 0000-0003-2005-4949, WoS ResearcherID: C-1370-2014, Scopus Author ID: 25641182000, SPIN-код: 4059-6017, e-mail: isaev1975@gmail.com

РЯБЧЕНКО Владимир Алексеевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, СПбФ ИО РАН, ORCID: 0000-0003-3909-537X, WoS Researcher ID: R-3877-2016, Scopus Author ID: 7005479766, SPIN-код: 2187-1380, e-mail: vla-ryabchenko@yandex.ru