

## ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ

### Экология

УДК 574.583:574.632

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-4-6

### К изучению влияния тяжелых металлов на развитие фитопланктона озер г. Якутска и окрестностей

В.А. Габышев, О.И. Габышева

*Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, Россия*

*v.a.gabyshev@yandex.ru*

**Аннотация.** По данным собственных наблюдений, в фитопланктоне 11 озер на территории г. Якутск и пригорода определены видовой состав фитопланктона, его общая численность, а также выявлен комплекс доминирующих видов. Одновременно с альгологическими наблюдениями проведена оценка содержания в воде ионов четырех тяжелых металлов (меди, никеля, марганца и цинка). По ряду химических компонентов выявлено превышение ПДК. Из полученных данных был сформирован массив, включающий 24 количественные непрерывные переменные, характеризующие концентрацию тяжелых металлов и показатели развития фитопланктона. Путем последовательного применения к полученному массиву данных различных методов статистического анализа выявлена значимая связь между концентрацией в воде ионов тяжелых металлов и показателями развития фитопланктона. Доказано, что повышенная концентрация цинка и меди вызывает сокращение общей численности фитопланктона, его видового богатства, а также влияет на изменение в составе доминирующих видов, когда доминанты из цианопрокариот замещаются представителями диатомовых водорослей. Подтверждена перспективность изучения влияния ионов тяжелых металлов на живые компоненты водной экосистемы городских озер Якутска, а также пригодность фитопланктона в качестве тест-объекта для таких исследований.

**Ключевые слова:** тяжелые металлы, численность фитопланктона, видовое богатство, виды-доминанты, городские озера, Якутск.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственного задания “Фундаментальные и прикладные аспекты изучения разнообразия растительного мира Северной и Центральной Якутии” (№ АААА-А17-117020110056-0).

#### Введение

Тяжелые металлы являются одной из наиболее опасных групп поллютантов [1]. Результаты исследований гидрохимического состава вод озер г. Якутск свидетельствуют о широком распространении тяжелых металлов [2]. По данным мониторинга, содержание таких микроэлементов, как свинец, медь, цинк и марганец, в якутских городских озерах не превышает ПДК<sub>кб</sub>, но в условиях современного антропогенного воздействия имеет тенденцию к увеличению [3]. Применительно к нормативам, принятым для водоемов, используемых для рыбохозяйственных целей, содержание меди в водах якутских

городских озер достигает 1 ПДК<sub>вр</sub> [4]. Оценка токсического загрязнения донных отложений озер г. Якутск с учетом повышенной концентрации в них различных компонентов, в том числе и тяжелых металлов, была предпринята в публикации Т.П. Трофимовой [5] с использованием в качестве тест-объекта личинок хирономид. Вопросу накопления микроэлементов в стебле и корнях камыша, произрастающего в озерах г. Якутск, посвящена работа В.Н. Макарова [6]. Исследований воздействия тяжелых металлов на планктонных обитателей озер г. Якутск ранее не проводилось. Фитопланктон часто используется как индикатор, позволяющий выявлять ухудшение

состояния водной экосистемы на начальной стадии. Изучение собственно водорослевых сообществ городских озер было начато в 1964–1966 гг., когда для оз. Хатынг-Юрях, Ытык-Кюель и Белое были получены данные о сезонной динамике развития фитопланктона [7]. Мониторинговые исследования были продолжены в 1990–1996 гг. и расширены на озерах Сайсары, Теплое, Талое, Сергелях, Кызыл-Кюель, Белое и Соленое [8]. Изучению биоразнообразия эпифитных водорослей городских озер на примере оз. Сергелях посвящена работа Л.И. Копыриной [9]. Диатомовый анализ поверхностных осадков ряда озер долины Туймаада был выполнен в работе Л.А. Пестряковой [10].

Цель настоящей работы – используя собственные альгологические и гидрохимические данные о нескольких городских и пригородных озерах Якутска, с последовательным применением различных статистических методов, определить характер воздействия содержания в воде четырех тяжелых металлов (медь, никель, марганец и цинк) на показатели развития фитопланктона.

### Материалы и методы исследования

Материалом для исследования послужили сборы альгологических и гидрохимических проб в июле 2019 г. Пробы отбирались в 19 точках из 11 озер на территории г. Якутск и пригорода: Губинское, Белое, Хатынг-Юрях, Ытык-Кюель, Сергелях, Сайсары, Талое, Теплое, Атласовское и два безымянных озера в окрестностях с. Табага и хатасского свинокмплекса.

В работе использованы единые, общепринятые унифицированные методики сбора и обработки альгологического материала [11]. Пробы воды отобраны в прибрежной зоне из поверхностного горизонта (0–0,3 м). Отбор проб фитопланктона произведен планктонной сетью Апштейна (фильтровальная ткань SEFAR NITEX, размером ячеи 30 мкм), образцы для изучения количественного развития планктонных водорослей получены путем фильтрации 10–20 л воды. Всего отобрано 38 альгологических проб (19 проб на качественный состав фитопланктона, 19 – для изучения его количественного развития). Определение видового состава проводилось на фиксированном материале. Пробы фитопланктона фиксировались 40%-м раствором формальдегида в соотношении 1:10 и таким образом доводились до концентрации 4,0 %. Микроскопирование препаратов выполнено с при-

менением микроскопа Olympus BH-2. Подсчет численности клеток водорослей осуществлен на счетной камере Нажотта объемом 0,01 см<sup>3</sup>. Систематическая принадлежность каждого вида приведена в соответствие с всемирной базой данных по водорослям AlgaBase.org.

Одновременно со сбором альгологических проб и по единой сетке станций было отобрано 19 проб воды для гидрохимического анализа. Аналитические работы по выявлению массовой концентрации ионов тяжелых металлов (марганец, никель, медь, цинк) выполняли на базе Аккредитованного испытательного лабораторного центра ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Саха (Якутия)». Работы выполнены согласно стандартам РФ [12].

К данным о видовом богатстве, численности фитопланктона и отдельных видов доминантов, а также данным о содержании в озерных водах тяжелых металлов последовательно применены различные методы статистического анализа: кластеризация наблюдений, дисперсионный анализ [13] и анализ сопряженности градаций качественных группирующих переменных методом критерия согласия Пирсона хи-квадрат [14]. Процедуры статистического анализа выполнялись с помощью программного пакета STATISTICA 10.

### Результаты и обсуждение

В результате изучения собранного альгологического материала было выявлено 289 видов и разновидностей водорослей. Комплекс доминантов фитопланктона исследованных озер насчитывает 16 видов и две формы были определены нами только до рода.

Нарушений ПДК<sub>кб</sub> ни по одному из микроэлементов обнаружено не было. Однако по ПДК<sub>вр</sub> для ряда компонентов, особенно для цинка (от 1 до 2,5 ПДК<sub>вр</sub>) и меди (от 1 до 26 ПДК<sub>вр</sub>), в водах данных озер было выявлено превышение.

Из полученных в настоящем исследовании данных был сформирован массив, включающий 24 количественные непрерывные переменные. Часть переменных являются гидрохимическими признаками, характеризующими концентрацию тяжелых металлов (медь, никель, марганец и цинк). Другая часть – признаками, характеризующими фитопланктон, – общее число видов, общая численность водорослей, а также численность видов-доминантов фитопланктона.

Поскольку анализируемые признаки имеют разные масштабы и шкалы, для устранения до-

минирования отдельных признаков с максимальными числовыми значениями проведена процедура стандартизации. Для этого исходные признаки были преобразованы в признаки с нулевыми средними и единичными стандартными отклонениями. Для кластеризации использовалось евклидово расстояние с применением алгоритма Варда, который обеспечивает минимальную вариацию расстояний в получаемых кластерах [15].

С применением метода k-средних рассчитаны значения евклидова расстояния (дистанции) между центрами двух полученных кластеров (1,05) и квадрат этого расстояния (1,09). Чем больше это расстояние, тем больше различие свойств пары кластеров.

В табл. 1 приводятся средние значения переменных внутри выделенных кластеров и результаты их сравнения с помощью однофакторного дисперсионного анализа. Это информация о значениях F-критерия Фишера и уровнях статической значимости для данной величины. Чем больше F-критерий, тем меньше величина уровня значимости и тем больше различие средних значений. Данные ранжированы по убыванию F-критерия, таким образом, в верхней части таблицы расположены те признаки, по которым установлено максимальное различие между кластерами. Достигнутые уровни значимости подтверждают достоверность анализа. Как видно из таблицы, кластеризация наблюдений, основанная на концентрации тяжелых металлов (далее градация Кл\_2ТМ), образована различием по концентрации цинка и меди.

На рис. 1 приведен график, отражающий взаимные расположения средних стандартизованных значений признаков по двум кластерам. По вертикальной оси откладываются средние значения стандартизованных величин, а по горизонтальной – признак (химический компонент). Использование стандартизованных величин позволяет наглядно увидеть их соотношение. Чем дальше на графике стандартизованные средние друг от друга, тем больше разница средних значений и у нестандартизованных (исходных) признаков. Здесь легко выделить те признаки, по которым отличается каждый кластер.

Таким образом, средние наблюдений второго кластера выше по содержанию в воде цинка и меди. Разница по концентрации никеля отсутствует, а содержание марганца в воде из пунктов наблюдений первого кластера лишь незначительно больше, чем второго.

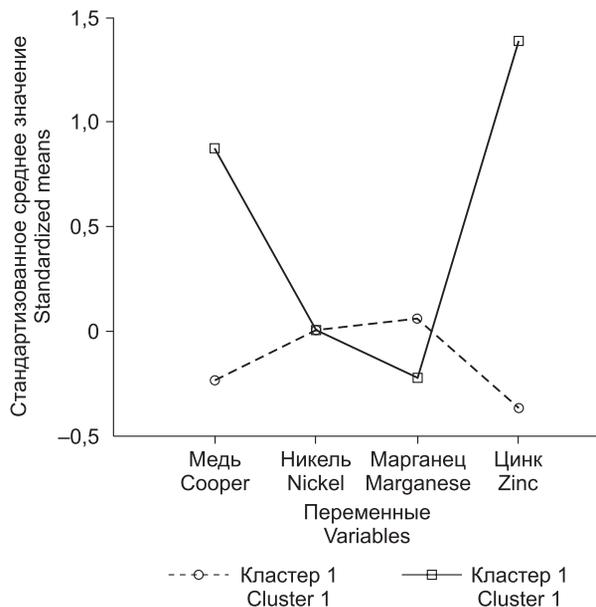


Рис. 1. Средние стандартизованные значения признаков градации Кл\_2ТМ.

Fig. 1. Plot of standardized means for each cluster of Cl\_2NM grouping variable.

Кластеризация наблюдений была также проведена по показателям развития фитопланктона. Рассчитанные с применением метода k-средних значения евклидова расстояния между центрами двух кластеров указывают на наибольшее различие между четвертым и первым, четвертым и третьим, а также третьим и первым кластерами

Таблица 1  
Значения групповых средних для концентрации тяжелых металлов и достоверность различий между ними

Table 1  
Analysis of variance for heavy metals concentration and cluster means

Параметр Variable	Кластеры Cluster number		F	p
	1	2		
Цинк, мг/дм <sup>3</sup> Zinc, mg/dm <sup>3</sup>	0,0124	0,0215	19,9	0,000
Медь, мг/дм <sup>3</sup> Copper, mg/dm <sup>3</sup>	0,0017	0,0080	4,7	0,045
Марганец, мг/дм <sup>3</sup> Manganese, mg/dm <sup>3</sup>	0,0100	0,0086	0,2	0,628
Никель, мг/дм <sup>3</sup> Nickel, mg/dm <sup>3</sup>	0,005	0,005	–	–

Таблица 2  
**Евклидово расстояние (под диагональю)  
и квадрат расстояния (над диагональю)  
для центров кластеров, выделенных  
по показателям развития фитопланктона**

Table 2  
**Euclidean distances (below diagonal)  
between phytoplankton growth indices clusters  
and squared distances (above diagonal)**

Номер кластера Cluster number	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
No. 1	0,00	2,05	3,14	3,90	2,59
No. 2	1,43	0,00	1,29	2,31	0,59
No. 3	1,77	1,14	0,00	3,30	1,81
No. 4	1,97	1,52	1,82	0,00	2,95
No. 5	1,61	0,77	1,35	1,72	0,00

(табл. 2). Пятый и второй кластеры различаются в наименьшей степени.

Результаты сравнения средних значений кластеров с помощью однофакторного дисперсионного анализа приведены в табл. 3. Согласно ранжированным величинам F-критерия, максимальное различие между кластерами достигнуто по численности цианопрокариот, потенциально способных вызывать цветение воды (*Aphanizomenon flosaquae*, *Microcystis aeruginosa* и *Coelosphaerium kuetzingianum*), общей численности фитопланктона и по числу видов водорослей (далее грация Кл\_5ФП).

На графике средних стандартизованных признаков (рис. 2) видно, что четвертый кластер отличается от остальных наименьшим числом видов водорослей и самой низкой общей численно-

Таблица 3  
**Значения групповых средних для показателей развития фитопланктона  
(общее число видов, численность фитопланктона и отдельных видов-доминантов в тыс. кл./л)  
и достоверность различий между ними**

Table 3  
**Analysis of variance for phytoplankton growth indices (total species richness,  
total phytoplankton abundance, abundance of dominants,  $\cdot 10^3$  cells/L) and cluster means**

Параметр Variable	Кластеры Clusters					F	p
	1	2	3	4	5		
<i>Aphanizomenon flosaquae</i>	12,85	86,17	3496,46	0	14,12	118,8	0,00
Численность фитопланктона Total phytoplankton abundance	134,81	358,12	3738,67	4,90	515,50	30,8	0,00
<i>Microcystis aeruginosa</i>	0	1,28	0	0	124,24	21,8	0,00
Общее число видов Total number of species	48,0	68,8	49,5	22,0	80,7	4,8	0,01
<i>Coelosphaerium kuetzingianum</i>	0	21,90	0	0	273,70	4,2	0,02
<i>Dolichospermum flosaquae</i>	0	2,86	103,53	0	0	2,9	0,06
<i>Aulacoseira granulata</i>	0	7,38	0	0	0	0,2	0,91
<i>Coelosphaerium dubium</i>	0	89,17	0	0	0	0,2	0,91
<i>Dinobryon sociale</i> var. <i>americanum</i>	0	0,89	0	0	0	0,2	0,95
<i>Mucidosphaerium pulchellum</i>	0	0,24	0	0	0	0,1	0,97
<i>Pandorina morum</i>	0	0,24	0	0	0	0,1	0,97
<i>Pediastrum subgranulatum</i>	0	1,86	0	0	0	0,1	0,97
<i>Dolichospermum scheremetieviae</i>	0	2,66	0	0	0	0,1	0,97
<i>Oscillatoria chalybea</i> f. <i>conoidea</i>	0	59,26	0	0	0	0,1	0,97
<i>Oscillatoria limosa</i>	0	49,19	0	0	0	0,1	0,97
<i>Trachelomonas volvocina</i>	0	0,36	0	0	0	0,1	0,97
<i>Gomphonema</i> sp.	0	0	0	0,95	0	–	–
<i>Navicula</i> sp.	0	0	0	1,67	0	–	–
<i>Pseudopediastrum boryanum</i>	33,3	0	0	0	0	–	–
<i>Merismopedia tenuissima</i>	60,9	0	0	0	0	–	–

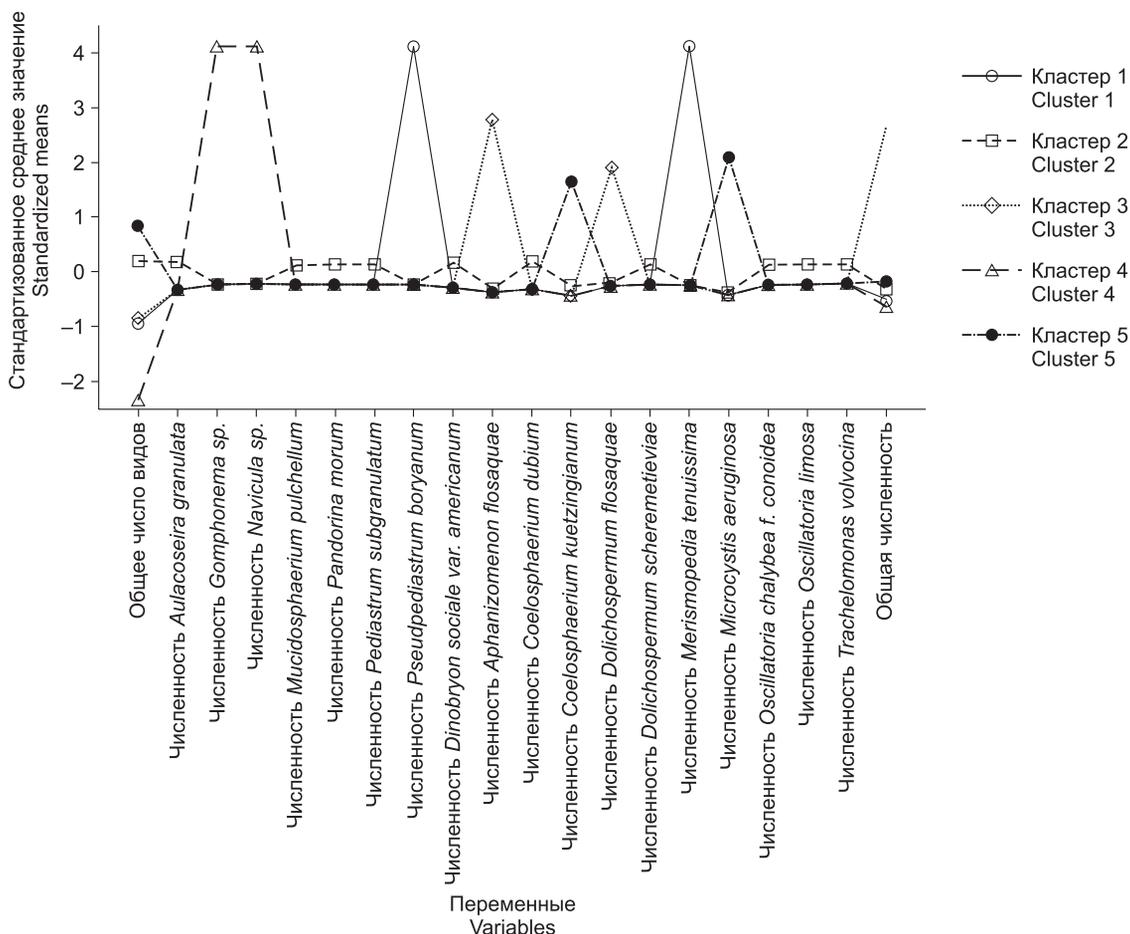


Рис. 2. Средние стандартизованные значения признаков градации Кл\_5ФП.

Fig. 2. Plot of standardized means for each cluster of Cl\_5Ph grouping variable.

стью фитопланктона, с комплексом доминантов, представленным диатомеями. Третий кластер характеризуется повышенной численностью водорослей, пятый – повышенным числом видов. В первом, третьем и пятом кластерах в комплексе доминантов преобладают цианопрокариоты.

Для анализа сопряженности градаций полученных выше двух качественных группирующих переменных был применен критерий согласия Пирсона хи-квадрат ( $\chi^2$ ), в качестве показателя интенсивности связи использован V-критерий Крамера – разновидность меры ассоциации качественных признаков, меняющийся от 0 до 1.

Критерий хи-квадрат (критерий согласия, критерий соответствия) был предложен К. Пирсоном [16] для проверки гипотез о соответствии накопленных фактических данных некоторому теоретическому закону распределения. Наряду с этим применением, в настоящее время предложено использование критерия хи-квадрат для оцен-

ки сопряженности между признаками [17, 18] и соотношения числа элементов, вошедших в разные градации качественной переменной [19].

Использование этого подхода и применение фактических данных, полученных в ходе исследований, в отсутствие теоретических частот (полученных из теоретического закона распределения) предполагает искусственное построение неких теоретических частот, с которыми будет проходить сравнение. Теоретические частоты вычисляются на основе фактических данных, исходя из условия независимости двух признаков. Критерий хи-квадрат применяется для сравнения фактических (наблюдаемых) и рассчитанных, теоретических (ожидаемых) частот. При этом, если фактическая частота выше теоретической, то связь (как и разность между этими частотами) является положительной, и наоборот.

Под ограничение на использование данного подхода попадают случаи, когда значения ожи-

Таблица 4  
**Статистики анализа сопряженности  
 качественных переменных Кл\_2ТМ  
 «тяжелые металлы» и Кл\_5ФП  
 «численность общая и отдельных видов-  
 доминантов, общее число видов»**

Table 4  
**Basic statistics of cross-tabulation analysis  
 of Cl\_2HM “heavy metals” and Cl\_5Ph  
 “total phytoplankton abundance, abundance  
 of dominants, total species richness”  
 grouping variables**

Хи-квадрат Pearson Chi-square	4,961
Уровень значимости (p) Statistical significance (p)	0,0295
V-критерий Крамера Cramer's V	0,51
Количество степеней свободы (df) Degrees of freedom (df)	4

даемых частот, вычисляемые из условия независимости двух признаков, оказываются менее 5. В этих случаях конечный результат анализа данной таблицы сопряженности (достигнутые уровни статистической значимости  $p$ ) оказывается не вполне надежным. В соответствии с теорией анализа таблиц сопряженности для двух признаков, существует ряд дополнительных алгоритмов, по которым получается более надежный результат [20]. Один из таких алгоритмов предлагает метод Монте-Карло, при этом с помощью генератора случайных величин моделируется большой набор аналогичных таблиц, на основе анализа которых вычисляются доверительные интервалы для уровня статистической значимости.

Для того чтобы оценить влияние концентрации тяжелых металлов в водах исследованных озер на развитие фитопланктона, был проведен анализ сопряженности качественных переменных Кл\_2ТМ и Кл\_5ФП (табл. 4). Достигнутый в анализе уровень значимости подтверждает достоверность полученного результата. Величина V-критерия Крамера свидетельствует об относительно сильной связи между двумя этими качественными переменными.

Из сводной таблицы результатов анализа сопряженности (табл. 5) видно, что в ряде случаев ячейки содержат значение ожидаемой частоты, которое меньше 5.

Для проверки достоверности анализа применен метод Монте-Карло (табл. 6), в рамках которого было сгенерировано 100000 случайных таблиц, имеющих аналогичную сумму по строкам и столбцам, при случайном начальном значении. Достигнутые уровни значимости подтверждают достоверность результатов анализа.

Значение критерия хи-квадрат из табл. 4 представляет собой сумму вкладов по всем ячейкам сводной табл. 5. Максимальное значение критерия хи-квадрат, а следовательно, и сила связи между признаками, находится в ячейке на пересечении строки «кластер 4» категориальной переменной Кл\_5ФП и столбца «кластер 2» градации Кл\_2ТМ (см. табл. 5). При этом фактическая частота почти в 5 раз выше ожидаемой, т. е. связь между признаками в этой ячейке положительная. Следовательно, четвертый кластер, выделенный на основе показателей развития фитопланктона, который характеризуется наименьшим числом видов водорослей, самой низкой общей численностью фитопланктона и комплексом доминантов из отдела Bacillariophyta (рис. 2), положительно связан со вторым кластером градации Кл\_2ТМ, в котором объединились наблюдения с самыми высокими значениями по концентрации меди и цинка (см. рис. 1).

Таким образом, анализ выявляет следующую тенденцию: повышенная концентрация в водах исследованных озер ионов тяжелых металлов оказывает воздействие на развитие фитопланктона, которое проявляется в сокращении числа видов и общей численности водорослей. При этом высокая альгостатическая и альгицидная активность тяжелых металлов была отмечена и ранее [21]. Наши данные показали, что токсическое воздействие на фитопланктон проявили не все четыре включенных в анализ тяжелых металла, а только медь и цинк. Другими исследованиями подтверждается, что медь и цинк проявляют наибольшую токсичность в ряду тяжелых металлов [22].

Ранее было показано [21], что цианопрокариоты наиболее чувствительны к концентрации тяжелых металлов, диатомеи и зеленые водоросли проявляют наибольшую устойчивость к загрязнению этими микроэлементами. Это согласуется с полученными нами результатами. Так, в комплекс доминантов большинства пунктов наблюдений входят представители цианопрокариот, но в наблюдениях из четвертого кластера гра-

**Результаты анализа сопряженности качественных переменных Кл\_2ТМ «тяжелые металлы» и Кл\_5ФП «численность фитопланктона и отдельных видов-доминантов, общее число видов»**

Table 5

**Cross-tabulation analysis of Cl\_2HM “heavy metals” and Cl\_5Ph “total phytoplankton abundance, abundance of dominants, total species richness” grouping variables**

Сводные результаты Summary		Кластеры Кл_2ТМ Clusters Cl_2HM		Все градации Row totals	
		1	2		
Фактическая частота Observed frequency	Кластеры Кл_5ФП Clusters Cl_5Ph	1	1	0	1
Ожидаемая частота Expected frequency			0,789	0,211	–
Разность между фактической и ожидаемой частотами Observed minus Expected Frequencies			0,211	–0,211	0
Хи-квадрат по ячейке Cell value of Pearson Chi-square			0,056	0,211	–
Фактическая частота Observed frequency		2	10	2	12
Ожидаемая частота Expected frequency			9,474	2,526	–
Разность между фактической и ожидаемой частотами Observed minus Expected Frequencies			0,526	–0,526	0
Хи-квадрат по ячейке Cell value of Pearson Chi-square			0,029	0,110	–
Фактическая частота Observed frequency		3	2	0	2
Ожидаемая частота Expected frequency			1,579	0,421	–
Разность между фактической и ожидаемой частотами Observed minus Expected Frequencies			0,421	–0,421	0
Хи-квадрат по ячейке Cell value of Pearson Chi-square			0,112	0,421	–
Фактическая частота Observed frequency		4	0	1	1
Ожидаемая частота Expected frequency			0,789	0,211	–
Разность между фактической и ожидаемой частотами Observed minus Expected Frequencies			–0,789	0,789	0
Хи-квадрат по ячейке Cell value of Pearson Chi-square			0,789	2,961	–
Фактическая частота Observed frequency		5	2	1	3
Ожидаемая частота Expected frequency			2,368	0,632	–
Разность между фактической и ожидаемой частотами Observed minus Expected Frequencies			–0,368	0,368	0
Хи-квадрат по ячейке Cell value of Pearson Chi-square			0,057	0,215	–
Фактическая частота Observed frequency	Все градации All Groups	15	4	19	

Таблица 6

**Оценка методом Монте-Карло для точного анализа результатов сопряженности качественных переменных Кл\_2ТМ «тяжелые металлы» и Кл\_5ФП «численность фитопланктона и отдельных видов-доминантов, общее число видов»**

Table 6  
**Monte Carlo simulation for cross-tabulation analysis of CI\_2HM “heavy metals” and CI\_5Ph “total phytoplankton abundance, abundance of dominants, total species richness” grouping variables**

Уровень значимости (p) значения Хи-квадрат Statistical significance (p) for value of Pearson Chi-square	0,0000
Нижний предел доверительного интервала 99% Lower limit of the 99% confidence interval	0,0000
Верхний предел доверительного интервала 99% Upper limit of the 99% confidence interval	0,0000
Количество выборок Number of samples	100000
Начальное значение Starting value	1866649587

дации Кл\_5ФП, положительно связанного со вторым кластером градации Кл\_2ТМ (с наиболее высокой концентрацией меди и цинка), представители цианопрокариот были замещены двумя доминантами из отдела диатомовых водорослей.

Минимальная концентрация цинка, по всем пунктам наблюдений на исследованных озерах, составила 0,0062 мг/л, меди – 0,001 мг/л. По данным некоторых исследователей, при такой концентрации данные микроэлементы уже начинают проявлять токсическое действие на культуры водорослей. Например, для штаммов золотистых водорослей чувствительность к ионам меди проявляется при концентрации 0,00025–0,005 мг/л после 2 мин экспозиции [23]. Однако, известно, что природные воды обладают модифицирующим действием на токсичность тяжелых металлов. Токсическое действие ионов меди и цинка может снижаться в природных водах в результате взаимодействия токсиканта с компонентами этих вод – различными комплексообразующими

веществами, способными связывать тяжелые металлы и, таким образом, нейтрализовать их [24]. Очевидно, поэтому статистически значимое ингибирующее воздействие на фитопланктон нами отмечено только во втором кластере наблюдений группирующей переменной Кл\_2ТМ, с наибольшими для исследованных водоемов значениями средней (см. табл. 1) и максимальной концентрации меди (0,026 мг/л) и цинка (0,025 мг/л). Тем не менее, возможен и синергетический эффект, когда присутствующие в природной воде несколько тяжелых металлов в комплексе оказывали более сильный ингибирующий эффект на фитопланктон, нежели по отдельности [25].

### Заключение

В результате исследования получены данные о концентрации в водах городских и пригородных озер Якутска четырех тяжелых металлов. По цинку и меди для некоторых пунктов наблюдений отмечено превышение ПДК. Гидробиологическая часть настоящего исследования позволила определить видовой состав и численность фитопланктона, а также комплекс доминирующих видов. С применением различных статистических методов установлена связь между концентрацией в водах исследованных озер тяжелых металлов (цинк, медь) и показателями развития фитопланктона. Наше исследование показало, что тяжелые металлы в водах городских озер Якутска оказывают токсическое действие на сообщества фитопланктона, что проявляется в модерировании его численности, видового богатства и смене состава доминирующих видов. Наши результаты подтверждают, что изучение влияния тяжелых металлов на живые компоненты водной экосистемы городских озер является перспективным направлением гидробиологических исследований в регионе, а фитопланктон является пригодным тест-объектом.

### Литература

1. *Cimboláková I., Uher I., Laktičová K.V., Vargová M., Kimáková T., Papajová I.* Heavy metals and the environment. IntechOpen, 2019. [Online First]. DOI: 10.5772/intechopen.86876. <https://www.intechopen.com/online-first/heavy-metals-and-the-environment>
2. *Руфова А.А., Ксенофонтова М.И.* Гидрохимический состав как один из индикаторов современных условий формирования озер (на примере г. Якутска) // Наука и образование. 2015. Т. 2, №78. С. 145–151.
3. *Руфова А.А., Татарина А.В.* Антропогенное влияние на гидрохимическое и гидробиологическое

состояние поверхностных вод северных городов (на примере г. Якутска) // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 4. С. 503.

4. Макаров В.Н. Экогеохимия окружающей среды города, расположенного в криолитозоне, на примере Якутска // Региональная экология. 2016. № 4(46). С. 80–94.

5. Трофимова Т.П. Оценка уровня токсического загрязнения донных отложений исследованных озер г. Якутска методом биотестирования // Материалы IX всероссийской научно-практической конференции «Эколого-географические проблемы регионов России». 2018. Самара: Изд-во Самарского государственного социально-педагогического университета. С. 166–169.

6. Макаров В.Н. Камыш озер Якутска – естественный эколого-биогеохимический барьер // Наука и техника в Якутии. 2016. № 2 (31). С. 16–43.

7. Васильева И.И. Состав и сезонная динамика фитопланктона озер окрестностей г. Якутска: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск, 1968. 14 с.

8. Иванова А.П. Водоросли городских и пригородных озер долины средней Лены: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2000. 24 с.

9. Копырина Л.И. Таксономический анализ эпифитных водорослей озера Сергелях // Материалы международной конференция «Озера холодных регионов». Т. 2. Гидробиологические вопросы. Якутск: Изд-во Якутского ун-та, 2000. С. 82–93.

10. Пестрякова Л.А. Процесс эвтрофирования озер долины Туймаада (Центральная Якутия) // Наука и образование. 2010. № 4. С. 82–87.

11. Садчиков А.П. Методы изучения пресноводного фитопланктона: методическое руководство. М., 2003. 157 с.

12. ГОСТ Р 57162-2016 Вода. Определение содержания элементов методом атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией.

13. Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ. М.: Мир, 1982. 488 с.

14. Гланц С. Медико-биологическая статистика. М.: Практика, 1998. 459 с.

15. Ким Дж.-О., Мьюллер Ч.У., Клекка У.Р. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.

16. Pearson K. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling // Philosophical Magazine Series 5. 1900. Vol. 50, I. 302. P. 157–175.

17. Бакаева О.А., Щенников В.Н. Использование критерия  $\chi^2$  для выявления связи между качественными переменными на основе «идеальных» таблиц сопряженности // Ярославский педагогический вестник. 2011. №. 4. С. 15–20.

18. Дегтева С.В., Новаковский А.Б. Эколого-ценотические группы сосудистых растений в фитоценозах ландшафтов бассейна верхней и средней Печоры. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2012. 182 с.

19. Гржибовский А.М. Выбор статистического критерия для проверки гипотез // Экология человека. 2008. №. 11. С. 48–57.

20. Антон Г. Анализ таблиц сопряженности. М.: Финансы и статистика, 1982. 143 с.

21. Jindal R., Verma A. Copper toxicity to plankton // Pollution Research. 1989. 8(3). P. 123–128.

22. Прошкина Е.А. Влияние тяжелых металлов на сообщества почвенных и эпифитных водорослей: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Уфа, 1997. 20 с.

23. Волошко Л.Н., Чаплыгина О.Я. Оценка чувствительности штаммов золотистых водорослей (Chrysophyta) к ионам тяжелых металлов // Астраханский вестник экологического образования. 2016. № 4 (38). С. 92–100.

24. Стравинскене Е.С., Григорьев Ю.С. Модифицирующее действие природных вод на токсичность тяжелых металлов для водоросли *Chlorella vulgaris* // Водные ресурсы. 2012. Т. 39, № 3. С. 332–336. DOI: 10.1134/s0097807812030104

25. Kaladharan P., Alavandi S.V., Pillai V.K., Balachandran V.K. Inhibition of primary production as induced by heavy metal ions on phytoplankton population off Cochin // Indian Journal of Fisheries. 1990. 37 (1). P. 51–54.

Поступила в редакцию 15.04.2020

Принята к публикации 27.08.2020

#### Об авторах

ГАБЫШЕВ Виктор Александрович, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-1656-4383>, Researcher ID: J-7831-2018, [v.a.gabyshev@yandex.ru](mailto:v.a.gabyshev@yandex.ru):

ГАБЫШЕВА Ольга Ивановна, младший научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-7435-4384>, Researcher ID: K-6082-2018, [g89248693006@yandex.ru](mailto:g89248693006@yandex.ru).

Габышев В.А., Габышева О.И. К изучению влияния тяжелых металлов на развитие фитопланктона озер г. Якутска и окрестностей // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020, Т. 25, № 4. С. 81–91. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-4-6>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-4-6

## On the study of the effects of heavy metals on the growth of lake phytoplankton in Yakutsk and its vicinity

V.A. Gabyshev, O.I. Gabysheva

*Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia*  
*v.a.gabyshev@yandex.ru*

**Abstract.** Our hydrobiological studies revealed the species composition, total abundance and a complex of dominant species of phytoplankton in 11 urban and suburban lakes of Yakutsk. In addition, water samples were collected to determine the concentrations of heavy metal ions (copper, nickel, manganese, zinc). For some chemical components, an excess over the MAC was detected. A data set was compiled from the obtained data. The data set includes 24 quantitative continuous variables characterizing the concentrations of heavy metals and the parameters of phytoplankton development. Through consecutive application of various methods of statistical analysis to the obtained data set, a significant correlation was revealed between the concentrations of heavy metal ions in water and the parameters of phytoplankton growth. It is proved that increased concentrations of zinc and copper cause a decrease in the total abundance of phytoplankton, its species richness, and affect the changes in the composition of dominant species through replacing Cyanoprokaryota species by Bacillariophyta ones. The relevance of studying the effect of heavy metal ions on the living components of the aquatic ecosystem of urban lakes in Yakutsk is confirmed, as well as suitability of phytoplankton as a test object for these studies.

**Key words:** heavy metals, phytoplankton abundance, species diversity, dominants, urban lakes, Yakutsk.

**Acknowledgements.** This study was performed within the framework of the state task of the Institute of Biological Problems of the Cryolithozone SB RAS for 2017–2020, topic “Fundamental and Applied Aspects of Studying the Diversity of the Plant World of Northern and Central Yakutia,” registration number AAAA-A17-117020110056-0.

### References

1. Cimboláková I., Uher I., Laktičová K.V., Vargová M., Kimáková T., Papajová I. Heavy metals and the environment. IntechOpen, 2019. [Online First]. DOI: 10.5772/intechopen.86876. <https://www.intechopen.com/online-first/heavy-metals-and-the-environment>
2. Rufova A.A., Ksenofontova M.I. Hidrokhimicheskiy sostav kak odin iz indikatorov sovremennykh usloviy formirovaniya ozer (na primere g. Yakutsk) // Nauka i obrazovaniye. 2015. Vol. 2, No. 78. P. 145–151.
3. Rufova A.A., Tatarinova A.V. Antropogennoye vliyaniye na gidrokhimicheskoye i gidrobiologicheskoye sostoyaniye poverkhnostnykh vod severnykh gorodov (na primere g. Yakutsk) // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2015. No. 4. P. 503.
4. Makarov V.N. Ekogeokhimiya okruzhayushchey sredy goroda, raspolozhennogo v kriolitozone, na primere Yakutsk // Regional'naya ekologiya. 2016. No. 4(46). P. 80–94.
5. Trofimova T.P. Otsenka urovnya toksicheskogo zagryazneniya donnykh otlozheniy issledovannykh ozer g. Yakutsk metodom biotestirovaniya // Materialy IX vsereossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Ekologo-geograficheskiye problemy regionov Rossii». 2018. Samara: Izd-vo Samarskogo gosudarstvennogo sotsial'no-pedagogicheskogo universiteta. P. 166–169.
6. Makarov V.N. Kamysh ozor Yakutsk – yestestvennyy ekologo-biogeokhimicheskiy bar'yer // Nauka i tekhnika v Yakutii. 2016. No. 2 (31). P. 16–43.
7. Vasil'yeva I.I. Sostav i sezonnaya dinamika fitoplanktona ozer okrestnostey g. Yakutsk: Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk. Novosibirsk, 1968. 14 p.

8. *Ivanova A.P.* Vodorosli gorodskikh i prigorodnykh ozor doliny sredney Leny: Avtoref. dis. kand. biol. nauk. M., 2000. 24 p.
9. *Kopyrina L.I.* Taksonomicheskiy analiz epifitnykh vodorosley ozera Sergelyakh // *Materialy mezhdunarodnoy konferentsiya «Ozera kholodnykh regionov»*. Vol. 2. *Gidrobiologicheskkiye voprosy*. Yakutsk: Izd-vo Yakutskogo un-ta, 2000. P. 82–93.
10. *Pestryakova L.A.* Protsess evtrofirovaniya ozer doliny Tuymaada (Tsentral'naya Yakutiya) // *Nauka i obrazovaniye*. 2010. No. 4. P. 82–87.
11. *Sadchikov A.P.* Metody izucheniya presnovodnogo fitoplanktona: metodicheskoye rukovodstvo. M., 2003. 157 p.
12. GOST R 57162-2016 Voda. Opredeleniye soverzhanii elementov metodom atomno-absorbtsionnoy spektrometrii s elektrotermicheskoy atomizatsii.
13. *Afifi A.A., Azen S.P.* Statisticheskii analiz: Podkhod s ispol'zovaniyem EVM. M.: Mir, 1982. 488 p.
14. *Glantz S.* Mediko-biologicheskaya statistika. M.: Praktika, 1998. 459 p.
15. *Kim J.-O., Mueller C.U., Klecka C.* Faktornyy, diskriminantnyy i klasternyy analiz. M.: Finansy i statistika, 1989. 215 p.
16. *Pearson K.* On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling // *Philosophical Magazine Series 5*. 1900. Vol. 50, I. 302. P. 157–175.
17. *Bakayeva O.A., Shchennikov V.N.* Ispol'zovaniye kriteriya ch2 dlya vyyavleniya svyazi mezhdru kachestvennymi peremennymi na osnove «ideal'nykh» tablits sopryazhennosti // *Yaroslavskiy pedagogicheskiy vestnik*. 2011. No. 4. P. 15–20.
18. *Degteva S.V., Novakovskiy A.B.* Ekologo-tsenoticheskiye gruppy sosudistykh rasteniy v fitotsenozakh landshaftov basseyna verkhney i sredney Pechory. Yekaterinburg: Izd-vo UrO RAN, 2012. 182 p.
19. *Grzhibovskiy A.M.* Vybor statisticheskogo kriteriya dlya proverki gipotez // *Ekologiya cheloveka*. 2008. No. 11. P. 48–57.
20. *Upton G.J.G.* Analiz tablits sopryazhennosti. M.: Finansy i statistika, 1982. 143 p.
21. *Jindal R., Verma A.* Copper toxicity to plankton // *Pollution Research*. 1989. 8(3). P. 123–128.
22. *Proshkina Ye.A.* Vliyaniye tyazhelykh metallov na soobshchestva pochvennykh i epifitnykh vodorosley: Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk. Ufa, 1997. 20 p.
23. *Voloshko L.N., Chaplygina O.Ya.* Otsenka chuvstvitel'nosti shtammov zolotistykh vodorosley (Chryso-phyta) k ionam tyazhelykh metallov // *Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*. 2016. No. 4 (38). P. 92–100.
24. *Stravinskene Ye.S., Grigor'yev Yu.S.* Modifitsiruyushcheye deystviye prirodnykh vod na toksichnost' tyazhelykh metallov dlya vodorosli *Chlorella vulgaris* // *Vodnyye resursy*. 2012. Vol. 39, No. 3. P. 332–336. DOI: 10.1134/s0097807812030104
25. *Kaladharan P., Alavandi S.V., Pillai V.K., Balachandran V.K.* Inhibition of primary production as induced by heavy metal ions on phytoplankton population off Cochin // *Indian Journal of Fisheries*. 1990. 37 (1). P. 51–54.

#### *About the authors*

GABYSHEV Viktor Alexandrovich, doctor of biological sciences, principal researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-1656-4383>, Researcher ID: J-7831-2018, [v.a.gabyshev@yandex.ru](mailto:v.a.gabyshev@yandex.ru);

GABYSHEVA Olga Ivanovna, junior researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-7435-4384>, Researcher ID: K-6082-2018, [g89248693006@yandex.ru](mailto:g89248693006@yandex.ru).

#### *Citation*

*Gabyshev V.A., Gabysheva O.I.* On the study of the effects of heavy metals on the growth of lake phytoplankton in Yakutsk and its vicinity // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020, Vol. 25, No. 4. pp. 81–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-4-6>