Общая экология и геоэкология

General ecology and geo-ecology

УДК 574.5

РАЗМЕРНАЯ СТРУКТУРА ФИТОПЛАНКТОНА ОЗЕР РАЗНОГО ТРОФИЧЕСКОГО СТАТУСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛАССИФИКАЦИИ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГРУПП

А. Ю. КАРПАЕВА[1)]

[1)]*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам, ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Беларусь*

Рассматривается проблема методологической неоднородности в оценке размерной структуры фитопланктона, которая затрудняет сопоставление результатов различных гидробиологических исследований. Анализируется размерно-структурная организация фитопланктонных сообществ озер Белорусского Поозерья с использованием подхода морфологических функциональных групп (MBFG), а также выявление связей между их структурой и трофическим статусом водоемов. На первом этапе исследования оценены численность, биомасса, прозрачность воды и среднеценотический объем клеток фитопланктона. Установлено, что несмотря на широкий диапазон варьирования среднеценотического объема, его связь с показателями трофического состояния выражена слабо, связана с особенностями морфологической организации фитопланктона, а также различиями в механизмах формирования биомассы. Размерно-функциональную организацию сообществ оценивали на основе классификации морфологических функциональных групп (MBFG). Корреляционный анализ выявил статистически значимые связи между долями MBFG-групп в общей биомассе фитопланктона и показателями трофности. Группы мелких одиночных (MBFG I) и мелких жгутиковых (MBFG II) форм отрицательно коррелировали с биомассой и положительно с прозрачностью. Группа нитчатых цианобактерий (MBFG III), напротив, была положительно связана с биомассой и отрицательно с прозрачностью, отражая усиление их роли при эвтрофировании. Сезонная динамика показала, что в гиперэвтрофных озерах на протяжении всего сезона доминируют нитчатые формы (MBFG III), достигая максимума поздним летом (до 83 %). В мезотрофных озерах и водоемах с чертами олиготрофии ведущую роль играют MBFG I–II, особенно летом.

Образец цитирования:
Карпаева АЮ. Размерная структура фитопланктона озер разного трофического статуса с использованием классификации морфологических функциональных групп. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2026;3:4–13.
https://doi.org/10.46646/2521-683X/2026-3-4-13

For citation:
Karpaeva AYu. Phytoplankton size structure in lakes with different trophic status using the morphological functional groups classification. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2026;3:4–13. Russian.
https://doi.org/10.46646/2521-683X/2026-3-4-13

Автор:
Анастасия Юрьевна Карпаева – младший научный сотрудник лаборатории гидробиологии.

Author:
Anastasia Yu. Karpaeva, junior researcher at the laboratory of hydrobiology.
karpaevanastya1@gmail.com

Группы MBFG IV–VII не показали однозначной связи с трофностью, что, вероятно, связано с их экологической пластичностью или зависимостью от сезонных сукцессий. Исследование свидетельствует, что размерную структуру фитопланктона следует оценивать не только через объем клеток, но и через морфофункциональные признаки, что дает более адекватное представление о реакции сообществ на эвтрофирование и сезонные изменения.

Ключевые слова: фитопланктон; трофический статус; размерные фракции; MBFG; Белорусское Поозерье.

PHYTOPLANKTON SIZE STRUCTURE IN LAKES WITH DIFFERENT TROPHIC STATUS USING THE MORPHOLOGICAL FUNCTIONAL GROUPS CLASSIFICATION

A. Yu. KARPAEVA[a]

[a]*The Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources, 27 Akademičnaja Street, Minsk 220072, Belarus*

This study addresses the problem of methodological inconsistency in assessing phytoplankton size structure, which limits the comparability of results among hydrobiological studies. The aim of the study was to analyze the size-structural organization of phytoplankton communities in the lakes of the Belarusian Lakeland using the Morphology-Based Functional Groups (MBFG) approach and to identify relationships between community structure and lake trophic status. In the first stage of the study, phytoplankton abundance, biomass, water transparency, and community-weighted mean cell volume were assessed. Despite the wide range of variation in community-weighted mean cell volume, its relationship with trophic indicators was weak, reflecting differences in phytoplankton morphological organization and biomass formation mechanisms. The size-functional organization of phytoplankton communities was evaluated using the MBFG classification. Correlation analysis revealed significant relationships between the relative biomass of MBFGs and trophic indicators. The proportions of small unicellular (MBFG I) and small flagellated (MBFG II) taxa were negatively correlated with phytoplankton biomass and positively correlated with water transparency. In contrast, the filamentous cyanobacteria group (MBFG III) was positively associated with phytoplankton biomass and negatively associated with water transparency, reflecting its increasing importance under eutrophic conditions. Seasonal dynamics showed that filamentous forms (MBFG III) dominated throughout the growing season in hypertrophic lakes, reaching a maximum contribution of up to 83 % in late summer. In mesotrophic lakes and lakes exhibiting oligotrophic characteristics, MBFG I and MBFG II predominated, particularly during summer. MBFG IV–VII showed no consistent relationship with trophic status, likely reflecting their ecological plasticity and dependence on seasonal succession. The results demonstrate that phytoplankton size structure should be assessed not only by cell volume but also by morphological and functional traits, which provide a more reliable basis for evaluating community responses to eutrophication and seasonal environmental changes.

Keywords: phytoplankton; trophic status; size fractions; MBFG; Belarusian Lake Region.

Введение

Размерная структура сообщества фитопланктона является важной характеристикой организации планктонных сообществ, поскольку тесно связана с трофическим состоянием водоемов и может изменяться вдоль градиента трофности [1].

Однако в гидробиологических исследованиях до сих пор сохраняется значительная методологическая неоднородность при оценке размерной структуры фитопланктона. Авторы используют различные подходы: одни оперируют линейными размерами клеток [2], другие – объемом [3], третьи трактуют по-разному, что считать отдельной единицей учета (изолированную клетку, колонию или нить). Такая разнородность методик серьезно затрудняет сравнение результатов, полученных в разных работах, а также не позволяет сформировать унифицированное представление о роли размерных фракций в водных экосистемах.

Кроме того, традиционный подход, основанный исключительно на линейном размере клетки [2], не всегда адекватно отражает реальную экологическую роль вида. У колониальных и нитчатых форм, например, «экологический размер» определяется морфологией всей структуры, а не размером отдельной клетки. Это означает, что размер как таковой тесно связан с морфологическими особенностями и, в конечном счете, с функциональными стратегиями видов в сообществе.

В связи с этим в последние годы все большее распространение получает концепция морфологических функциональных групп (MBFG) – *Morphological Functional Groups* [4], которая позволяет объединить размерные и морфологические характеристики организмов в единую классификационную схему. Данный

подход дает возможность сравнивать не только отдельные размеры или объемы клеток, но и учитывает их морфо-функциональную организацию. Следовательно, в настоящей работе для анализа размерной структуры фитопланктонных сообществ и сравнения размерных фракций на озерах разного трофического статуса использовали классификацию MBFG.

Материалы и методы исследования

В работе представлен анализ размерной структуры фитопланктона на основе 66 проб, собранных в 11 озерах Белорусского Поозерья с различным трофическим статусом в период с мая по сентябрь 2023–2025 гг.

В четырех озерах Ушачской группы (Чертсвятское, Вечелье, Отолово, Кривое) отбор проб проводился трижды: в конце весны, летом и в конце лета 2023 г. В пяти озерах Браславской группы (Потех, Горушка, Обстерно, Волос Северный, Волос Южный) пробы отбирались в те же периоды 2024 г. В гиперэвтрофных озерах Ильменок и Великое отбор осуществлялся в конце весны, летом и в конце лета 2025 г.

Отбор проб проводили с использованием батометра Молчанова объемом 8 л, последовательно с поверхности, прозрачности и двойной прозрачности, после чего объединяли их в интегральную пробу. Дополнительно брали отдельную пробу с поверхности.

Фиксация пробы осуществлялась раствором Люголя. Концентрировали фитопланктон методом отстаивания от изначального объема 0,5 л. Для подсчета численности использовали стандартные гидробиологические методы [5].

Биомассу определяли счетно-объемным методом [6].

Видовой состав фитопланктона выделяли с использованием светового микроскопа *Carl Zeiss* (модель *Axiostar Plus*) при увеличении ×100, ×200 и ×400. Видовая идентификация осуществлялась на основе отечественных [7] и зарубежных определителей [8]. При выделении и расположении отделов водорослей использовали систему, принятую в справочнике «Альгофлора Беларуси» [9]. Трофический статус озера определи исходя из значений биомассы фитопланктона по Китаеву (1984) [10].

В работе использована классификация морфологических функциональных групп (MBFG), предложенная Круком и соавторами [4]. Она объединяет виды фитопланктона на основе таких морфологических признаков, как наличие или отсутствие жгутиков, форма клетки, способность к образованию колоний или нитей, наличие защитных структур (например, панцирей или шипов) и размерный диапазон. В рамках этого подхода выделено 7 групп (*MBFG* I–VII), каждая из которых соответствует определенной экологической стратегии и функциональной роли в водной экосистеме.

Группа I включает мелкие одноклеточные формы без специализированных структур и характерна преимущественно для олиготрофных и мезотрофных водоемов. Группа II представлена мелкими жгутиковыми организмами, способными к миксотрофии, и чаще встречается в условиях низкой обеспеченности ресурсами. Группа III объединяет нитчатые цианобактерии, которые, несмотря на небольшой размер клеток, обладают значительным «экологическим размером» за счет длины нитей, характерным для эвтрофных условий. Группы IV и V включают соответственно средние по размеру организмы без выраженных защитных структур и жгутиковые формы, способные к активному перемещению в толще воды; они широко распространены в мезотрофных и эвтрофных водоемах. Группа VI представлена диатомовыми водорослями с кремнеземной оболочкой. Группа VII – это крупные колониальные или слизистые цианобактерии; именно данная группа наиболее характерна для эвтрофных и гиперэвтрофных систем [4]. Для оценки взаимосвязи между размерной структурой фитопланктона и трофическим статусом водоемов был выполнен корреляционный анализ (по Спирмену) между долей морфологических функциональных групп (MBFG), общей биомассой фитопланктона и прозрачностью воды. Матрица корреляций была выполнена с помощью *Python*, библиотека *sckit-learn*. Остальные расчеты проводились в программе *Past 3.16.*

Для количественной характеристики размерной структуры фитопланктонных сообществ и статистического анализа нами использован показатель среднеценотического объема клеток (W). Среднеценотический объем клеток рассчитывался как средневзвешенная величина с учетом вклада видов в биомассу сообщества. Расчет объема проводился для каждой отдельной клетки. Это позволило стандартизировать сравнение между одноклеточными, колониальными и нитчатыми формами.

Результаты исследования и их обсуждение

Для выявления связей между трофическим статусом водоемов и размерной структурой фитопланктонных сообществ в первую очередь были определены численность и биомасса фитопланктона для каждого из 11 исследованных озер, а также прозрачность воды как интегральный показатель трофности. Кроме того, для каждой исследованной пробы был рассчитан среднеценотический объем клеток фитопланктона, на основании которого определены средние значения данного показателя для каждого озера (табл. 1).

Таблица 1

Средние значения (± стандартные отклонения) морфометрических и некоторых биологических характеристик озер разного трофического статуса Белорусского Поозерья

Table 1

Average values (± standard deviations) of morphometric and some biological characteristics of lakes of different trophic status in the Belarusian Lakeland

Озеро (трофический статус)	Общая численность фитопланктона, млн кл/л	Общая биомасса фитопланктона, мг/л	Среднеценотический объем, мкм^3	Прозрачность, м
Чертсвятское (высокоэвтрофное)	171,9 ± 10,95	48,65 ± 14,9	765,6 ± 54,58	0,70 + 0,0
Вечелье (мезотрофные)	10,26 ± 1,2	3,29 ± 1,24	1525,6 ± 706,4	2,37 ± 0,78
Отолово (эвтрофное)	18,44 ± 8,63	8,43 ± 3,84	607,7 ± 374,20	2,67 ± 0,47
Кривое (мезотрофное с чертами олиготрофии)	3,51 ± 0,92	0,85 ± 0,27	981,8 ± 537,91	5,16 ± 0,24
Потех (эвтрофное)	18,73 ± 12,9	6,29 ± 4,24	1111,4 ± 585,09	1,20 ± 0,08
Горушка (эвтрофное)	7,33 ± 3,48	4,85 ± 4,0	1348,2 ± 1262,65	1,83 ± 0,12
Обстерно (мезотрофное)	3,25 ± 2,2	1,00 ± 0,78	1189,6 ± 466,46	2,37 ± 0,82
Волос Северный (мезотрофное с чертами олиготрофии)	3,98 ± 1,34	0,46 ± 0,16	639,82 ± 103,51	5,27 ± 0,25
Волос Южный (мезотрофное с чертами олиготрофии)	3,38 ± 1,19	0,69 ± 0,50	1139,96 ± 291,05	6,17 ± 0,24
Ильменок (высокоэвтрофное)	46,78 ± 34,7	22,70 ± 8,01	520,6 ± 363,48	0,37 ± 0,12
Великое (высокоэвтрофное)	22,58 ± 7,9	46,75 ± 56,3	961,8 ± 851,9	0,87 ± 0,38

Анализ полученных данных показал широкий диапазон варьирования среднеценотического объема – от минимального значения 607,7 мкм³ (Отолово) до максимального 1525,6 мкм³ (Вечелье).

Для оценки характера связи между среднеценотическим объемом с биомассой, численностью фитопланктона и прозрачностью был проведен корреляционный анализ, который выявил слабую отрицательную статистически значимую корреляцию между среднеценотическим объемом клеток и численностью фитопланктона ($rs = -0{,}36$; $p = 0{,}038$). Однако не выявил статистически значимой корреляции между среднеценотическим объемом клеток с общей биомассой фитопланктона ($rs = -0{,}262$, $p = 0{,}135$) и прозрачностью ($rs = 0{,}28$; $p = 0{,}118$).

Причиной этому могут служить несколько факторов. Во-первых, в планктоне эвтрофных и гиперэвтрофных водоемов зачастую доминируют нитчатые формы таких синезеленых водорослей, как *Limnothrix* M.-E. Meffert, 1987, и *Geitlerinema lemmermannii* (Wołoszyńska) Anagnostidis 1989. Эти организмы характеризуются выраженной морфологической диссоциацией: формируя длинные и оптически плотные трихомы, они создают высокую биомассу, однако объем отдельной клетки в составе такой нити остается крайне малым. При принятой в работе методике подсчета (учет каждой клетки, а не колонии или нити) приводит к тому, что сообщество с высокой биомассой демонстрирует низкие значения среднеценотического объема. При этом в мезотрофных озерах с чертами олиготрофии (например, Волос Северный, Волос Южный, Кривое) в летний период также могут присутствовать представители отдела Cyanophyta. Однако их представленность иная по сравнению с гиперэвтрофными водоемами. Здесь синезеленые водоросли встречаются либо единично, либо формируют небольшие колонии, не достигающие массового развития. Несмотря на различие в таксономическом составе и типе организации размеры их клеток также невелики.

Итак, при расчете среднеценотического объема возникает эффект нивелирования: и в гиперэвтрофном озере (где длинная нить *Limnothrix* состоит из мелких клеток), и в мезотрофном озере (где присутствуют единичные мелкоклеточные синезеленые) итоговый показатель объема может иметь близкие значения. Это создает иллюзию сходства размерной структуры, хотя функциональная организация сообществ и пути формирования биомассы принципиально различны.

Кроме того, на расчет среднеценотического объема могут влиять и другие факторы. Например, случаи массового развития крупноклеточных форм, которые могут существенно повышать среднеценотический объем даже в водоемах с высоким трофическим статусом.

Наиболее ярким примером является гиперэвтрофное оз. Ильменок в раннелетний период, в котором наблюдалось доминирование динофитовой водоросли *Ceratium hirundinella* (O. F. Müller) Dujardin 1841, объем клеток которой на порядки превышает таковой у синезеленых водорослей. Высокая биомасса в сочетании с гигантскими размерами клеток закономерно повышала среднеценотический объем до 126 751 мкм^3.

Таким образом, несмотря на широкий диапазон варьирования среднеценотического объема клеток фитопланктона, его связи с показателями, характеризующими трофическое состояние водоемов, оказались недостаточно выраженными. В связи с этим дальнейший анализ был направлен на оценку морфофункциональной структуры фитопланктона с использованием классификации MBFG, учитывающей не только размер клеток, но и особенности их организации и экологической стратегии.

На основе имеющихся данных о количественном составе фитопланктона и прозрачности был проведен корреляционный анализ между долями каждой из семи морфологических функциональных групп (MBFG I–VII) в общей биомассе фитопланктона, с одной стороны, и значениями общей биомассы, численности фитопланктона и прозрачности с другой.

На рис. 1 представлена матрица ранговых коэффициентов корреляции Спирмена между прозрачностью, количественными показателями фитопланктона и MBFG-группами. На матрице представлены только статистически значимые коэффициенты корреляции Спирмена ($p < 0,05$). Числовые значения в ячейках соответствуют величине коэффициента корреляции. Цветовая шкала справа отражает величину и направление корреляционной связи: темные оттенки соответствуют отрицательным значениям коэффициента, светлые – положительным, при этом интенсивность окраски возрастает с увеличением абсолютной величины коэффициента.

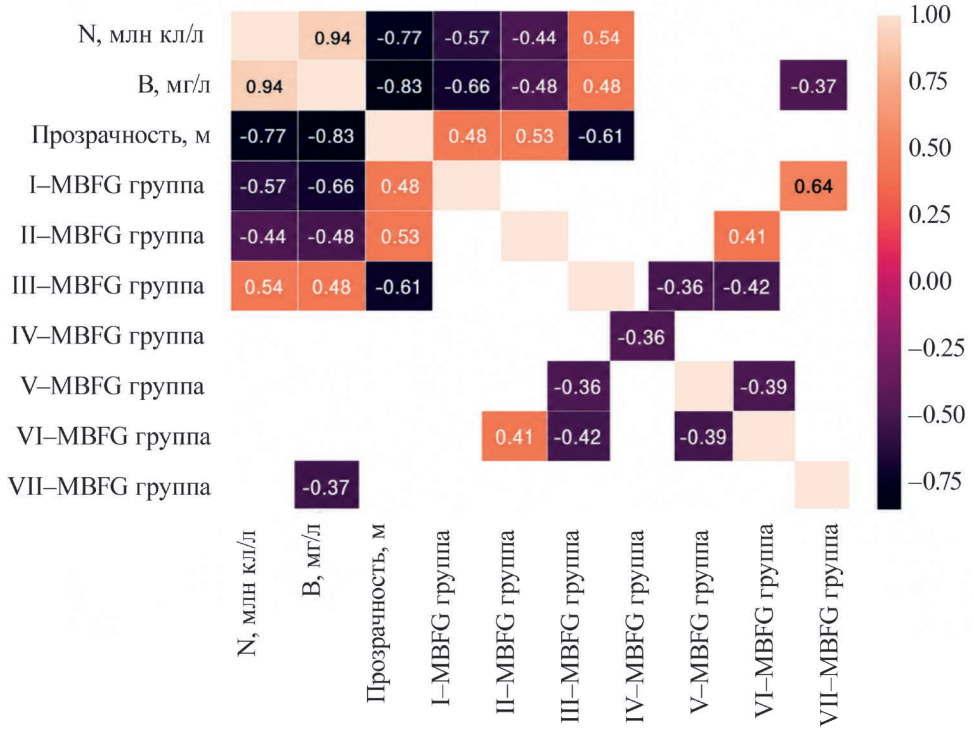


Рис. 1. Матрица корреляции MBFG-групп с биомассой, численностью и прозрачностью фитопланктона в озерах разного трофического статуса

Fig. 1. Correlation matrix of MBFG groups with biomass, abundance and transparency of phytoplankton in lakes of different trophic status

Установлено, что группы MBFG I–II демонстрируют отрицательную связь с биомассой фитопланктона ($rs = -0,66$ и $rs = -0,48$ соответственно) и положительную с прозрачностью воды ($rs = 0,48$ и $rs = 0,53$), что указывает на их преимущественное развитие в условиях низкой трофности и высокой прозрачности. Полученные результаты согласуются с представлениями о преобладании в олиготрофных

водоемах организмов небольших размеров, обладающих высокой эффективностью использования ограниченных ресурсов [11; 12]. Следовательно, в олиготрофных водоемах наряду с мелкоклеточными одиночными формами существенную роль могут играть и мелкие колониальные цианобактерии, однако их структурно-функциональная организация принципиально отличается от крупных нитчатых форм, характерных для эвтрофных экосистем.

В противоположность этому, группа MBFG III, представленная нитчатыми цианобактериями, организованными в плотные трихомы, характеризуется положительной корреляцией с биомассой фитопланктона (rs = 0,48) и отрицательной — с прозрачностью воды (rs = −0,61). В отличие от мелких колониальных форм MBFG I–II, образующих шаровидные или бесформенные слизистые колонии, представители MBFG III обладают иной структурно-функциональной организацией, основанной на формировании нитчатых трихомов. Выявленная зависимость отражает возрастание роли данной жизненной стратегии при повышении трофического уровня и снижении прозрачности воды, что соответствует современным представлениям о смене доминирующих морфофункциональных стратегий в процессе эвтрофирования и повышенной устойчивости нитчатых цианобактерий к воздействию факторов среды и выеданию зоопланктоном [13; 14].

Ряд морфологических функциональных групп (IV, V, VI) не продемонстрировали статистически значимых связей с показателями трофического статуса. Вероятно, это обусловлено их высокой экологической пластичностью либо незначительным вкладом в общую биомассу. Такие группы способны существовать в широком диапазоне условий и не отражают напрямую изменения трофического уровня.

Помимо анализа общих корреляций между трофическим статусом и вкладом MBFG-групп в биомассу фитопланктона, важно учитывать временную динамику. Сезонные изменения абиотических и биотических факторов (температуры, освещенности, биогенной нагрузки, пресса выедания) могут существенно модифицировать структурную организацию сообществ даже в пределах одного водоема. В связи с этим дополнительно проанализировали изменения доли каждой морфофункциональной группы в течение вегетационного сезона в озерах разного трофического статуса.

Группа MBFG I (мелкие одиночные клетки) демонстрировала наибольший вклад (до 50 %) в биомассу фитопланктона в водоемах с более низким уровнем трофности (Северный Волос, Южный Волос, Кривое) (рис. 2). В гиперэвтрофных озерах (Чертсвятское, Великое, Ильменок) ее доля оставалась низкой в течение всего сезона с минимальными значениями летом, в то время как во всех остальных типах водоемов она возрастала в летний период. В эвтрофных водоемах (Потех, Отолово, Горушка) наблюдалось умеренное увеличение доли этой группы в летний период с последующим снижением к осени. В мезотрофных озерах сезонная динамика была более вариабельна: возможны как летние максимумы, так и постепенное увеличение доли группы к осени.

Группа MBFG II (мелкие жгутиковые формы) также характерна для водоемов с низкой трофностью (Северный Волос, Южный Волос, Кривое), что свидетельствует о важной роли миксотрофии и подвижности в условиях ограниченного поступления питательных веществ. В этих озерах вклад данной группы был значительно выше, чем в других типах водоемов и достигал 50 % в оз. Кривое в летний период (рис. 3). Стоит отметить, что во всех остальных типах водоемов (кроме оз. Кривое) наблюдается резкое снижение данной группы в летний период с последующим увеличением в мезотрофных и эвтрофных озерах. В гиперэвтрофных водоемах группа MBFG II практически не играла существенной роли в формировании биомассы.

Группа MBFG III (нитчатые цианобактерии) демонстрировала наиболее выраженную зависимость от трофического статуса водоемов (рис. 4). В гиперэвтрофных озерах (Великое, Ильменок, Чертсвятское) доля данной группы постепенно возрастала от весны к осени, достигая своего максимума в позднелетний период (83 % в оз. Великое). В эвтрофных водоемах (Потех, Горушка, Отолово) наблюдалась выраженная сезонная динамика. Для этого типа водоемов был характерен небольшой весенний пик, после которого следовало резкое падение с последующим увеличением процентного отношения данной группы к осени. В мезотрофных озерах (Обстерно, Вечелье) сезонная динамика различалась. Оз. Вечелье характеризовалось незначительным вкладом данной группы в биомассу, в то время как в оз. Обстерно доля группы MBFG III возрастала от весны к осени. Также стоит отметить, что в водоемах с чертами олиготрофии группа MBFG III практически отсутствовала и не достигала ни в один из сезонов даже 5 %. Данная закономерность согласуется с полученной положительной корреляцией с биомассой (r = 0,48) и отрицательной с прозрачностью воды (r = −0,61), что отражает ее ключевую роль в формировании фитопланктонных сообществ в условиях эвтрофирования [13].

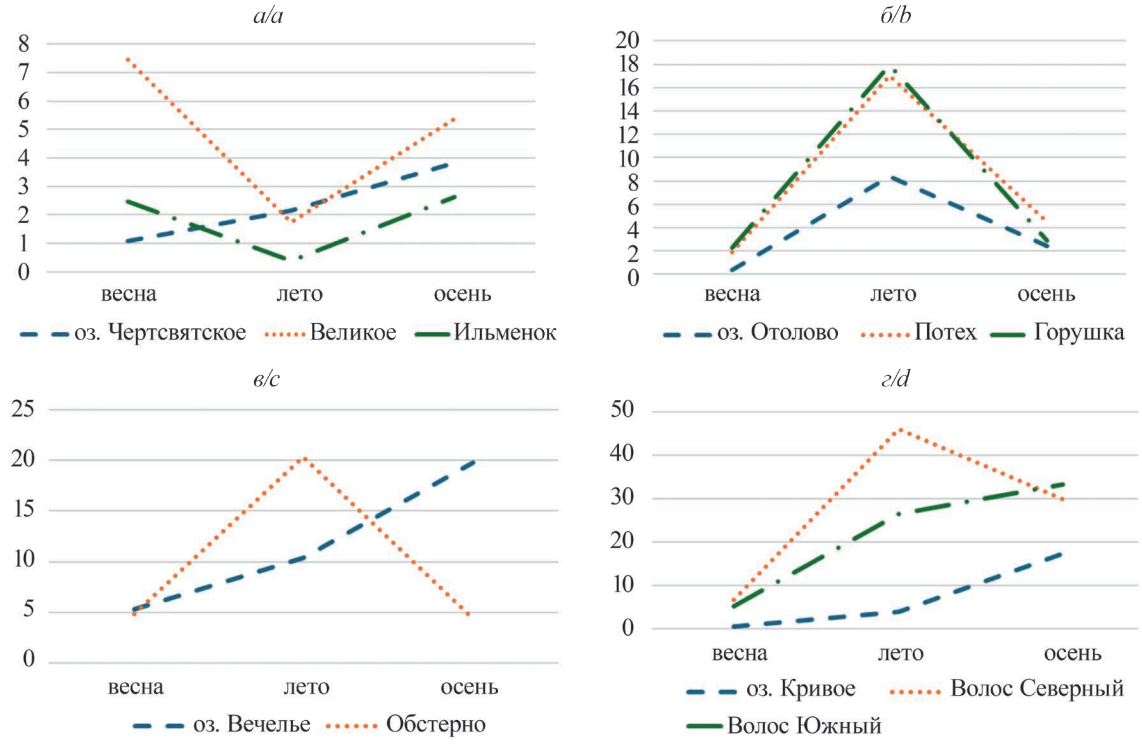


Рис. 2. Сезонная динамика группы MBFG I в озерах разного трофического статуса:
а – гиперэвтрофные, *б* – эвтрофные, *в* – мезотрофные, *г* – мезотрофные с чертами олиготрофии

Fig. 2. Seasonal dynamics of the MBFG I group in lakes of different trophic status:
a – hypereutrophic, *b* – eutrophic, *c* – mesotrophic, *d* – mesotrophic with oligotrophic features

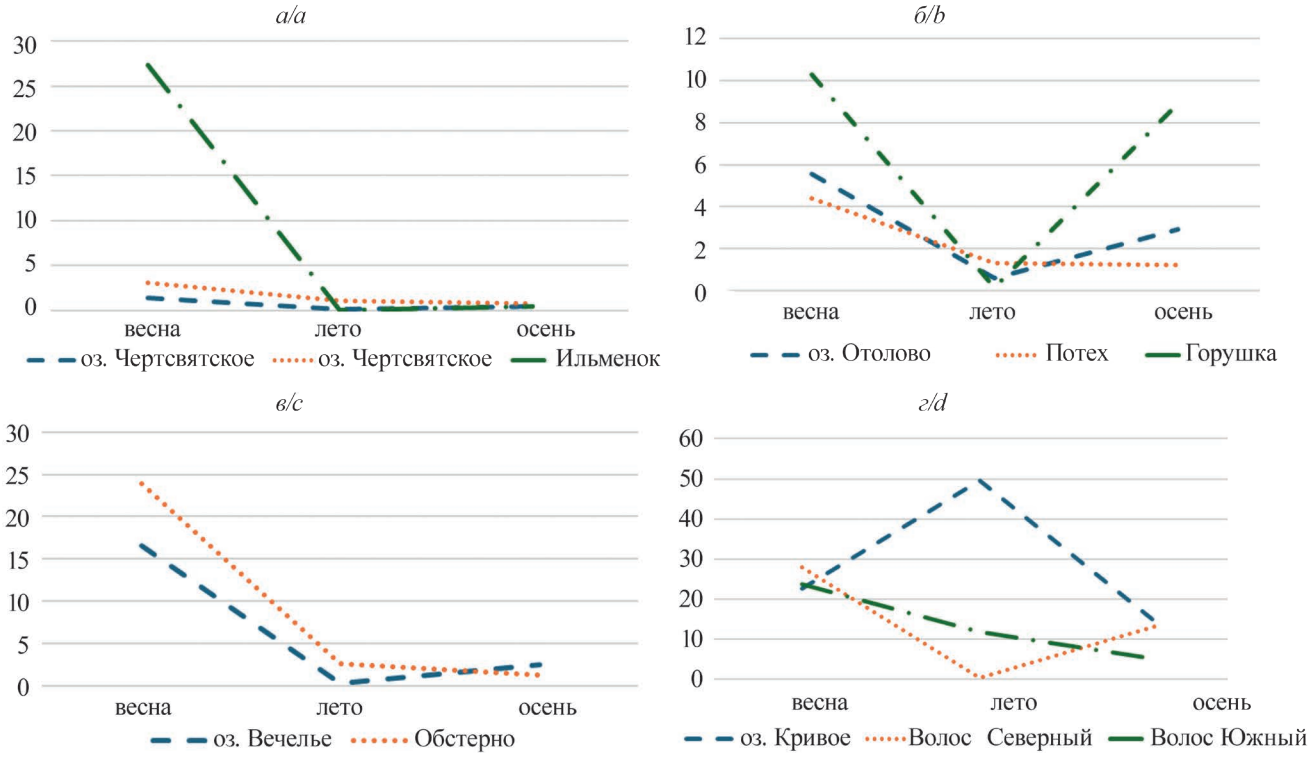


Рис. 3. Сезонная динамика группы MBFG II в озерах разного трофического статуса:
а – гиперэвтрофные, *б* – эвтрофные, *в* – мезотрофные, *г* – мезотрофные с чертами олиготрофии

Fig. 3. Seasonal dynamics of the MBFG II group in lakes of different trophic status:
a – hypereutrophic, *b* – eutrophic, *c* – mesotrophic, *d* – mesotrophic with oligotrophic features

Группа MBFG IV (средние одиночные формы) не демонстрировала выраженных закономерностей, связанных с трофическим статусом водоемов. Ее вклад в биомассу фитопланктона был относительно невелик и варьировал в пределах от 0,2 % в оз. Черствятское в весенний период до 16 % в оз. Великое в летний период. Четкой сезонной динамики также не наблюдалось. Вероятно, это связано с широкой экологической пластичностью представителей данной группы, способных существовать в различных условиях среды.

Группы MBFG V (крупные жгутиковые формы) и *MBFG VI* (диатомовые водоросли) также не продемонстрировали однозначной зависимости от основных интегральных показателей, определяющих трофического статус водоемов. Для MBFG V характерна высокая межсезонная и межводоемная вариабельность без выраженных закономерностей. MBFG VI характеризуется более упорядоченной сезонной динамикой с повышением вклада в периоды весеннего и в ряде случаев летнего развития, однако ее распределение не демонстрирует прямой связи с градиентом трофности. Отсутствие статистически значимых корреляций с биомассой и прозрачностью воды подтверждает, что данные группы в большей степени отражают сезонные сукцессионные процессы, чем уровень трофического состояния водоемов.

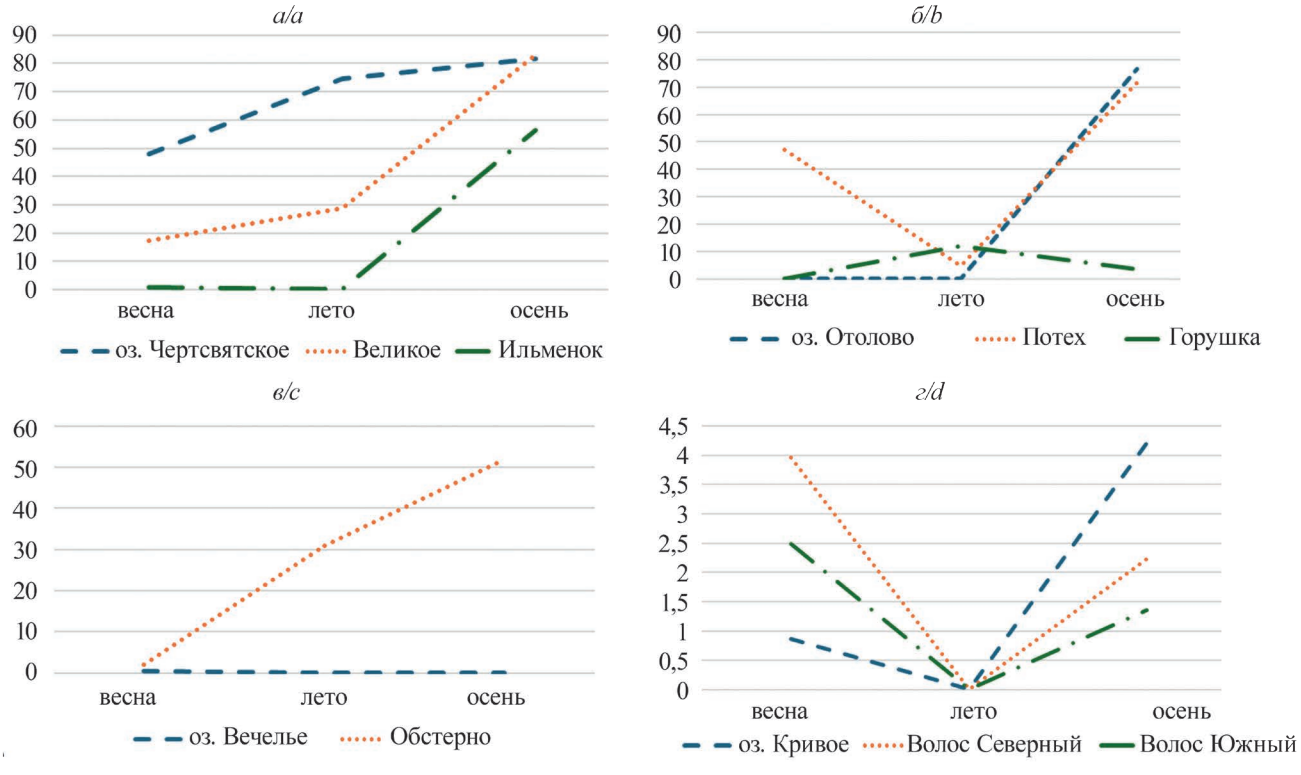


Рис. 4. Сезонная динамика группы MBFG III в озерах разного трофического статуса:
а – гиперэвтрофные, *б* – эвтрофные, *в* – мезотрофные, *г* – мезотрофные с чертами олиготрофии

Fig. 4. Seasonal dynamics of the MBFG III group in lakes of different trophic status:
a – hypereutrophic, *b* – eutrophic, *c* – mesotrophic, *d* – mesotrophic with oligotrophic features

Анализ сезонной динамики группы *MBFG VII* показал, что вклад данной группы варьировал в зависимости от трофического статуса водоемов, однако выраженного однонаправленного тренда не наблюдалось (рис. 5.)

В гиперэвтрофных озерах (Великое, Ильменок, Чертсвятское) доля MBFG VII в общей биомассе в целом была невысока и характеризовалась значительными колебаниями. В оз. Великое отмечался относительно высокий вклад весной с резким снижением летом, тогда как в оз. Ильменок наблюдалось увеличение доли группы к осени. В эвтрофных водоемах (Потех, Горушка, Отолово) наблюдалась более выраженная динамика: для всех озер был характерен умеренный летний максимум с последующим снижением осенью. Однако абсолютные значения оставались относительно низкими. В мезотрофных озерах (Вечелье, Обстерно) сезонные изменения носили разнонаправленный характер: в оз. Вечелье фиксировался максимум летом с последующим снижением, тогда как в оз. Обстерно наблюдалось постепенное уменьшение вклада группы от весны к осени. В озерах мезотрофного типа с чертами олиготрофии (Кривое, Северный и Южный Волос) вклад MBFG VII, напротив, увеличивался в течение вегетационного периода, достигая максимальных значений осенью, особенно в оз. Южный Волос (до 23 %).

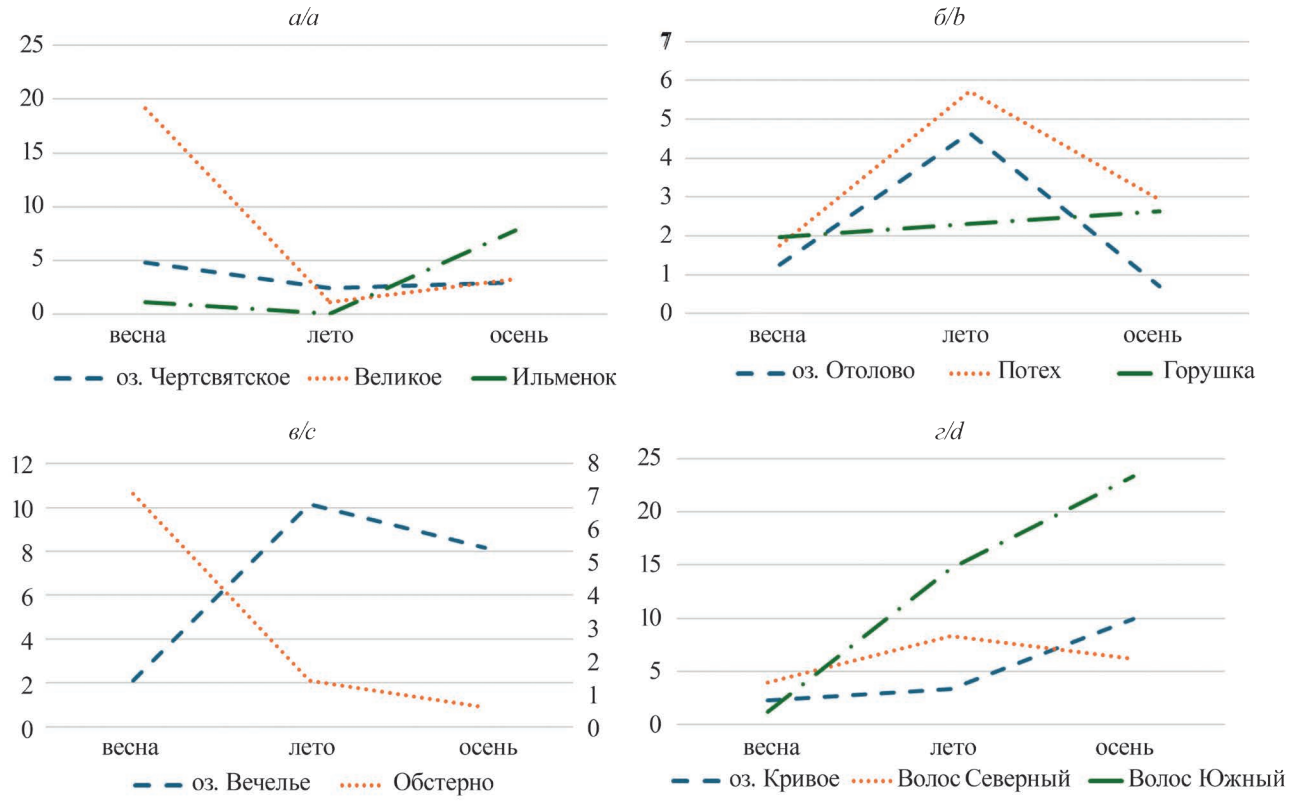


Рис. 5. Сезонная динамика группы MBFG VII в озерах разного трофического статуса:
а – гиперэвтрофные, *б* – эвтрофные, *в* – мезотрофные, *г* – мезотрофные с чертами олиготрофии

Fig. 5. Seasonal dynamics of the MBFG VII group in lakes of different trophic status:
a – hypereutrophic, *b* – eutrophic, *c* – mesotrophic, *d* – mesotrophic with oligotrophic features

Заключение

В результате проведенного исследования впервые для озер Белорусского Поозерья разного трофического статуса был применен подход морфологических функциональных групп (MBFG) для анализа размерно-структурной организации фитопланктонных сообществ.

Корреляционный анализ выявил статистически значимые связи между долями MBFG-групп в общей биомассе фитопланктона и показателями трофности. Группы мелких одиночных (MBFG I) и мелких жгутиковых (MBFG II) форм отрицательно коррелируют с биомассой и положительно с прозрачностью, что указывает на их развитие в условиях низкой трофности. Группа нитчатых цианобактерий (MBFG III) положительно связана с биомассой и отрицательно с прозрачностью, отражая усиление их роли при эвтрофировании.

Сезонная динамика показала, что в гиперэвтрофных озерах на протяжении всего сезона доминируют нитчатые формы (MBFG III), достигая максимума поздним летом (до 83 %). В мезотрофных озерах и водоемах с чертами олиготрофии ведущую роль играют MBFG I–II, особенно летом. Группы MBFG IV–VII не показали однозначной связи с трофностью, что, вероятно, связано с их экологической пластичностью или зависимостью от сезонных сукцессий.

Таким образом, размерную структуру фитопланктона следует оценивать не только через объем клеток, но и через морфофункциональные признаки, что дает более адекватное представление о реакции сообществ на эвтрофирование и сезонные изменения.

Библиографические ссылки

1. Erdoğan S, Beklİoğlu M, Litchman E, Miller ET, Levi EE, Bucak T, Tavşanoğlu ÜlN. Determinants of phytoplankton size structure in warm, shallow lakes. *Journal of Plankton Research*. 2021;43(3):353–366. https://doi.org/10.1093/plankt/fbab035.

2. Sieburth J, Smetacek V, Lenz J. Pelagic ecosystem structure: Heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. *Limnology and Oceanography*. 1978;23(6):1256–1263.

3. Ignatiades L. Redefinition of cell size classification of phytoplankton – a potential tool for improving the quality and assurance of data interpretation. *Mediterranean Marine Science.* 2015;17(1):56–64.

4. Kruk C, Huszar VLM, Peeters ET HM, Bonilla S, Costa L, Rling ML, Reynolds CS, Scheffer M. A morphological classification capturing functional variation in phytoplankton. *Freshwater Biology.* 2010;(3):614–627. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02298.x.

5. Мордухай-Болтовский ФД. *Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов.* Москва: Наука; 1975. 240 с.

6. Mikheyeva TM. Methods of quantitative enumeration of nanophytoplankton (review). *Hydrobiological Jornal*. 1989;25:3–21.

7. Голлербах ММ, и др. *Определитель пресноводных водорослей СССР. В 14 томах.* Ленинград: Наука, Ленинградское отделение; 1951–1983.

8. Komárek J, Anagnostidis K. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Cyanoprokaryota. Oscillatoriales. München: Elsevier Spektrum Akademischer Verlag; 2005. 759 p.

9. Михеева ТМ. *Флора водорослей Беларуси. Таксономический каталог.* Минск: БГУ; 1999. 396 с.

10. Китаев СП. *Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон.* Москва: Наука; 1984. 207 с.

11. Irwin AJ, Finkel ZV, Schofield OME, Falkowski PG. Scaling-up from nutrient physiology to the size-structure of phytoplankton communities. *Journal of Plankton Research*. 2026;28(5):459–471. https://doi.org/10.1093/plankt/fbi148.

12. Litchman E, Klausmeier C. Trait-Based Community Ecology of Phytoplankton. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics.* 2008;39:615–639. DOI:10.1146/annurev.ecolsys.39.110707.173549.

13. Wang Z, Akbar S, Sun Yu, Gu L, Zhang L, Lyu K, Huang Yu, Yang Zh. Cyanobacterial dominance and succession: factors and mechanisms. *Journal of Environmental Management*. 2021;287:112321. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112321.

14. Reynolds CS. The Ecology of Phytoplankton. New York: Cambridge University Press; 2006. 535 p.

15. Sommer U, Gliwicz ZM, Lampert W, Duncan A. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Hydrobiologie.* 1986;106(4):433–471. DOI:10.1127/archiv-hydrobiol/106/1986/433.

References

1. Erdoğan S, Beklİoğlu M, Litchman E, Miller ET, Levi EE, Bucak T, Tavşanoğlu ÜlN. Determinants of phytoplankton size structure in warm, shallow lakes. *Journal of Plankton Research*. 2021;43(3):353–366. https://doi.org/10.1093/plankt/fbab035.

2. Sieburth J, Smetacek V, Lenz J. Pelagic ecosystem structure: Heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. *Limnology and Oceanography*. 1978;23(6):1256–1263.

3. Ignatiades L. Redefinition of cell size classification of phytoplankton – a potential tool for improving the quality and assurance of data interpretation. *Mediterranean Marine Science.* 2015;17(1):56–64.

4. Kruk C, Huszar VLM, Peeters ET HM, Bonilla S, Costa L, Rling ML, Reynolds CS, Scheffer M. A morphological classification capturing functional variation in phytoplankton. *Freshwater Biology.* 2010;(3):614–627. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02298.x.

5. Mordechai-Boltovsky FD. *Metodika izucheniya biogeocenozov vnutrennih vodoemov* [Methodology for studying biogeocenoses of inland water bodies]. Moscow: Nauka; 1975: 240 p. Russian

6. Mikheyeva TM. Methods of quantitative enumeration of nanophytoplankton (review). *Hydrobiological Jornal*. 1989;25:3–21.

7. Gollerbach MM, et al. *Opredelitel' presnovodnyh vodoroslej SSSR. V 14 tomakh* [Key to freshwater algae of the USSR. In 14 volumes]. Leningrad: Nauka, Leningradskoe otdelenie; 1951–1983. Russian.

8. Komárek J, Anagnostidis K. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Cyanoprokaryota. Oscillatoriales. München: Elsevier Spektrum Akademischer Verlag; 2005. 759 p.

9. Miheeva TM. *Flora vodoroslej Belarusi: Taksonomicheskij katalog* [Algal flora of Belarus: Taxonomic catalogue]. Minsk: BSU; 1999. 396 p. Russian.

10. Kitaev SP. *Ekologicheskie osnovy bioproduktivnosti ozyor raznyh prirodnyh zon* [Ecological foundations of bioproductivity of lakes in different natural zones]. Moscow: Nauka; 1984. 207 p. Russian.

11. Irwin AJ, Finkel ZV, Schofield OME, Falkowski PG. Scaling-up from nutrient physiology to the size-structure of phytoplankton communities. *Journal of Plankton Research*. 2026;28(5):459–471. https://doi.org/10.1093/plankt/fbi148.

12. Litchman E, Klausmeier C. Trait-Based Community Ecology of Phytoplankton. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics.* 2008;39:615–639. DOI:10.1146/annurev.ecolsys.39.110707.173549.

13. Wang Z, Akbar S, Sun Yu, Gu L, Zhang L, Lyu K, Huang Yu, Yang Zh. Cyanobacterial dominance and succession: factors and mechanisms. *Journal of Environmental Management*. 2021;287:112321. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112321.

14. Reynolds CS. The Ecology of Phytoplankton. New York: Cambridge University Press; 2006. 535 p.

15. Sommer U, Gliwicz ZM, Lampert W, Duncan A. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Hydrobiologie.* 1986;106(4):433–471. DOI:10.1127/archiv-hydrobiol/106/1986/433.

Статья поступила в редколлегию 20.05.2026.
Received by editorial board 20.05.2026.