

УДК 574.583(571.5)

К ИЗУЧЕНИЮ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ И БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ НА ЦЕНОТИЧЕСКУЮ И ФЛОРИСТИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ СООБЩЕСТВ МИКСОТРОФНЫХ ФИТОФЛАГЕЛЛЯТ КРУПНЫХ СУБАРКТИЧЕСКИХ РЕК ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Габышев В.А., Габышева О.И.

ФГБУН «Институт биологических проблем криолитозоны» Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, e-mail: v.a.gabyshev@yandex.ru

В результате последних исследований в составе планктона крупных рек Восточной Сибири нами было выявлено 88 видов фитофлагеллят из отделов динофитовых, золотистых и эвгленовых водорослей. По нашим данным в водах исследованных рек региона отмечается высокое содержание органических и биогенных веществ, что является характерным для рек, протекающих в районах со сплошным распространением вечномерзлых грунтов. Известно, что фитофлагелляты, являясь миксотрофами, способны при определенных условиях переходить к потреблению органических веществ, растворенных в воде или находящихся во взвешенном состоянии в виде частиц. Цель настоящего исследования – определить особенности пространственной структуры сообществ миксотрофных жгутиковых планктонных водорослей и степень их зависимости от содержания в воде органических веществ и биогенных элементов в условиях крупных субарктических рек Восточной Сибири. В результате кластеризации определено, что наиболее богатая миксотрофами в ценотическом и флористическом отношении группа объединяет лишь 5% наблюдений и приурочена в основном к Колымскому водоохранилищу. Группа со значительным видовым богатством и невысокой численностью миксотрофов локализована преимущественно в низовьях рек арктического бассейна. Результаты дискриминантного анализа свидетельствуют, что биогены (NH_4 , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, $\text{P}_{\text{общ}}$) влияют на численность миксотрофов, а число видов теснее связано с концентрацией органических веществ.

Ключевые слова: миксотрофы, фитофлагелляты, фитопланктон, биогены, органика, крупные реки, Восточная Сибирь

ON THE STUDY OF NUTRIENTS AND ORGANIC MATTER IMPACT ON SPATIAL STRUCTURE OF MIXOTROPHIC PHYTOFLAGELLATES OF EAST SIBERIAN LARGE SUBARCTIC RIVERS

Gabyshev V.A., Gabysheva O.I.

Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, e-mail: v.a.gabyshev@yandex.ru

As a result of the latest research, 88 species of phytoflagellates (Dinophyta, Chrysophyta, Euglenophyta) were identified in the plankton of the large rivers of Eastern Siberia. According to our data, a high concentration of organic matter and nutrients in the waters of the studied rivers of the region was detected. It is obviously representative of rivers shared by the area of continuous permafrost. It is known that phytoflagellates, being mixotrophs, are able under certain conditions to switch to the consumption of organic matter dissolved in water or suspended in the form of particles. The aim of this study is to determine the features of the spatial structure of the mixotrophic phytoflagellates communities of plankton and the degree of organic matter and nutrients impact in the conditions of the large subarctic rivers of Eastern Siberia. As a result of clustering, it is determined that the most rich in density and species number of mixotrophs cluster, unites only 5% of observations and is confined mainly to the Kolyma Reservoir. Another cluster, characterized by considerable species richness and a small density of mixotrophs, is located mainly in the lower reaches of the rivers of the Arctic basin. The results of discriminant function analysis indicate that the nutrients (NH_4 , Total Iron, Total Phosphorus) affect the density of mixotrophs, and the number of species is closely related to the concentration of organic matter.

Keywords: mixotrophs, phytoflagellates, phytoplankton, nutrients, organic matter, large rivers, Eastern Siberia

В результате нашего исследования фитопланктона крупных рек Восточной Сибири (2007–2011 гг.) в составе планктонных альгогруппировок было выявлено 88 видов фитофлагеллят (динофитовых, золотистых и эвгленовых водорослей), преимущественно жгутиковых форм [1]. Наши данные, на основе анализа косвенных показателей содержания органических веществ (цветность, БПК₅, ХПК), показывают высокое содержание в речных водах органики, а также повышенное содержание комплекса биогенных веществ, что характерно для поверх-

ностных вод территорий со сплошным распространением вечномерзлых грунтов [2].

Как известно, фитофлагелляты способны к миксотрофному питанию и при определенных условиях могут переходить к непосредственному потреблению органических веществ [3–5].

Цель настоящего исследования – определить особенности пространственной структуры сообществ миксотрофных жгутиковых планктонных водорослей и степень их зависимости от содержания в воде органических веществ и биогенных элемен-

тов в условиях крупных субарктических рек Восточной Сибири.

Материалы и методы исследования

Публикация основана на материалах сборов фитопланктона 12 крупных рек Восточной Сибири: Лена, Вилюй, Колыма, Алдан, Оленёк, Витим, Индигирка, Амга, Олёкма, Анабар, Яна и Чара (рис. 1). Район исследований простирается в меридиональном направлении от $106^{\circ}53'$ до $160^{\circ}58'$ в.д., и в широтном – от $56^{\circ}13'$ до $73^{\circ}10'$ с.ш. Всего было отобрано 800 планктонных альгологических и 340 гидрохимических проб, как в прибрежной зоне, так и по фарватеру, из поверхностного горизонта воды (0–0,3 м), в летнюю межень (июнь – август) в период максимальной вегетации фитопланктона в 2000–2011 гг. Сбор и обработка проб фитопланктона выполнены в соответствии с методами, принятыми в гидробиологии [6]. Фиксирование гидрохимических проб в полевых условиях и последующий их лабораторный анализ проведены согласно общепринятым методикам [7].

Для кластеризации наблюдений использовалось евклидово расстояние с применением алгоритма Варда [8]. Предварительно, для устранения доминирования признаков разных масштабов, проведена процедура стандартизации, т.е. преобразование в признаки с нулевыми средними и единичными стандартными отклонениями. Исследование результатов кластеризации выполнено с помощью однофакторного дисперсионного анализа. Для анализа взаимосвязи между одним качественным признаком, выступающим в роли зависимого, результирующего показателя, и подмножеством количественных признаков, использовался дискриминантный анализ с пошаговым алгоритмом включения и исключения предикторов [9]. Процедуры статистического анализа выполнялись с помощью программного пакета STATISTICA 10.

Результаты исследования и их обсуждение

Для выявления скрытых групп наблюдений, которые невозможно получить априорно,

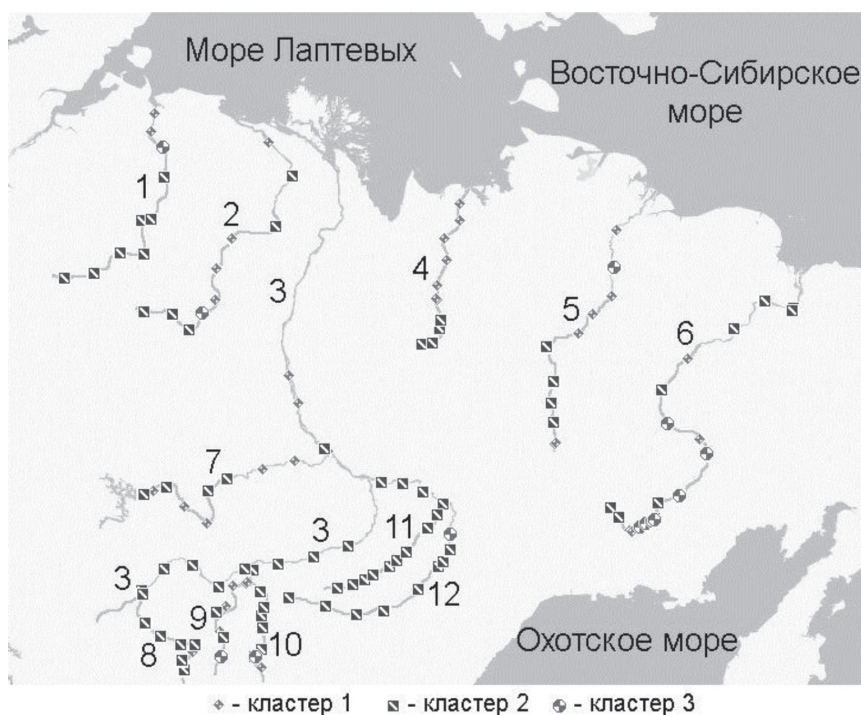


Рис. 1. Карта района исследований и пункты наблюдений, классифицированные по градации CL_3M (номераи отмечены реки: 1 – Анабар, 2 – Оленёк, 3 – Лена, 4 – Яна, 5 – Индигирка, 6 – Колыма, 7 – Вилюй, 8 – Витим, 9 – Чара, 10 – Олёкма, 11 – Амга, 12 – Алдан)

Анализируемый массив данных включает 14 количественных переменных. Четыре из них характеризуют показатели развития миксотрофных фитопланктона: число видов и доля от общего числа видов фитопланктона, численность и доля от общей численности фитопланктона. Три переменные являются косвенными показателями органического вещества в воде (цветность, БПК₅, ХПК) и семь – это основные биогенные элементы (NH₄, NO₂, NO₃, PO₄, P_{общ}, Si, Fe_{общ}). В массив включены только 303 наблюдения, по которым отсутствуют пропуски, которые недопустимы при статистической обработке данных.

на основе эмпирического деления, был произведен поиск путем кластеризации данных по показателям развития миксотрофных фитопланктона. Поскольку анализируемые признаки имеют разные масштабы и шкалы, для устранения доминирования отдельных признаков с максимальными числовыми значениями, перед кластеризацией была проведена стандартизация признаков. В результате было выделено три кластера, в табл. 1 приведены средние значения переменных внутри класте-

ров и итоги их сравнения с помощью однофакторного дисперсионного анализа. Данные ранжированы по величине F-критерия, таким образом, в верхней части таблицы расположены те признаки, по которым установлено максимальное различие между кластерами. Достигнутые уровни значимости подтверждают достоверность анализа.

На графике средних стандартизованных значений признаков по трем кластерам видно, что наблюдения из третьей градации новой категориальной переменной *CL_3M* отличаются наибольшими значениями по всем четырем признакам миксотрофов (рис. 2). Первый и второй кластеры схожи по численности миксотрофов и по ее доле в общей численности планктона, но по числу миксотрофных видов и доле миксотрофов в общем числе видов планктона, наблюдения первого кластера превышают наблюдения второго.

Географическое расположение выделенных кластеров представлено на рис. 1. Третий, самый богатый по видовому составу и наиболее обильный по численности мик-

сотрофов кластер, объединяет только 16 из 303 наблюдений. Они локализованы главным образом в Колымском водохранилище и на участке р. Колымы ниже его плотины. Отдельные наблюдения этого кластера относятся к рр. Алдан, Чара, Олёкма, Анабар, Оленёк и Индигирка в районе притоков этих рек: Куолума, Апсат, Хани, Средняя, Чомурдах и Бол. Эрча.

Первый и второй кластеры объединили остальную часть наблюдений, которые распределены между двумя градациями достаточно равномерно. Первый кластер, характеризующийся значительным видовым богатством миксотрофов, включает 133 наблюдения и локализован преимущественно в арктических реках, главным образом в их низовьях, а также на р. Вилюй. Второй кластер, отличающийся наименьшими значениями по всем признакам миксотрофов, локализован преимущественно в реках центральной и южной части региона, а также главным образом на верхних участках арктических рек.

Таблица 1

Значения групповых средних для показателей численности и видового богатства миксотрофных видов и достоверность различий между ними

Параметр	Кластеры			F	p
	1	2	3		
VAR1 (Доля численности миксотрофов от общей численности планктона, %)	6,46	0,90	65,05	358,45	0,0000
VAR3 (Число миксотрофных видов)	6,30	1,58	8,25	303,02	0,0000
VAR4 (Доля миксотрофов в общем числе видов планктона, %)	10,67	3,16	16,04	243,28	0,0000
VAR2 (Численность миксотрофов, кл/л)	2409,71	345,34	42993,07	116,25	0,0000

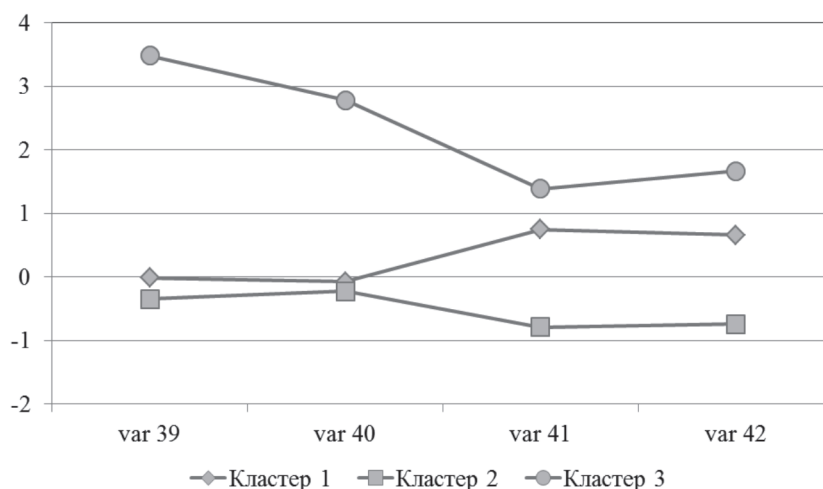


Рис. 2. Средние стандартизованные значения признаков градации *CL_3M*

Различие между грациями переменной CI_3M по показателям содержания органики и биогенов исследовано с применением дискриминантного анализа. В табл. 2 представлены признаки, вошедшие в дискриминантные функции в результате пошагового анализа, а также достигнутый уровень значимости для каждого признака. В данной таблице приведены стандартизованные коэффициенты для двух дискриминантных осей. Ранжировав их модуль, можно оценить степень вклада отдельных признаков (предикторов) в дискриминантные функции (оси). Видно, что для первой дискриминантной оси максимальный вес характерен для переменной VAR6 (NH_4 , мг/л), VAR12 ($Fe_{общ}$, мг/л), VAR10 ($P_{общ}$, мкг/л), а для второй оси – VAR13 (ХПК, мг/л). Уровень значимости по всем предикторам подтверждает их пригодность для анализа.

На рис. 3 приведён график распределения наблюдений всех 3-х кластеров градации CI_3M в двух дискриминантных осях.

Видно, что четкой локализации наблюдений, принадлежащих к разным кластерам, нет ни по одной из осей. Следовательно, связь между признаками является достоверной, но недостаточно сильной. Однако отчетливо видно, что наблюдения первого и третьего «миксотрофных» кластеров смещены влево относительно вертикали, проведенной через первую ось «биогенов». А по второй оси «органики» в верхнюю часть графика смещены наблюдения третьего кластера.

Таким образом, среди ценологических и флористических показателей развития жгутиковых миксотрофов арктических рек исследованного региона доля численности фитофлагеллят в общей численности фитопланктона является тем признаком, по которому выявленные кластеры градации

CI_3M наиболее сильно отличаются друг от друга. Полученные кластеры хорошо взаимно локализованы географически. Самый богатый по видовому составу и численности миксотрофов кластер объединяет лишь 5% пунктов наблюдений, большая часть из которых приурочена к Колымскому водохранилищу. Кластер, характеризующийся значительным видовым богатством миксотрофов при невысокой их численности, локализован главным образом в низовьях рек арктического бассейна. Результаты дискриминантного анализа свидетельствуют, что среди биогенных веществ наиболее сильную связь с развитием миксотрофов проявили ионы аммония, железо общее и фосфор общий, а среди косвенных показателей органического вещества – ХПК. Проведенный нами анализ показал, что наличие биогенных веществ больше влияет на численность миксотрофов, а число видов теснее связано с концентрацией органических веществ.

Выводы

Построенная нами модель пространственного распределения миксотрофных фитофлагеллят крупных субарктических рек Восточной Сибири свидетельствует о четкой географической локализации выделенных групп. Результаты исследования подтверждают значительную степень влияния на развитие миксотрофов как органических веществ, так и некоторых биогенов. Однако, поскольку речной планктон представляет собой сложную динамическую систему, при ее моделировании крайне трудно учесть все факторы. Учитывая, что выявленная связь достоверна, но недостаточно отчетлива, очевиден вывод о том, что на развитие миксотрофов влияние оказывают и другие факторы среды.

Таблица 2

Предикторы, вошедшие в модель дискриминантной функции для градации CI_3M

Предиктор	Стандартизованные коэффициенты канонических переменных		Уровень значимости (p)
	Корень 1	Корень 2	
VAR5 (Цветность, град.)	-0,091360	0,37429	0,0000
VAR6 (NH_4 , мг/л)	0,647364	-0,60386	0,0000
VAR7 (NO_2 , мкг/л)	0,162050	-0,66185	0,0000
VAR8 (NO_3 , мг/л)	0,153457	-0,39315	0,0000
VAR9 (PO_4 , мкг/л)	0,215951	-0,29066	0,0000
VAR10 ($P_{общ}$, мкг/л)	0,584769	-0,51653	0,0047
VAR11 (Si, мг/л)	0,388838	0,00148	0,0000
VAR12 ($Fe_{общ}$, мг/л)	0,593692	0,39584	0,0000
VAR13 (ХПК, мг/л)	-0,505157	1,06351	0,0000
VAR14 (БПК ₅ , мг/л)	-0,122922	0,07869	0,0000

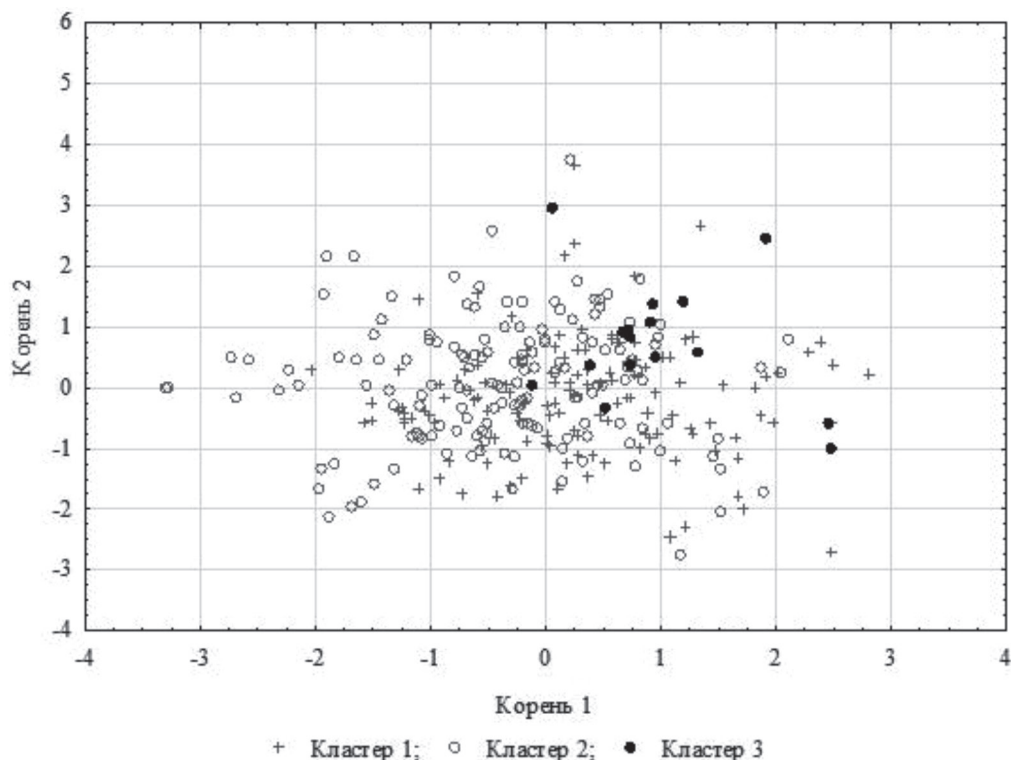


Рис. 3. Диаграмма рассеяния наблюдений градации CI_{3M} в двух дискриминантных осях

Работа выполнена в рамках госзадания ИБПК СО РАН на 2017–2020 гг. по теме «Фундаментальные и прикладные аспекты изучения разнообразия растительного мира Северной и Центральной Якутии» (0376-2018-0001; рег. номер АААА-А17-117020110056-0).

Список литературы

1. Габышев В.А. Фитопланктон крупных рек Якутии и сопредельных территорий Восточной Сибири / В.А. Габышев, О.И. Габышева. – Новосибирск, 2018. – 416 с.
2. Development of a pan-Arctic database for river chemistry / McClelland J.W et al. // Eos Transactions-American Geophysical Union. 2008. Vol. 89, № 24. P. 217–224.
3. Triemer R.E. Photosynthetic Euglenoids / R.E. Triemer, B. Zakrys // Freshwater Algae of North America: Ecology and Classification, Second edition.– Elsevier Science, 2015. P. 459–483.
4. Nicholls K.H. Chrysophyceae and Phaeothamniophyceae / K.H. Nicholls, D E. Wujek // Freshwater Algae of North America: Ecology and Classification, Second edition.– Elsevier Science, 2015. P. 537–586.
5. Carty S. Dinoflagellates / S. Carty, M.W. Parrow // Freshwater Algae of North America: Ecology and Classification, Second edition. Elsevier Science, 2015. P. 773–807.
6. Садчиков А.П. Методы изучения пресноводного фитопланктона: методическое руководство / А.П. Садчиков. – М., 2003. – 157 с.
7. Семенов А.Д. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / А.Д. Семенов. – Л., 1977. – 540 с.
8. Ланг Т.А. Как описывать статистику в медицине. Аннотированное руководство для авторов, редакторов и рецензентов / Т.А. Ланг, М. Сессик. – М.: Практическая медицина, 2011. – 480 с.
9. Павлушков И.В. Основы высшей математики и математической статистики / И.В. Павлушков [и др.]. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008. – 424 с.