

## Биоразнообразие планктона и бентоса озер Таймыра в зоне воздействия ГМК “Норильский никель”

Е. С. КРАВЧУК<sup>1</sup>, О. П. ДУБОВСКАЯ<sup>1, 2</sup>, С. П. ШУЛЕПИНА<sup>2</sup>, Е. А. ИВАНОВА<sup>1, 2</sup>, Н. Н. СУЩИК<sup>1, 2</sup>,  
Л. А. ГЛУЩЕНКО<sup>2</sup>, И. И. МОРОЗОВА<sup>2</sup>, А. В. АГЕЕВ<sup>1, 2</sup>, В. А. КАРПОВ<sup>1, 2</sup>,  
П. Ю. АНДРУЩЕНКО<sup>1, 2</sup>, С. В. АНДРУЩЕНКО<sup>1, 2</sup>, А. В. ДРОБОТОВ<sup>1</sup>, М. И. ГЛАДЫШЕВ<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>Институт биофизики Федерального исследовательского центра  
“Красноярский научный центр Сибирского отделения  
Российской Академии наук”

660036, Красноярск, Академгородок, 50/50  
E-mail: [kravchuk@ibp.krasn.ru](mailto:kravchuk@ibp.krasn.ru)

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

Статья поступила 27.11.2024

После доработки 28.12.2024

Принята к печати 27.01.2025

### АННОТАЦИЯ

Проанализировано видовое разнообразие фито-, зоопланктона и зообентоса 28 арктических озер п-ова Таймыр, расположенных в радиусе около 100 км от г. Норильска. Целью было сравнение биоразнообразия в четырех поясах, выделенных на основании степени удаленности озер от предприятий ГМК “Норильский никель”: поясах значительного воздействия (ПЗВ), среднего, незначительного и фонового (ПСВ, ПНВ и ПФВ соответственно). При анализе бета-разнообразия на основе индекса Брея – Кертиса не выявлено достоверных различий между озерами ПЗВ и всех остальных групп. Существенная перестройка структуры планктонных и бентосных сообществ отмечена только в шести озерах, расположенных в непосредственной близости от промышленной зоны. В остальных озерах изменения менее выражены, а формирование сообществ, вероятно, в большей степени определяется природными факторами, а не уровнем антропогенного воздействия. Выявлены достоверные различия между поясами по среднему числу видов и индексу Шеннона: для зоопланктона эти показатели были достоверно выше в озерах ПФВ и ПНВ, чем в озерах ПСВ и ПЗВ, а для бентоса – в ПСВ по сравнению с ПЗВ. Достоверные изменения биомассы отмечены только для фитопланктона: в ПЗВ она оказалась достоверно выше, чем в ПСВ. Таким образом, число видов, индекс Шеннона и биомассу следует учитывать в дополнении к изменениям видового состава при индикации степени воздействия промышленных предприятий на планктонные и бентосные сообщества. Отмеченные изменения аналогичны перестройкам структуры планктона и бентоса, происходящим при эвтрофировании водоемов.

**Ключевые слова:** фитопланктон, зоопланктон, зообентос, биоразнообразие, п-ов Таймыр, Норильск, антропогенное воздействие, индекс Шеннона, число видов, биомасса.

## ВВЕДЕНИЕ

Структура планктонных и бентосных сообществ водоемов может значительно изменяться под влиянием деятельности промышленных и производственных предприятий. Показатели видового разнообразия широко используются как инструмент оценки уровня антропогенного воздействия на водные экосистемы [Кашулин и др., 2012; Denisov et al., 2020; Семенченко и др., 2024]. На п-ове Таймыр в г. Норильске и его окрестностях расположены предприятия норильского дивизиона горно-металлургической компании (ГМК) “Норникель”. В 2022–2023 гг. Сибирским отделением РАН при поддержке ГМК “Норникель” организована экспедиция (“Большая научная экспедиция”), в результате которой нами собраны пробы планктона и бентоса в озерах, расположенных в радиусе около 100 км от г. Норильска. В качестве рабочей гипотезы предполагалось, что при удалении от источника воздействия его влияние на биоту ослабевает. Исходно на основании степени

удаленности озер от предприятий ГМК “Норникель” выделено несколько поясов: пояс значительного воздействия (ПЗВ) и пояса среднего, незначительного и фоновое воздействия (ПСВ, ПНВ и ПФВ соответственно).

Цель данной работы – проанализировать видовой состав фитопланктона, зоопланктона и зообентоса и сравнить видовое разнообразие гидробионтов в группах озер, расположенных на территории разных поясов воздействия.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

### Район исследований

Исследования проводили 03.07 – 28.07.2022 и 10.07–10.08.2023 на Таймырском полуострове, в районе, прилегающем к г. Норильску и потенциально испытывающем воздействие объектов ГМК “Норникель” (рис. 1). В качестве фоновой участка использовали озера, находящиеся на плато Путорана, – Глубокое, Лама и Собачье, не подверженные влиянию

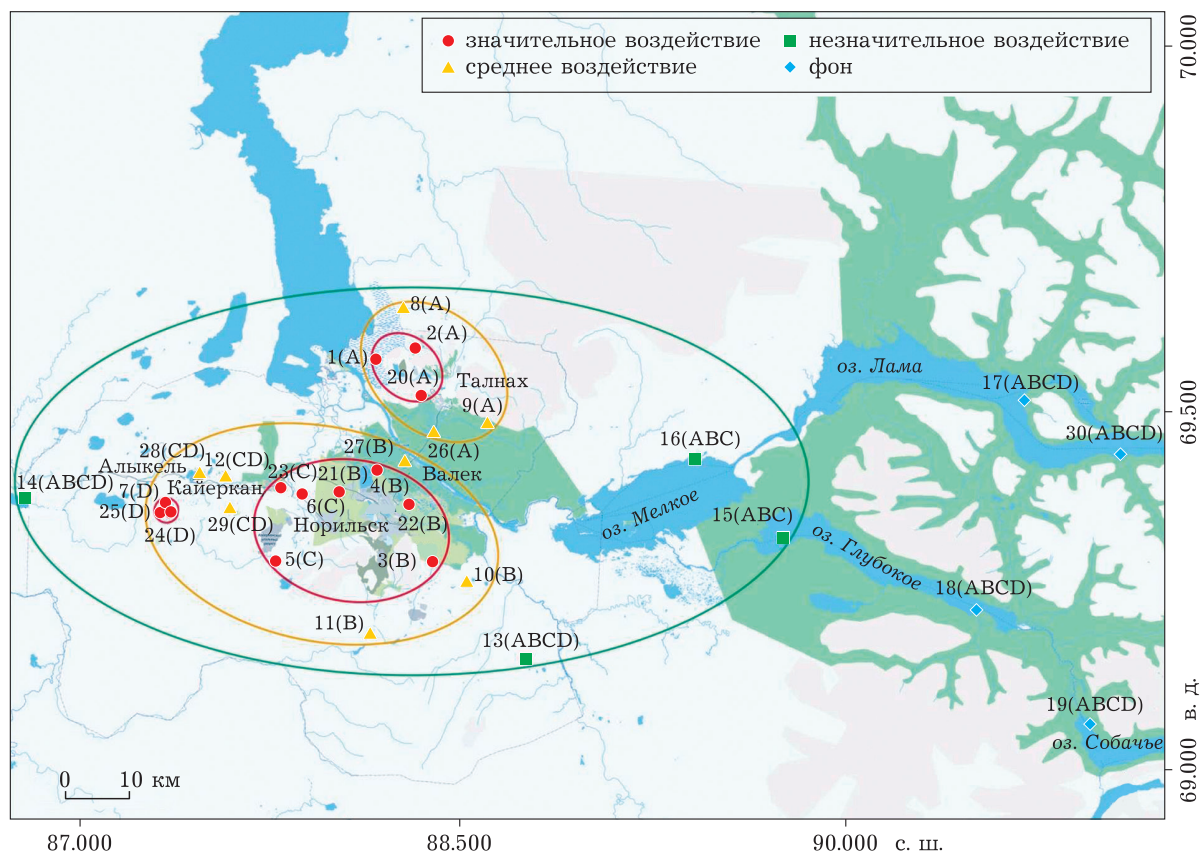


Рис. 1. Станции отбора проб и предполагаемые зоны воздействия предприятий ГМК “Норникель”. 1–30 – станция; A–D – коды площадок групп предприятий ГМК “Норникель”

доминирующей розы ветров и располагающиеся в верховьях Норило-Пясинской озеро-речной системы. В 2022 г. пробы отбирали на 19 станциях, расположенных на 18 водоемах (озерах), в 2023 г. – на 30 станциях, расположенных на 28 водоемах (озерах). Перечень и характеристики исследованных водоемов, а также их отнесение к предполагаемым поясам воздействия представлены в табл. 1.

Фоновые озера Лама, Глубокое и Собачье расположены в северо-западной части Среднесибирского плоскогорья, большие по площади (323, 136 и 99 км<sup>2</sup>), имеют тектонические и ледниково-тектонические котловины, характеризующиеся узостью и вытянутостью, большие глубины (максимальная глубина 227, 183 и 162 м) [Румянцев и др., 2017] и высокую прозрачность (6–8 м) (см. табл. 1). Озеро Мелкое – моренно-подпрудное, ледникового происхождения, его площадь 241 км<sup>2</sup>, максимальная глубина 22 м [Румянцев и др., 2017]. Эти четыре озера относятся к Норило-Пясинской системе и связаны между собой системой рек, в основном горного типа (см. рис. 1). Остальные озера небольшие по площади (площадь самого крупного оз. Боганидское по данным Государственного водного реестра РФ – 6,8 км<sup>2</sup> (<https://ozera.info/>)) и достаточно мелкие (1–5,5 м, см. табл. 1). Все озера природного происхождения. Ихтиофауна отмечена в озерах Лама, Глубокое, Собачье и Мелкое [Павлов и др., 1999; Андриенко и др., 2003], а также в оз. Боганидское (наши данные).

Температура поверхностного слоя воды в озерах сильно различалась, она изменялась от 8,5 до 21,1 °С (см. табл. 1). Температурная стратификация столба воды характерна для глубоководных станций озер Собачье, Лама и Глубокое (станции 17–19, 30), где температура придонного слоя была 4,8–10,1 °С и различия между придонным и поверхностным слоями составляли 3–10 °С. Также различия между температурой поверхностного и придонного слоев отмечены в озерах Без названия-9, Сев. Ергалах, Боганидское, Без названия-26 (см. табл. 1). Содержание растворенного в воде кислорода в поверхностном слое исследуемых озер было 7,06–11,68 мг/л, придонного слоя – 5,72–11,07 мг/л (см. табл. 1). Исключение составило озеро № 20, в котором обнаружено чрезвычайно низкое содержание растворенного кислорода – 1,41–2,37 мг/л; очевидно,

в данном озере наблюдалось сильное органическое загрязнение из неизвестного источника. По водородному показателю (рН) озера в основном варьируют от нейтральных до слабощелочных (см. табл. 1). Исключение составили два озера – Без названия-3 и Амбарное, находящиеся в поясе значительного воздействия, значения рН в которых составили 3,3–4,0, что указывает на закисление этих озер, имеющее, вероятно, антропогенный характер.

Предприятия, расположенные в исследуемом районе, образуют четыре территориально разделенные крупные группы, которые, возможно, различаются по степени антропогенного воздействия на водные экосистемы. Эти группы были обозначены как площадки А – D (см. рис. 1).

Площадка А – Талнахская группа: рудники “Комсомольский”, “Маяк”, “Скалистый”, “Октябрьский”, “Таймырский” и Талнахская обогатительная фабрика.

Площадка В – Норильская группа: Медный завод, Никелевый завод, Норильская обогатительная фабрика, Предприятие технологического железнодорожного транспорта, Автотранспортное объединение “ЦАТК”, Предприятие “Единое складское хозяйство”, рудник “Заполярный”, Механический завод, Завод строительных материалов, ТЭЦ-1.

Площадка С – Кайерканская группа: Надеждинский металлургический завод, рудник “Кайерканский”, ТЭЦ-2, ТЭЦ-3.

Площадка D – Алыкельская группа: ООО “Аэропорт “Норильск”.

Соответственно, каждой станции отбора проб был присвоен код, состоявший из номера станции и буквенного обозначения площадок, предприятия которых оказывают воздействие на данный водоем (см. рис. 1). Предполагалось, что экосистемы наиболее удаленных водоемов испытывали общее влияние негативных факторов от большинства объектов всех площадок.

Основываясь на данных об удаленности обследуемых водоемов от объектов ГМК “Норникель”, были выделены предполагаемые пояса воздействия на состояние водных экосистем и фоновые участки:

- значительного воздействия (в санитарно-защитной зоне + до 7 км, ПЗВ);
- среднего воздействия (10–15 км, ПСВ);
- незначительного воздействия (30–50 км, ПНВ);

## Характеристика станций отбора проб в районах предполагаемого воздействия предприятий ГМК «Норникель»

| Пояс<br>воздействия | Код<br>станции | Водоем,<br>координаты пробоотбора                           | Дата и время<br>пробоотбора | $t$ ,<br>°С*        | $O_2$ ,<br>мг/л*      | pH*                 | H, м | S, м      |
|---------------------|----------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|------|-----------|
| 1                   | 2              | 3                                                           | 4                           | 5                   | 6                     | 7                   | 8    | 9         |
| Значительное        | 1(A)           | оз. Без названия-1<br>69°32'57.3" с. ш., 88°08'21.2" в. д.  | 12.07.2022,<br>12:00        | 14,8                | 9,46                  | 7,71                | 1,5  | До<br>дна |
|                     |                |                                                             | 18.07.2023,<br>18:00        | $\frac{11,7}{11,7}$ | $\frac{9,05}{9,0}$    | $\frac{6,42}{6,47}$ | 2,5  | »         |
|                     | 2(A)           | оз. Без названия-2<br>69°33'53.8' с. ш., 88°17'34.2" в. д.  | 12.07.2022,<br>14:20        | $\frac{14,7}{13,8}$ | $\frac{9,9}{9,88}$    | $\frac{8,55}{8,41}$ | 2,75 | »         |
|                     |                |                                                             | 18.07.2023,<br>15:30        | $\frac{11,0}{11,0}$ | $\frac{9,7}{9,73}$    | $\frac{8,45}{8,54}$ | 1,5  | »         |
|                     | 3(B)           | оз. Без названия-3<br>69°16'16.6" с. ш., 88°22'28.2" в. д.  | 10.07.2022,<br>10:15        | 14,1                | 9,41                  | 3,84                | 1,0  | »         |
|                     |                |                                                             | 23.07.2023,<br>16:00        | $\frac{17,8}{17,7}$ | $\frac{8,93}{8,73}$   | $\frac{4,04}{4,04}$ | 2,0  | »         |
|                     | 4(B)           | оз. Без названия-4<br>69°23'49.8" с. ш., 88°09'07.5" в. д.  | 08.07.2022,<br>10:39        | $\frac{15,9}{15,2}$ | $\frac{9,66}{9,91}$   | $\frac{8,84}{8,66}$ | 2,0  | 1,0       |
|                     |                |                                                             | 17.07.2023,<br>11:15        | $\frac{10,0}{10,0}$ | $\frac{9,58}{9,45}$   | $\frac{8,15}{8,19}$ | 2,5  | До<br>дна |
|                     | 5(C)           | оз. Амбарное<br>69°16'08.0" с. ш., 87°45'38.9" в. д.        | 06.07.2022,<br>19:57        | $\frac{14,5}{14,2}$ | $\frac{9,99}{10,21}$  | $\frac{3,3}{3,33}$  | 1,8  | 1,5       |
|                     |                |                                                             | 15.07.2023,<br>13:30        | $\frac{9,0}{9,2}$   | $\frac{7,11}{9,11}$   | $\frac{3,4}{3,43}$  | 1,7  | До<br>дна |
|                     | 6(C)           | оз. Без названия-6<br>69°21'47.0" с. ш., 87°51'50.7" в. д.  | 06.07.2022,<br>16:00        | $\frac{15,1}{14,9}$ | $\frac{9,96}{10,23}$  | $\frac{7,69}{7,75}$ | 4,5  | 2,5       |
|                     |                |                                                             | 15.07.2023,<br>18:00        | $\frac{10,7}{10,6}$ | $\frac{9,19}{9,28}$   | $\frac{6,51}{6,69}$ | 5,5  | 3,5       |
|                     | 7(D)           | оз. Без названия-7<br>69°20'35.8" с. ш., 87°19'46.2" в. д.  | 06.07.2022,<br>11:00        | $\frac{14,6}{14,5}$ | $\frac{10,12}{9,98}$  | $\frac{8,26}{8,31}$ | 4,5  | До<br>дна |
|                     |                |                                                             | 11.07.2023,<br>12:30        | $\frac{13,0}{11,4}$ | $\frac{9,12}{9,2}$    | $\frac{8,01}{8,25}$ | 4    | »         |
|                     | 20(A)          | оз. Без названия-20<br>69°30'03.4" с. ш., 88°19'11.0" в. д. | 22.07.2023,<br>16:50        | $\frac{21,1}{19,9}$ | $\frac{2,37}{1,41}$   | $\frac{7,0}{6,88}$  | 3    | 1,0       |
|                     | 21(B)          | оз. Тихое<br>69°21'59" с. ш., 88°0'20" в. д.                | 14.07.2023,<br>16:05        | $\frac{9,5}{9,5}$   | $\frac{9,1}{9,32}$    | $\frac{6,45}{6,48}$ | 2,75 | До<br>дна |
|                     | 22(B)          | оз. Без названия-22<br>69°21'05.1" с. ш., 88°16'40.3" в. д. | 17.07.2023,<br>13:15        | $\frac{10,3}{10,3}$ | $\frac{8,83}{8,75}$   | $\frac{8,55}{8,54}$ | 2,5  | 1,5       |
|                     | 23(C)          | оз. Без названия-23<br>69°22'13" с. ш., 87°46'47" в. д.     | 15.07.2023,<br>16:00        | $\frac{11,4}{11,4}$ | $\frac{9,24}{9,16}$   | $\frac{8,33}{8,33}$ | 2    | До<br>дна |
|                     | 24(D)          | оз. Без названия-24<br>69°20'00.6" с. ш., 87°20'36.6" в. д. | 11.07.2023,<br>14:37        | 11,5                | 9,18                  | 6,15                | 1    | »         |
|                     | 25(D)          | оз. Без названия-25<br>69°19'56.5" с. ш., 87°18'29.2" в. д. | 11.07.2023,<br>16:00        | 13,3                | 9,15                  | 8,16                | 1    | »         |
| Среднее             | 8(A)           | оз. Без названия-8<br>69°37'12.9" с. ш., 88°14'27.5" в. д.  | 14.07.2022,<br>14:20        | $\frac{15,6}{14,0}$ | $\frac{10,07}{10,53}$ | $\frac{8,37}{8,27}$ | 2,3  | »         |
|                     |                |                                                             | 18.07.2023,<br>13:00        | $\frac{8,5}{8,7}$   | $\frac{9,37}{9,65}$   | $\frac{7,13}{7,08}$ | 1    | »         |
|                     | 9(A)           | оз. Без названия-9<br>69°27'57.4" с. ш., 88°34'49.2" в. д.  | 14.07.2022,<br>11:30        | 16,3                | 9,76                  | 7,02                | 1,0  | »         |
|                     |                |                                                             | 22.07.2023,<br>14:15        | $\frac{19,0}{11,4}$ | $\frac{7,62}{5,72}$   | $\frac{6,27}{6,12}$ | 3    | 2,0       |
|                     | 10(B)          | оз. Ветренное<br>69°14'47.8" с. ш., 88°30'32.4" в. д.       | 10.07.2022,<br>11:15        | 14,0                | 9,94                  | 7,21                | 1,5  | До<br>дна |
|                     |                |                                                             | 9.08.2023,<br>00:30         | 20,7                | 8,41                  | 7,44                | 1,5  | »         |
|                     |                |                                                             |                             |                     |                       |                     |      |           |
|                     |                |                                                             |                             |                     |                       |                     |      |           |

| 1              | 2            | 3                                                           | 4                    | 5                   | 6                     | 7                   | 8    | 9         |
|----------------|--------------|-------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|------|-----------|
| Среднее        | 11(B)        | оз. Сев. Ергалах<br>69°10'21.9" с. ш., 88°08'11.1" в. д.    | 08.07.2022,<br>14:37 | <u>14,7</u><br>15,6 | <u>10,10</u><br>9,69  | <u>7,25</u><br>7,36 | 2,0  | До<br>дна |
|                |              |                                                             | 23.07.2023,<br>13:00 | <u>16,7</u><br>12,4 | <u>7,92</u><br>8,05   | <u>6,66</u><br>6,55 | 2,5  | »         |
|                | 12(CD)       | оз. Без названия-12<br>69°23'14.9" с. ш., 87°33'33.9" в. д. | 06.07.2022,<br>13:15 | 14,4                | 9,98                  | 7,3                 | 1,5  | »         |
|                |              |                                                             | 12.07.2023,<br>16:30 | <u>10,0</u><br>10,7 | <u>11,68</u><br>9,95  | <u>5,95</u><br>6,18 | 1,75 | »         |
|                | 26(A)        | оз. Без названия-26<br>69°27'06.2" с. ш., 88°22'14.2" в. д. | 22.07.2023,<br>11:20 | <u>17,3</u><br>12,7 | <u>7,6</u><br>7,26    | <u>6,56</u><br>6,6  | 2,5  | »         |
|                | 27(B)        | оз. Без названия-27<br>69°24'42.5" с. ш., 88°15'30.5" в. д. | 17.07.2023,<br>15:15 | <u>10,9</u><br>10,9 | <u>9,58</u><br>9,46   | <u>7,36</u><br>7,44 | 1,5  | »         |
|                | 28(CD)       | оз. Алыкель<br>69°23'19.8" с. ш., 87°27'10.0" в. д.         | 11.07.2023,<br>17:45 | <u>13,4</u><br>13,7 | <u>8,9</u><br>8,95    | <u>6,72</u><br>6,38 | 2    | »         |
|                | 29(CD)       | оз. Проточное<br>69°20'35" с. ш., 87°34'42" в. д.           | 14.07.2023,<br>13:35 | 10,1                | 9,18                  | 6,79                | 1    | »         |
| Незначительное | 13<br>(ABCD) | оз. Лебединое<br>69°08'28.2" с. ш., 88°44'41.1" в. д.       | 10.07.2022,<br>16:15 | <u>15,7</u><br>14,6 | <u>9,65</u><br>9,96   | <u>8,42</u><br>8,39 | 3,5  | »         |
|                |              |                                                             | 8.08.2023,<br>18:00  | <u>20,3</u><br>20,4 | <u>9,03</u><br>9,35   | <u>8,6</u><br>8,6   | 2,15 | »         |
|                | 14<br>(ABCD) | оз. Боганидское<br>69°21'06.0" с. ш., 86°46'33.0" в. д.     | 03.07.2022,<br>19:24 | 16,1                | 7,06                  | 7,75                | 1,5  | »         |
|                |              |                                                             | 12.07.2023,<br>13:00 | <u>14,2</u><br>9,5  | <u>8,39</u><br>9,66   | <u>6,7</u><br>7,14  | 2    | »         |
|                | 15(ABC)      | оз. Глубокое<br>69°18'51.1" с. ш., 89°44'27.5" в. д.        | 28.07.2022,<br>1:33  | <u>17,0</u><br>15,6 | <u>10,03</u><br>10,25 | <u>6,76</u><br>6,72 | 4    | »         |
|                |              |                                                             | 4.08.2023,<br>15:02  | <u>17,6</u><br>11,3 | <u>8,93</u><br>10,19  | <u>6,48</u><br>6,82 | 4,6  | »         |
|                | 16(ABC)      | оз. Мелкое<br>69°25'15.5" с. ш., 89°23'36.4" в. д.          | 24.07.2022,<br>22:09 | 19,0                | 9,58                  | 7,28                | 1,5  | »         |
|                |              |                                                             | 28.07.2023,<br>16:00 | <u>17,8</u><br>17,8 | <u>8,98</u><br>10,48  | <u>6,68</u><br>7,67 | 5,5  | 2,5       |
| Фон            | 17<br>(ABCD) | оз. Лама<br>69°30'34.9" с. ш., 90°40'28.9" в. д.            | 24.07.2022,<br>17:00 | <u>12,9</u><br>10,0 | <u>10,74</u><br>11,07 | <u>7,13</u><br>6,85 | 22   | 8,0       |
|                |              |                                                             | 28.07.2023,<br>13:00 | <u>16,0</u><br>6,1  | <u>9,28</u><br>9,84   | <u>6,72</u><br>6,4  | 30   | 8,0       |
|                | 18<br>(ABCD) | оз. Глубокое<br>69°13'11.7" с. ш., 90°30'14.2" в. д.        | 27.07.2022,<br>23:46 | <u>14,4</u><br>9,0  | <u>10,02</u><br>10,36 | <u>6,93</u><br>6,64 | 28   | 6,0       |
|                |              |                                                             | 04.08.2023,<br>12:55 | <u>12,0</u><br>6,0  | <u>9,07</u><br>8,13   | <u>6,83</u><br>5,73 | 30   | 6,5       |
|                | 19<br>(ABCD) | оз. Собачье<br>69°03'51.9" с. ш., 90°57'08.9" в. д.         | 27.07.2022,<br>20:40 | <u>17,3</u><br>9,2  | <u>10,10</u><br>11,07 | <u>7,04</u><br>6,63 | 16,5 | 8,0       |
|                |              |                                                             | 04.08.2023,<br>11:00 | <u>15,7</u><br>10,1 | <u>9,53</u><br>9,97   | <u>6,82</u><br>6,46 | 18   | 7,0       |
|                | 30 (ABCD)    | оз. Лама<br>69°26'14" с. ш., 91°03'24" в. д.                | 28.07.2023,<br>11:30 | <u>12,4</u><br>4,8  | <u>9,44</u><br>9,89   | <u>6,27</u><br>6,28 | 30   | 8,75      |

\* Приведены величины гидрохимических показателей воды поверхностного горизонта, под чертой указаны величины для придонного горизонта.



– фон (50–100 км и более, ПФВ).

Предполагаемые границы ПСВ для объектов площадок С и D пересекались.

### **Отбор и обработка проб**

Для получения проб фитопланктона на станциях (озерах) с глубиной более 1,5 м с помощью батометра Паталаса брали воду из 2–5 горизонтов фотического и афотического слоев (0; 0,5S; S; 2S; 2,5S; 0,5H; придонный; S – прозрачность по диску Секки, м; H – глубина на станции, м) и объединяли. На глубинах менее 1,5 м брали пробу из поверхностного слоя. В лаборатории пробу фильтровали через фильтровальную установку Зейца на мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм до забивания пор фильтра и консервировали фиксатором на основе раствора Люголя в модификации Г. В. Кузьмина. Видовой состав и численность водорослей определяли в камере Фукса – Розенталя объемом 3,2 мкл. Размеры клеток оценивали с помощью окуляр-микрометра. Биомассу рассчитывали по объему клеток, приравнивая удельную массу к единице [Руководство..., 1992].

Пробы организмов зоопланктона на станциях с глубинами до 2 м отбирали ведром, процеживая 120 л воды через сеть Апштейна (размер ячеек полиамидного газа 82 мкм). Интегральные пробы зоопланктона на станциях с глубиной более 2 м отбирали сетью Джели (диаметр входного отверстия 0,18–0,25 м, ячеек 82 мкм), протягивая ее от дна до поверхности. Пробы фиксировали 4%-м формалином. Камеральную обработку проб проводили методом Утермеля под инвертированным микроскопом Leica DM IL LED (Leica Microsystems GmbH, Германия). Массу организмов находили по линейным размерам с помощью уравнений связи длины и массы тела [Руководство..., 1992; Алимов и др., 2013].

Пробы зообентоса в пелагиальной части озер собирали дночерпателем Петерсена (0,025 м<sup>2</sup>) и промывали в сачке из полиамидного газа с ячейей 200 мкм. В литорали озер зообентос собирали количественным скребком Дулькейта. Беспозвоночных выбирали из пробы пинцетом и фиксировали в 80%-м этаноле. Биомассу рассчитывали по фиксированному в спирте животному, взвешивали на торсионных весах (тип WT) с точностью

определения массы до 1 мг [Руководство..., 1992].

Прозрачность воды (S) измеряли диском Секки, глубину на станции (H) – эхолотом. Концентрацию растворенного кислорода и температуру поверхностного и придонного слоев воды измеряли оксиметром HI9142 (Hanna, Германия), водородный показатель pH – pH-метром HI83141 (Hanna, Германия).

### **Оценка биоразнообразия и статистический анализ**

Альфа-разнообразие сообществ фитопланктона, зоопланктона и зообентоса на каждой станции определяли на основе видового (таксономического) богатства, т. е. числа видов в пробе [Schartau et al., 2022], а также с использованием общепринятого индекса Шеннона [Fefilova et al., 2022]:

$$H = -\sum_i \frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N},$$

где N – общая численность всех видов (таксонов);  $n_i$  – численность  $i$ -го вида (таксона).

Для проверки нормальности распределений применяли критерий Шапиро – Уилка. В случае ненормального распределения проводили нормализацию методом логарифмирования. Средние показатели между поясами воздействия сравнивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA), включающего post-hoc критерий Тьюки. Для расчетов использовали программный пакет Past 4.16с.

Бета-разнообразие оценивали с помощью индекса Брея – Кертиса [Schultz et al., 2013; Kolmakova et al., 2014]:

$$BC = \frac{\sum_{i=1}^n |s_{1i} - s_{2i}|}{\sum_{i=1}^n (s_{1i} + s_{2i})},$$

где  $s_{1i}$  и  $s_{2i}$  – численность  $i$ -го вида на сравниваемой паре станций 1 и 2 соответственно. Для расчетов индекса Брея – Кертиса использовался специализированный программный пакет Community Analysis Package, версия 5.2.1.448 (Pisces Conservation Ltd, Великобритания).

Для выполнения неметрического многомерного шкалирования (non-metric multi-dimen-

sional scaling – MDS), а также для анализа сходства групп в многомерном распределении (ANOSIM) использовали программный пакет Community Analysis Package, версия 5.2.1.448 (Pisces Conservation Ltd, Великобритания). Для MDS и ANOSIM использовались преобразованные  $\log_{10}(x + 1)$  данные. Кластерный анализ проводили на непреобразованных данных на основе индекса Брея – Кертиса (paired group (UPGMA), constraints None) в программном пакете Past 4.16c.

Частоту встречаемости вида в числе доминантов для группы станций рассчитывали как отношение числа станций, на которых данный вид встречается как доминант, к общему числу станций в группе и выражали в процентах. Доминирующими считали виды, составляющие в фитопланктоне не менее 20 % от общей численности, в зоопланктоне – не менее 5 %, в бентосе – не менее 10 %.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Фитопланктон

В составе фитопланктона в 28 озерах за 2 года исследований (2022–2023 гг.) обнаружен 161 таксон: Cyanoprokaryota – 18, Bacillariophyta – 77, Chlorophyta + Charophyta – 50, Chrysophyta – 7, Euglenophyta и Dinophyta – по 3, Cryptophyta – 2, Xanthophyta – 1. Всего в 13 водоемах ПЗВ обнаружено 112 видов и разновидностей, в девяти водоемах ПСВ – 87, в четырех водоемах ПНВ – 72, в четырех водоемах ПФВ – 42.

Результаты MDS (рис. 2) выявили значительные меж- и внутригрупповые различия в численности и видовом составе фитопланктона на отдельных станциях, принадлежащих к ПСВ и ПНВ, а также ПФВ. Однако станции ПЗВ практически полностью перекрываются со станциями остальных поясов (см. рис. 2). Анализ сходства ANOSIM показал, что различия по составу видов фитопланктона и их численности между выделенными группами станций, расположенными в поясах с различной степенью воздействия, в целом являются достоверными:  $P = 0,004$ . Попарное сравнение групп, относящихся к различным поясам воздействия, выявило достоверные различия ( $P < 0,003$ ) между ПСВ, ПНВ и ПФВ, тогда как группа станций ПЗВ недо-

стительно отличалась от всех остальных групп (см. рис. 2).

По результатам кластерного анализа, проведенного для оценки группировки станций по составу видов и их численности, можно выделить восемь групп озер, отличающихся по составу доминирующих видов (см. рис. 2, табл. 2). Преимущественно глубокие озера (средняя глубина 17,3 м) объединились в один кластер (№ 1). В него вошли все озера фоновой пояса – Лама, Глубокое и Собачье (f17 – f19 и f 30) и две станции ПНВ – n15 и n16, расположенные в озерах Мелкое и Глубокое той же Норило-Пясинской системы. В этих озерах доминируют золотистые (*Dinobryon cylindricum* и *D. sociale*) и диатомовые (*Cyclotella melosiroides* и другие представители Stephanodiscaceae, а также *Asterionella formosa*) водоросли (см. табл. 2).

К этому кластеру примыкает кластер № 2, в который вошли озера ПЗВ – z3\* (только 2023 г.), z2 и z7. В них также единично встречаются некоторые виды диатомовых и золотистых водорослей из первого кластера, но преобладают цианопрокариоты *Aphanizomenon flos-aquae*, диатомовая *Synedra ulna* var. *danica*, зеленая *Ankistrodesmus falcatus* (озеро z2) и золотистая *Dinobryon divergens* (z7 и z3\*) (см. табл. 2).

В кластер № 3 вошли два оставшихся озера ПНЗ – Лебединое (n13) и Боганидское (n14), а также одно озеро ПЗВ – z1. В этих озерах преобладают виды цианопрокариот порядка Nostocales, которые вообще не встречаются в озерах других групп. В n13 и n14 доминируют *Anabaena scheremetievi* и *Anabaena flos-aquae*, а в z1 – *Aphanizomenon* sp., не встречающийся в n13 и n14 (см. табл. 2).

Вторая крупная ветвь (кластеры № 4–6) объединяет неглубокие озера с небольшой в подавляющем большинстве случаев площадью. Здесь доминируют виды, характерные для такого типа водоемов, которые (не считая единственного озера s29 с доминированием Stephanodiscaceae) либо отсутствуют в озерах поясов фона и незначительного воздействия, либо встречаются в них единично. В кластеры № 5 и 6 вошли самые мелкие (средняя глубина 1,8 и 1,9 м) и, вероятно, самые прогреваемые озера, где доминируют в основном цианопрокариоты и зеленые водоросли, причем виды варьировать как между озерами, так

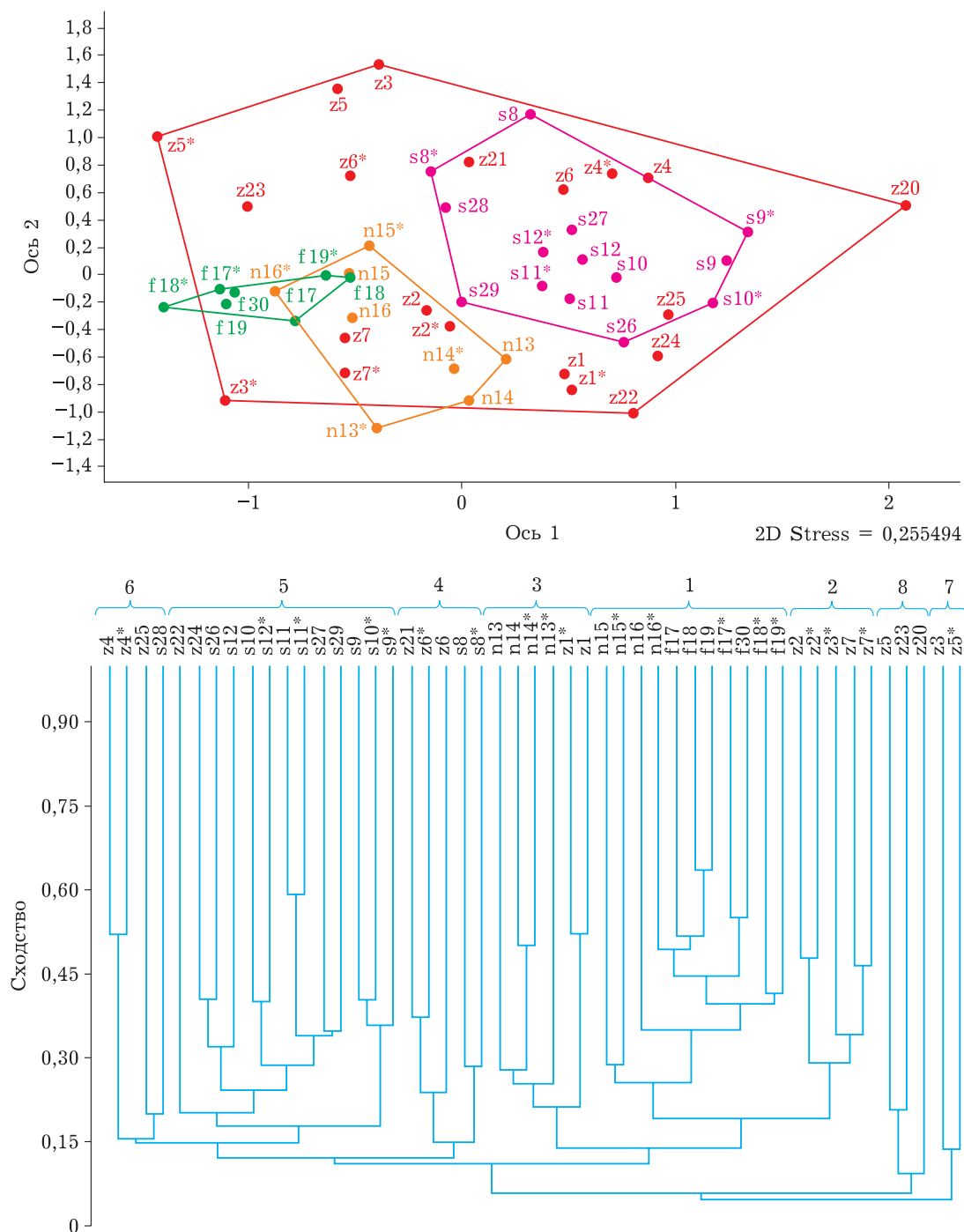


Рис. 2. Результаты неметрического многомерного шкалирования (MDS) (вверху) и кластерного анализа (внизу), выполненных на основе матрицы индексов Брея – Кертиса для фитопланктона. Станции (пробы), расположенные в поясе значительного воздействия, обозначены буквой z и красным цветом, среднего – s и розовым, незначительного – n и желтым, фон – f и зеленым. Звездочками обозначены пробы станций № 1–19, отобранные в 2023 г. По осям 1 и 2 в относительных единицах отложены функции двух наименьших стрессов (напряжений), дающих наибольшее сходство воспроизведенной матрицы с исходной

и между годами в одном озере: *Aphanothece* sp. (s9, s12), *Aphanocapsa* sp. (s11), *Coelosphaerium kuetsingianum* (s9, s12, s26, z24), *Gomphos-*

*phaeria lacustris* (z25), *Pseudanabaena* sp. (s10, s12), *Anabaena lemmermannii* (s9, s11), *Ankistrodesmus falcatus* (s27), *Botryococcus braunii*



Выделенные по результатам MDS и кластерного анализа группы станций поясов воздействия значительного (z), среднего (s), незначительного (n) и фона (f) с пределами колебаний (над чертой) и средними  $\pm$  стандартная ошибка (под чертой) показателями температуры, pH воды, глубины станции (озера), числа видов в пробе, индекса Шеннона и биомассы; частота встречаемости (%) видов фитопланктона в доминантах с численностью  $> 20$  % от суммарной на станции. Норильский дивизион, 2022–2023 гг.

| Показатель                                                      | 1. f (17–19, 30)<br>+ n (15, 16) | 2. z (2, 3*, 7)             | 3. n (13, 14)<br>+ z (1)   | 4. s (8)<br>+ z (6, 21)    | 5. s (9–12, 26, 27,<br>29) + z (22, 24) | 6. s (28) + z (4,<br>25)    | 7. z (5*, 3)               | 8. z (5, 20, 23)            |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1                                                               | 2                                | 3                           | 4                          | 5                          | 6                                       | 7                           | 8                          | 9                           |
| Число проб                                                      | 11                               | 5                           | 6                          | 5                          | 13                                      | 4                           | 2                          | 3                           |
| t, °C, lim<br>средняя $\pm$ SE                                  | 4,8–19,0<br>13,0 $\pm$ 0,9       | 11,0–17,8<br>14,0 $\pm$ 0,8 | 9,5–20,4<br>14,9 $\pm$ 1,1 | 8,5–15,6<br>11,7 $\pm$ 0,9 | 10,0–20,7<br>13,5 $\pm$ 0,7             | 10,0–15,9<br>13,1 $\pm$ 0,9 | 9,0–14,1<br>10,8 $\pm$ 1,7 | 11,4–21,1<br>15,4 $\pm$ 1,7 |
| pH, lim<br>средняя $\pm$ SE                                     | 5,7–7,7<br>6,7 $\pm$ 0,1         | 4,0–8,6<br>7,5 $\pm$ 0,6    | 6,4–8,6<br>7,6 $\pm$ 0,3   | 6,5–8,4<br>7,2 $\pm$ 0,2   | 6,0–8,6<br>7,0 $\pm$ 0,2                | 6,4–8,8<br>7,9 $\pm$ 0,4    | 3,4–3,8<br>3,6 $\pm$ 0,1   | 3,3–8,3<br>6,2 $\pm$ 0,9    |
| H, м, lim<br>средняя $\pm$ SE                                   | 1,5–30,0<br>17,3 $\pm$ 3,5       | 1,5–4,5<br>3,0 $\pm$ 0,6    | 1,5–3,5<br>2,2 $\pm$ 0,3   | 1,0–5,5<br>3,2 $\pm$ 0,8   | 1,0–3,0<br>1,8 $\pm$ 0,2                | 1,0–2,5<br>1,9 $\pm$ 0,3    | 1,0–1,7<br>1,4 $\pm$ 0,3   | 1,8–3,0<br>2,3 $\pm$ 0,4    |
| Число видов, lim<br>средняя $\pm$ SE                            | 9–27<br>12,8 $\pm$ 1,6           | 7–28<br>15,8 $\pm$ 3,8      | 13–28<br>21,7 $\pm$ 2,3    | 11–19<br>13,8 $\pm$ 1,4    | 9–23<br>14,9 $\pm$ 1,3                  | 9–23<br>14,8 $\pm$ 3,0      | 7–19<br>13,0 $\pm$ 6,0     | 7–8<br>7,7 $\pm$ 0,3        |
| Шеннона, lim<br>средняя $\pm$ SE                                | 0,9–3,2<br>1,9 $\pm$ 0,2         | 0,6–3,5<br>2,4 $\pm$ 0,5    | 2,1–3,5<br>2,8 $\pm$ 0,2   | 2,9–3,5<br>3,1 $\pm$ 0,1   | 1,2–3,2<br>2,5 $\pm$ 0,2                | 0,02–2,2<br>0,7 $\pm$ 0,5   | 0,9–2,3<br>1,6 $\pm$ 0,7   | 0,8–2,3<br>1,4 $\pm$ 0,4    |
| Биомасса, мг/л, lim<br>средняя $\pm$ SE                         | 0,2–1,9<br>0,6 $\pm$ 0,2         | 0,7–7,3<br>2,4 $\pm$ 1,3    | 0,2–1,7<br>0,6 $\pm$ 0,2   | 0,1–1,5<br>0,4 $\pm$ 0,3   | 0,02–7,1<br>0,8 $\pm$ 0,5               | 0,3–5,5<br>2,4 $\pm$ 1,2    | 0,1–1,3<br>0,7 $\pm$ 0,6   | 0,1–0,4<br>0,2 $\pm$ 0,1    |
| Cyanoprokaryota                                                 |                                  |                             |                            |                            |                                         |                             |                            |                             |
| <i>Anabaena flos-aquae</i> Bréb.                                |                                  |                             | 17                         |                            |                                         |                             |                            |                             |
| <i>Anabaena lemmermannii</i><br>P. Richt.                       |                                  |                             |                            |                            | 15                                      |                             |                            |                             |
| <i>Anabaena scheremetievi</i> Elenk.                            |                                  |                             | 50                         |                            |                                         |                             |                            |                             |
| <i>Aphanizomenon flos-aquae</i> (L.)<br>Ralfs ex Born. et Flah. |                                  | 20                          |                            |                            |                                         |                             |                            |                             |
| <i>Aphanizomenon</i> sp.                                        |                                  |                             | 33                         |                            |                                         |                             |                            |                             |
| <i>Aphanocapsa</i> sp.                                          |                                  |                             |                            |                            | 15                                      |                             |                            |                             |
| <i>Aphanothece</i> sp.                                          |                                  |                             |                            |                            | 23                                      |                             |                            |                             |
| <i>Coelosphaerium kuetzingianum</i><br>Näg.                     |                                  |                             |                            |                            | 31                                      |                             |                            |                             |
| <i>Gomphosphaeria lacustris</i><br>Chodat                       |                                  |                             |                            |                            |                                         | 25                          |                            |                             |
| <i>Oscillatoria limosa</i> Ag. ex Gom.                          |                                  |                             |                            |                            |                                         |                             |                            | 33                          |
| <i>Pseudanabaena</i> sp.                                        |                                  |                             |                            |                            | 15                                      |                             | 50                         |                             |
| <i>Tetrarcus ilsteri</i> Skuja                                  |                                  |                             |                            |                            |                                         |                             |                            | 33                          |
| Bacillariophyta                                                 |                                  |                             |                            |                            |                                         |                             |                            |                             |
| <i>Achnanthes</i> sp.                                           |                                  |                             |                            | 20                         |                                         |                             |                            |                             |
| <i>Asterionella formosa</i> Hass.                               | 36                               |                             |                            |                            |                                         |                             |                            |                             |
| Stephanodiscaceae                                               | 27                               |                             |                            |                            | 8                                       |                             |                            | 33                          |

| 1                                                    | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  |
|------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| <i>Cyclotella melosiroides</i> (Kirch.) Lemm.        | 9  |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Eunotia exigua</i> (Bréb. ex Kütz.) Rabenh.       |    |    |    |    |    |    | 50 |    |
| <i>Fragilaria</i> sp.                                |    |    |    | 20 |    |    |    |    |
| <i>Synedra ulna</i> var. <i>danica</i> (Kütz.) Grun. |    | 40 |    |    |    |    |    |    |
| <i>Tabellaria flocculosa</i> (Roth) Kütz.            |    |    |    | 20 |    |    |    |    |
| Chlorophyta + Charophyta                             |    |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Ankistrodesmus acicularis</i> (A. Br.) Korsch.    |    |    |    | 20 |    |    |    |    |
| <i>Ankistrodesmus falcatus</i> (Corda) Ralfs         |    | 20 |    |    | 8  |    |    |    |
| <i>Botryococcus braunii</i> Kütz.                    |    |    |    |    | 8  | 25 |    |    |
| <i>Chlamydomonas</i> sp.                             |    |    |    |    |    |    |    | 33 |
| <i>Coelastrum microporum</i> Näg.                    |    |    | 17 |    |    |    |    |    |
| <i>Cosmarium depressum</i> (Näg.) Lund.              |    |    |    |    |    |    | 50 |    |
| <i>Dictyosphaerium pulchellum</i> H. C. Wood         |    |    |    | 20 | 15 | 50 |    |    |
| <i>Elakatothrix lacustris</i> Korsch.                |    |    |    |    | 8  |    |    |    |
| <i>Pediastrum boryanum</i> (Turp.) Menegh.           |    |    |    |    | 8  |    |    |    |
| Chrysophyta                                          |    |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Dinobryon cylindricum</i> Imh.                    | 36 |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Dinobryon divergens</i> Imh.                      |    | 60 |    |    |    |    |    |    |
| <i>Dinobryon sociale</i> Ehr.                        | 9  |    |    |    |    |    |    |    |
| Cryptophyta                                          |    |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Chroomonas acuta</i> Uterm.                       |    |    |    | 20 |    |    |    |    |

(s9, s28), *Dictyosphaerium pulchellum* (s9, s10, z4), *Elakatothrix lacustris* (s10), *Pediastrum boryanum* (z22), Stephanodiscaceae (s29). Отметим, что в кластере 6 отмечен самый низкий индекс Шеннона (в среднем 0,7), поскольку в озерах z4 и s28 он составляет 0,02–0,10 и 0,30 из-за монодоминирования (97–99 %) *D. pulchellum* и *B. braunii* соответственно. В кластер № 4 входят более глубокие (средняя глубина 3,2 м) и прохладные озера с доминированием диатомовых *Achnanthes* sp., *Fragilaria* sp., *Tabellaria flocculosa*, зеленых *Ankistrodesmus acicularis* и *D. pulchellum* и криптофитовой *Chroomonas acuta* (см. табл. 2).

Отдельно стоят водоемы со специфическими условиями обитания – в результате проведения MDS они оказались разбросаны по периферии ординационной диаграммы, а по результатам кластерного анализа образуют отдельные группы № 7 и 8. Озеро Амбарное (z5) и Без названия-3 (z3) – водоемы с кислой средой (pH 3,3–4,0). В озере z3 в 2022 г. доминировал ацидофил *Eunotia exigua* (44 %), не встреченный ни в одном другом водоеме. В планктоне этого озера в этот год также встречены ацидофильные виды диатомовых *E. praerupta*, *E. praerupta* var. *bidens*, *E. praerupta* var. *musculicola*, *E. robusta* var.

*diadema*, *E. triodon*, *Meridion circulare* и *Nitzschia sigma*. Первые два вида встречались также в z5\* (2023 г.) (что, видимо, и объединяет эти точки в анализе), хотя доминировала на этой станции цианопрокариота *Pseudanabaena* sp. (85 %). Однако в 2023 г. на станции z3\* из ацидофилов встречена только *E. praerupta* (0,3 %), а доминировала золотистая *Dinobryon divergens* (92 %), и эта точка оказалась в кластере с фоновыми озерами; в 2022 г. на станции z5, несмотря на pH 3,3, видов-ацидофилов встречено не было, а доминировал *Chlamydomonas* sp. (82 %). В оз. Без названия-20 отмечена самая высокая температура воды – 21,1 °С. В планктоне этого озера преобладали цианопрокариоты *Oscillatoria limosa* и *Tetrarcus ilsteri*, причем последний вид встречен только в этом озере (см. табл. 2). Также в этом кластере оказалось оз. Без названия-23, в котором преобладают центрические диатомовые семейства *Stephanodiscaceae* и *Ta-bellaria flocculosa*, но встречаются общие с z5 и z20 виды диатомовых (см. табл. 2).

Как минимальная, так и максимальная биомасса обнаружена в озерах ПЗВ: 0,02–0,08 мг/л (z6, z20, z24) и 3,5–7,3 мг/л (z3, z4, z22). При сравнении между поясами воздействия средних показателей числа видов, индекса Шеннона и биомассы фитопланктона единственное достоверное отличие обнаруже-

но между величиной биомассы в ПЗВ и ПСВ, где она уменьшалась на порядок (табл. 3).

### Зоопланктон

В составе сетного зоопланктона 49 проб (28 озер) за 2 года исследований (2022–2023 гг.) обнаружено видов и групп видов: Rotifera – 37, Cladocera – 24; Copepoda – 29, включая науплии Copepoda и Harpacticoida, Calanoida – 12, Cyclopoida – 15 видов. Всего в 13 водоемах (20 пробах) ПЗВ обнаружены 61 вид и группа, в девяти водоемах (14 пробах) ПСВ – 40, в восьми водоемах (15 пробах) ПНВ + ПФВ – 47. Результаты MDS показали (рис. 3), что имеются значительные меж- и внутрigrupповые различия в численности и видовом составе зоопланктона на отдельных станциях, принадлежащих к ПСВ, с одной стороны, и ПНВ и ПФВ – с другой. Однако станции ПЗВ перекрываются со многими станциями остальных поясов и одной станцией ПФВ (см. рис. 2). Анализ сходства ANOSIM показал, что различия по составу видов зоопланктона и их численности между выделенными группами станций, расположенными в поясах с различной степенью воздействия, в целом являются достоверными:  $P = 0,041$ . Попарное сравнение групп, относящихся к различным поясам воздействия,

Т а б л и ц а 3

Средние за 2022–2023 гг. число видов, индекс Шеннона и биомасса фито-, зоопланктона (мг/м<sup>3</sup>) и зообентоса (г/м<sup>2</sup>) в поясах воздействия предприятий Норильского дивизиона компании “Норникель” (± стандартная ошибка)

| Компонент    | Пояс воздействия   | Число видов              | Индекс Шеннона            | Биомасса                    |
|--------------|--------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Фитопланктон | Значительное (z)   | 14,5 ± 1,5 <sup>A</sup>  | 2,0 ± 0,2 <sup>A</sup>    | 1672,4 ± 515,9 <sup>A</sup> |
|              | Среднее (s)        | 14,9 ± 1,2 <sup>A</sup>  | 2,5 ± 0,2 <sup>A</sup>    | 233,0 ± 48,0 <sup>B</sup>   |
|              | Незначительное (n) | 18,0 ± 2,5 <sup>A</sup>  | 2,6 ± 0,3 <sup>A</sup>    | 566,1 ± 204,2 <sup>AB</sup> |
|              | Фон (f)            | 11,3 ± 1,2 <sup>A</sup>  | 1,8 ± 0,3 <sup>A</sup>    | 589,8 ± 232,6 <sup>AB</sup> |
| Зоопланктон  | Значительное (z)   | 8,8 ± 0,8 <sup>A</sup>   | 1,27 ± 0,18 <sup>A</sup>  | 605,0 ± 176,1 <sup>A</sup>  |
|              | Среднее (s)        | 9,2 ± 0,9 <sup>A</sup>   | 1,40 ± 0,20 <sup>A</sup>  | 451,6 ± 94,0 <sup>A</sup>   |
|              | Незначительное (n) | 14,8 ± 1,7 <sup>B</sup>  | 2,36 ± 0,18 <sup>B</sup>  | 287,8 ± 176,5 <sup>A</sup>  |
|              | Фон (f)            | 15,3 ± 0,8 <sup>B</sup>  | 2,46 ± 0,16 <sup>B</sup>  | 107,5 ± 21,2 <sup>A</sup>   |
| Зообентос    | Значительное (z)   | 9,1 ± 2,0 <sup>A</sup>   | 1,74 ± 0,25 <sup>A</sup>  | 5,8 ± 1,4 <sup>A</sup>      |
|              | Среднее (s)        | 15,1 ± 1,4 <sup>B</sup>  | 2,85 ± 0,13 <sup>B</sup>  | 4,7 ± 1,0 <sup>A</sup>      |
|              | Незначительное (n) | 15,9 ± 2,7 <sup>AB</sup> | 2,60 ± 0,34 <sup>AB</sup> | 10,2 ± 2,2 <sup>A</sup>     |
|              | Фон (f)            | 10,3 ± 2,5 <sup>AB</sup> | 1,88 ± 0,29 <sup>AB</sup> | 2,2 ± 0,5 <sup>A</sup>      |

П р и м е ч а н и е. Обозначенные одинаковыми буквами в столбцах достоверно не различаются ( $P > 0,05$ ) по ANOVA post-hoc критерию Тьюки.

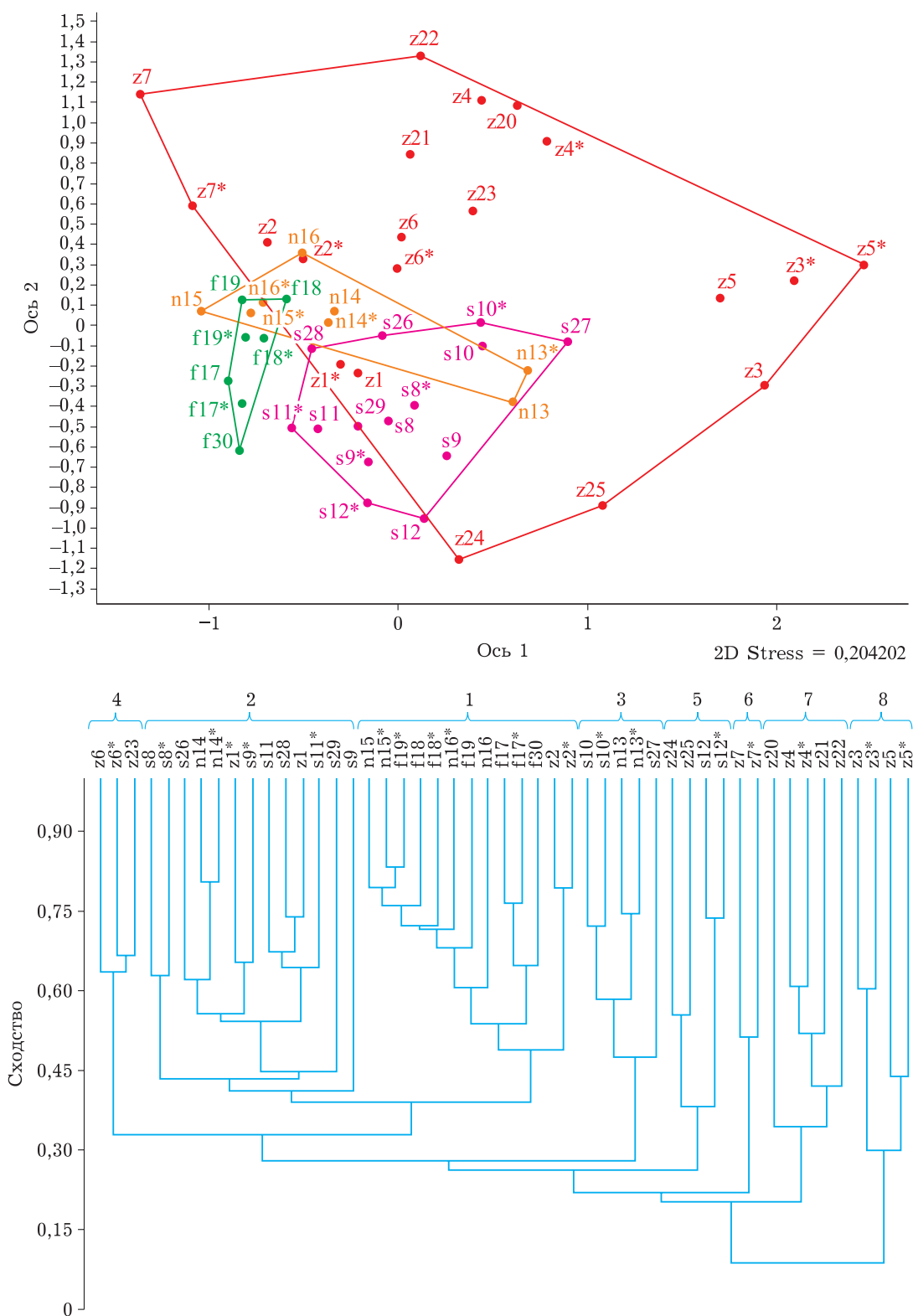


Рис. 3. Результаты неметрического многомерного шкалирования (MDS) (вверху) и кластерного анализа (внизу), выполненных на основе матрицы индексов Брея – Кертиса для зоопланктона. Станции (пробы), расположенные в поясе значительного воздействия, обозначены буквой z и красным цветом, среднего – s и розовым, незначительного – n и желтым, фон – f и зеленым. Звездочками обозначены пробы станций № 1–19, отобранные в 2023 г. По осям 1 и 2 в относительных единицах отложены функции двух наименьших стрессов (напряжений), дающих наибольшее сходство воспроизведенной матрицы с исходной

выявило достоверные различия ( $P < 0,03$ ) между ПСВ, ПНВ и ПФВ, тогда как группа станций ПЗВ недостоверно отличалась от всех остальных групп (см. рис. 2).

Чтобы прояснить группировку станций по составу видов зоопланктона и их численности провели кластерный анализ матрицы индексов сходства Брея – Кертиса (см. рис. 3), по которому выделили кластеры (группы) станций, представленные в табл. 4. По этой таблице можно заметить, что выделенные группы станций (озер) различаются по частоте доминирования и составу доминантов. Также они отличаются в той или иной мере по пределам колебаний и средним значениям глубины, температуры, pH (см. табл. 4).

Так, в первую группу станций (f17 – f19, f30 + n15, n16 + z2) вошли большие глубокие холодные Норильские озера (см. табл. 1) с доминированием коловраток *Kellicottia longispina*, *Keratella cochlearis*, родов *Synchaeta*, *Pol-yarthra* (см. табл. 4). Специфическими для этих озер являются копеподы *Limnocalanus macrurus*, *Cyclops lacustris* (см. табл. 4) и *Arctodiaptomus acutibobatus* (Sars 1903), *Senecella siberica* (Vyshkvartzeva 1994), не вошедшие в таблицу доминантов. Попавшее в эту группу озеро z2 было не глубоким, но холодноводным (см. табл. 1), с таким же коловраточным комплексом, но другими, не попавшими в табл. 4, копеподами (*Eudiaptomus graciloides*, *Heterocope appendiculata*). К этой группе озер по составу коловраточного планктона примыкают сравнительно глубоководные озера z7 (группа 6 в табл. 4) и z6, z23 (группа 4), в последних из копепод доминирует *Cyclops scutifer*, присутствуют *E. graciloides*, *H. appendiculata*.

Во вторую группу станций (n14 + s8, 9, 11, 26, 28, 29 + z1) вошли мелкие водоемы с выраженным доминированием коловратки *Conochilus unicornis* (частота доминирования 100 %, см. табл. 4). Из копепод *Acanthodiaptomus tibetanus* доминировал в оз. s8, *Mixodiaptomus theli* – в s9, *Eudiaptomus gracilis* – в s11 (и присутствовал в оз. s28), *E. graciloides* – в s26, *Cyclops scutifer* – в z1 и s26. Почти во всех перечисленных озерах в небольших количествах обнаружен *H. appendiculata*. *Daphnia cristata* обитала в озерах n14, s9, s26, *Holopedium gibberum* Zaddach 1855 – в s9, s11, s28, z1, а также в большинстве озер первой группы. Кроме того, обнаружены *Limnosida frontosa* Sars 1862

(s9, n14, s26, z1), *Ophryoxus kolymensis* Smirnov 1992 (s9), *Leptodora kindtii* (Focke 1844) (n14). Эта группа станций на рис. 3 близка к рассмотренной выше первой группе из озер f и n поясов.

Третья группа станций (n13, s10, s27) – мелкие озера с более высокой температурой и pH – оказались копеподами с доминированием *E. graciloides*, *H. appendiculata* и *Heterocope borealis*, в оз. n13 в состав доминантов вошла *Daphnia* группы *longispina* (см. табл. 4). Пятую группу образуют небольшие водоемы (z24, z25, s12), сходные по абиотическим характеристикам и составу доминантов со 2-й группой, но меньшие по площади и глубине (см. рис. 3, табл. 4).

Седьмую группу образуют мелкие водоемы (z4, z20–22, см. рис. 3), в некоторых отмечены максимальные температура и pH (см. табл. 4). В них доминируют *Keratella quadrata*, *Asplanchna girodi* (озера z4, z21, z22), *Filinia longiseta* (z20, z22), *Daphnia pulex* (z4, z20), *Moina macrocopa* (z4, z20), *Brachionus urceus* (z20), *Bosmina longirostris* (z22), *Cyclops kolensis* (z21, z22), обнаружены *Brachionus angularis bidens* Plate 1886 (z22), *Brachionus calyciflorus* Pallas 1776 (z4), бделлоиды (z20). Низкое содержание кислорода зарегистрировано в единственном озере – z20 (см. табл. 1), в нем доминировала крупная инфузория *Stentor coeruleus* Ehrenberg 1830, а из рачково-коловраточного зоопланктона – некоторые названные выше виды. Восьмая группа водоемов – кислые озера (z3, z5) (рис. 4, табл. 4). В них доминирует *Brachionus sericus*, но высокой численности он вместе с бделлоидными коловратками достигает только в озере z3.

Биомасса зоопланктона значительно варьирует как в группах, выделенных по видовому составу (см. табл. 4), так и в пространственно выделенных поясах воздействия (см. табл. 3). Минимальная биомасса наблюдается в кислом озере z5 и среди некислых озер – в большом озере n16, а максимальная – в озере z22, другие высокие ( $\geq 1 \text{ г/м}^3$ ) значения – в озерах пояса z (z4, z21, z1), s (s9, s10) и только в одном озере пояса n (n13). Можно отметить тенденцию постепенного увеличения средней биомассы от фонового пояса к поясу значительного воздействия, но различия не достоверны (см. табл. 3). Что касается видового богатства и разнообразия, то отмечается тенденция уменьшения от



Выделенные по результатам MDS и кластерного анализа группы станций поясов воздействия значительного (z), среднего (s), незначительного (n) и фона (f) с пределами колебаний (над чертой) и средними  $\pm$  стандартное отклонение (под чертой) показателями температуры, pH воды, глубины станции (озера), числа видов в пробе, индекса Шеннона и биомассы; частота встречаемости (%) видов зоопланктона в доминантах с численностью > 5 % от суммарной на станции. Норильский дивизион, 2022–2023 гг.

| Показатель                                     | 1. f (17–19,30)<br>n (15,16) + z (2) | 2. n (14) + s (8,<br>9, 11, 26, 28,<br>29) + z (1) | 3. n (13) +<br>s (10, 27) | 4. z (6,23)      | 5. z (24,25)<br>+ s (12) | 6. z (7)         | 7. z (4, 20–22) | 8. z (3,5)       |
|------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------|------------------|--------------------------|------------------|-----------------|------------------|
| 1                                              | 2                                    | 3                                                  | 4                         | 5                | 6                        | 7                | 8               | 9                |
| Число проб                                     | 13                                   | 13                                                 | 5                         | 3                | 4                        | 2                | 5               | 4                |
| <u>t, °C, lim</u>                              | <u>4,8–19,0</u>                      | <u>8,5–19,0</u>                                    | <u>10,9–20,7</u>          | <u>10,6–15,1</u> | <u>10,0–14,4</u>         | <u>11,4–14,6</u> | <u>9,5–21,1</u> | <u>9,0–17,8</u>  |
| средняя $\pm$ SD                               | 12,9 $\pm$ 4,0                       | 13,6 $\pm$ 2,9                                     | 15,9 $\pm$ 4,1            | 12,4 $\pm$ 2,1   | 12,0 $\pm$ 1,8           | 13,4 $\pm$ 1,5   | 13,2 $\pm$ 4,5  | 13,8 $\pm$ 3,6   |
| <u>pH, lim</u>                                 | <u>5,7–8,6</u>                       | <u>6,1–8,4</u>                                     | <u>7,2–8,6</u>            | <u>6,5–8,3</u>   | <u>6,0–8,2</u>           | <u>8,0–8,3</u>   | <u>6,5–8,8</u>  | <u>3,3–4,0</u>   |
| средняя $\pm$ SD                               | 7,0 $\pm$ 0,8                        | 7,0 $\pm$ 0,6                                      | 7,9 $\pm$ 0,6             | 7,6 $\pm$ 0,8    | 7,3 $\pm$ 1,8            | 8,2 $\pm$ 0,1    | 7,8 $\pm$ 1,0   | 3,6 $\pm$ 0,3    |
| <u>H, м, lim</u>                               | <u>1,5–30,0</u>                      | <u>1,0–3,0</u>                                     | <u>1,5–3,5</u>            | <u>2,0–5,5</u>   | <u>1,0–1,8</u>           | <u>4,0–4,5</u>   | <u>2,0–3,0</u>  | <u>1,0–2,0</u>   |
| средняя $\pm$ SD                               | 15,0 $\pm$ 12,0                      | 1,9 $\pm$ 0,6                                      | 2,0 $\pm$ 0,8             | 4,0 $\pm$ 1,8    | 1,3 $\pm$ 0,4            | 4,3 $\pm$ 0,4    | 2,6 $\pm$ 0,3   | 1,6 $\pm$ 0,4    |
| <u>Число видов, lim</u>                        | <u>12–19</u>                         | <u>6–21</u>                                        | <u>6–10</u>               | <u>6–10</u>      | <u>5–7</u>               | <u>9–10</u>      | <u>7–15</u>     | <u>3–5</u>       |
| средняя $\pm$ SD                               | 14,9 $\pm$ 2,1                       | 12,6 $\pm$ 4,4                                     | 7,4 $\pm$ 1,7             | 8,3 $\pm$ 2,1    | 6,3 $\pm$ 1,0            | 9,5 $\pm$ 0,7    | 10,4 $\pm$ 3,2  | 3,5 $\pm$ 1,0    |
| <u>Шеннона, lim</u>                            | <u>1,8–3,1</u>                       | <u>0,7–3,0</u>                                     | <u>1,1–1,9</u>            | <u>1,7–1,8</u>   | <u>0,2–0,7</u>           | <u>0,7–1,4</u>   | <u>0,1–2,3</u>  | <u>0,3–0,9</u>   |
| средняя $\pm$ SD                               | 2,6 $\pm$ 0,4                        | 1,7 $\pm$ 0,8                                      | 1,6 $\pm$ 0,3             | 1,8 $\pm$ 0,1    | 0,4 $\pm$ 0,3            | 1,0 $\pm$ 0,5    | 1,3 $\pm$ 0,9   | 0,7 $\pm$ 0,3    |
| <u>Биомасса, мг/м<sup>3</sup>, lim</u>         | <u>6,3–198,1</u>                     | <u>12,3–1807</u>                                   | <u>21,5–1508</u>          | <u>271,6–503</u> | <u>144–526,9</u>         | <u>9,6–24,7</u>  | <u>418–3136</u> | <u>0,3–859,6</u> |
| средняя $\pm$ SD                               | 97 $\pm$ 62                          | 448 $\pm$ 503                                      | 696 $\pm$ 624             | 350 $\pm$ 133    | 370 $\pm$ 170            | 17 $\pm$ 11      | 1391 $\pm$ 1067 | 350 $\pm$ 424    |
| <i>Synchaeta grandis</i> Zacharias 1893        | 62                                   |                                                    |                           |                  |                          | 100              |                 |                  |
| <i>Synchaeta lakowitziana</i> Lucks 1912       | 39                                   |                                                    |                           |                  |                          |                  |                 |                  |
| <i>Polyarthra</i> spp.                         | 54                                   |                                                    |                           |                  |                          |                  |                 |                  |
| <i>Ploesoma truncatum</i> (Levander 1894)      | 8                                    | 8                                                  |                           |                  |                          |                  |                 |                  |
| <i>Bipalpus hudsoni</i> (Imhof 1891)           |                                      | 15                                                 |                           |                  |                          | 50               |                 |                  |
| <i>Asplanchna priodonta</i> Gosse 1850         | 31                                   |                                                    |                           | 67               |                          |                  | 20              |                  |
| <i>A. girodi</i> Guerne 1888                   |                                      |                                                    |                           |                  |                          |                  | 40              |                  |
| <i>Brachionus sericus</i> Rousselet 1907       |                                      |                                                    |                           |                  |                          |                  |                 | 100              |
| <i>Brachionus urceus</i> (Linnaeus 1758)       |                                      |                                                    |                           |                  |                          |                  | 20              |                  |
| <i>Keratella cochlearis</i> (Gosse 1851)       | 92                                   |                                                    |                           |                  |                          | 50               |                 |                  |
| <i>Keratella quadrata</i> (Müller 1786)        |                                      |                                                    |                           |                  |                          |                  | 80              |                  |
| <i>Kellicottia longispina</i> (Kellicott 1879) | 92                                   | 46                                                 | 20                        | 67               |                          |                  |                 |                  |
| <i>Conochilus unicornis</i> Rousselet 1892     | 54                                   | 100                                                |                           |                  | 50                       |                  |                 |                  |
| <i>Collotheca pelagica</i> (Rousselet 1893)    | 15                                   |                                                    |                           |                  | 25                       |                  |                 |                  |
| <i>Filinia longiseta</i> (Ehrenberg 1834)      |                                      |                                                    |                           |                  |                          |                  | 40              |                  |
| Bdelloida                                      |                                      |                                                    |                           |                  |                          |                  |                 | 25               |
| Науплии Copepoda                               | 31                                   | 54                                                 | 100                       | 67               |                          |                  |                 | 25               |
| Копеподиты Calanoida                           | 15                                   | 8                                                  | 60                        |                  |                          |                  |                 |                  |

| 1                                                     | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7 | 8  | 9 |
|-------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|---|----|---|
| <i>Limnocalanus macrurus</i> Sars 1863                | 15 |    |    |    |    |   |    |   |
| <i>Heterocope appendiculata</i> Sars 1863             |    | 8  | 20 |    |    |   |    |   |
| <i>Heterocope borealis</i> (Fischer 1851)             |    |    | 20 |    |    |   |    |   |
| <i>Acanthodiptomus tibetanus</i> (Daday 1908)         |    | 8  |    |    |    |   |    |   |
| <i>Eudiaptomus gracilis</i> (Sars 1863)               |    | 8  |    |    |    |   |    |   |
| <i>E. graciloides</i> (Lilljeborg 1888)               |    | 8  | 40 |    |    |   |    |   |
| <i>Mixodiptomus theeli</i> (Lilljeborg 1889)          |    | 15 |    |    | 50 |   |    |   |
| Копеподиты Cyclopoida                                 | 23 | 39 | 60 |    |    |   | 20 |   |
| <i>Cyclops</i> sp.                                    |    |    | 20 |    |    |   |    |   |
| <i>Cyclops scutifer</i> Sars 1863                     |    | 15 |    | 67 |    |   |    |   |
| <i>Cyclops kolensis</i> Lilljeborg 1901               |    |    |    |    |    |   | 20 |   |
| <i>Cyclops lacustris</i> Sars 1863                    | 31 |    |    |    |    |   |    |   |
| <i>Mesocyclops leuckarti</i> (Claus 1857)             |    |    | 20 |    |    |   |    |   |
| <i>Daphnia pulex</i> Leydig 1860                      |    |    |    |    |    |   | 40 |   |
| <i>Daphnia cristata</i> Sars 1862                     |    | 8  |    |    |    |   |    |   |
| <i>Daphnia longispina</i> O. F. Müller 1776 s. l.     |    |    | 20 |    |    |   |    |   |
| <i>Moina macrocopa</i> (Straus 1820)                  |    |    |    |    |    |   | 20 |   |
| <i>Bosmina longirostris</i> (O. F. Müller 1785)       |    | 23 |    |    |    |   | 20 |   |
| <i>Bosmina</i> (E.) cf. <i>longispina</i> Leydig 1860 | 15 | 15 |    |    |    |   |    |   |

первых групп станций из фонового и незначительного поясов к некоторым группам станций значительного пояса числа видов (к группам 5, 8 и др.) и индекса Шеннона (к группам 5–8) (см. табл. 4). Несмотря на варьирование выше-названных показателей внутри поясов и перекрывание показателей некоторых станций из разных поясов, ANOVA с post-hoc тестами по четырем априори пространственно выделенным поясам показали наличие достоверных различий между группами станций ПФВ + ПНВ и ПСВ + ПЗВ как в числе видов, так и в индексе Шеннона (см. табл. 3). А именно, число видов и индекс Шеннона в озерах ПФВ и ПНВ были существенно выше, чем в озерах ПСВ и ПЗВ (см. табл. 3).

### Зообентос

В составе зообентоса в 28 озерах за 2 года исследований (2022–2023 гг.) обна-

ружено 132 таксона: Diptera – 80 (личинок хирономид – 77), Oligochaeta – 11, Trichoptera – 10, Mollusca – 9, Amphipoda – 5, Coleoptera и Ephemeroptera – по 3, Hirudinea и Anostraca – по 2, Plecoptera, Hemiptera, Megaloptera, Mysidacea, Nematoda, Turbellaria, Acari – по одному таксону. Всего в 13 водоемах ПЗВ обнаружено 78 видов и форм, в девяти водоемах ПСВ – 80, в четырех водоемах ПНВ – 66 и в четырех водоемах ПФВ – 35.

Результаты MDS показали (рис. 4), что имеются значительные меж- и внутригрупповые различия в численности и видовом составе зообентоса на отдельных станциях, принадлежащих к ПНВ и ПФВ, с одной стороны, и станциям ПЗВ и ПСВ – с другой. Станции ПЗВ и ПСВ полностью перекрываются. Анализ сходства ANOSIM выявил, что различия по составу видов бентоса и их численности между выделенными группами станций, расположенными в поясах с различной

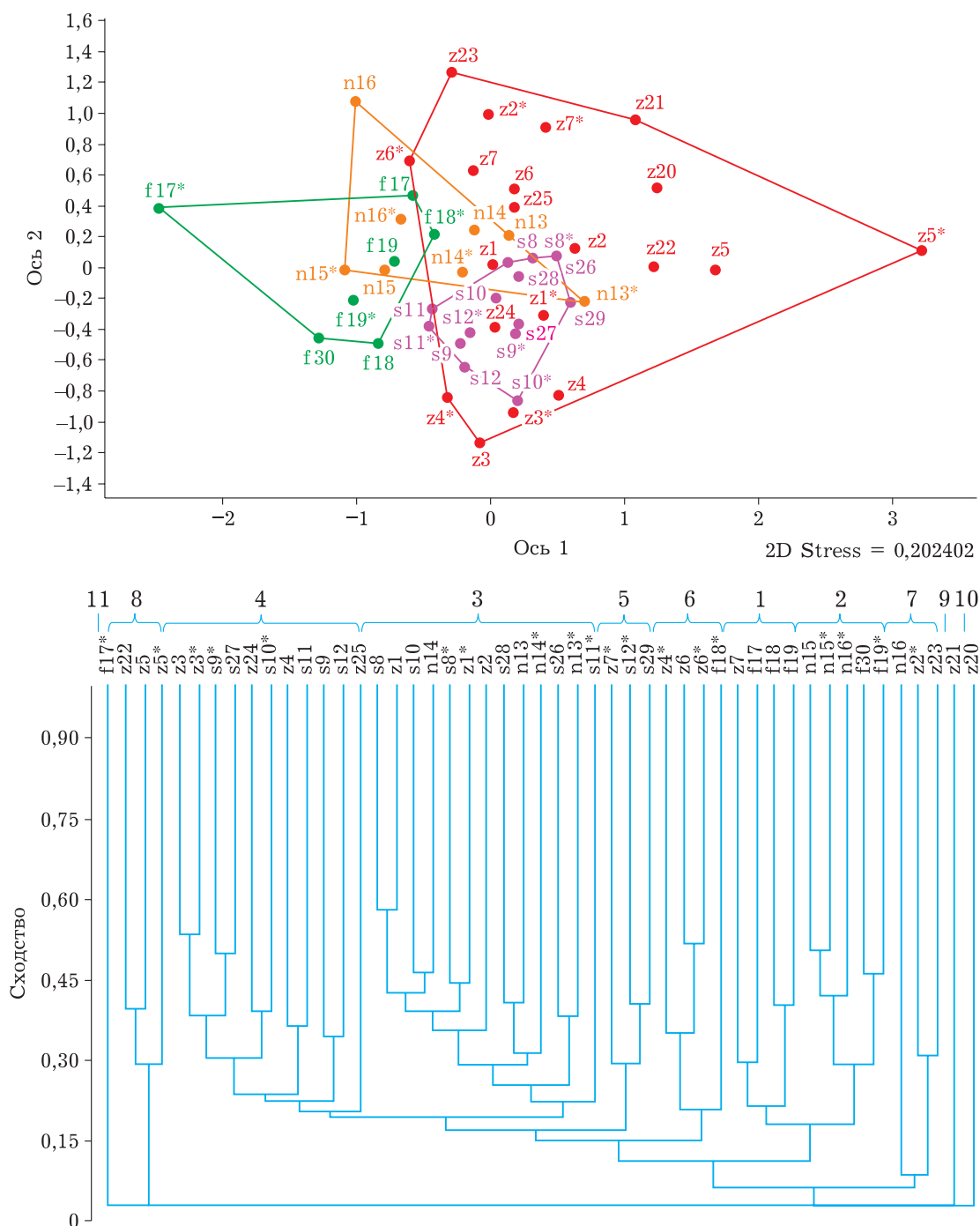


Рис. 4. Результаты неметрического многомерного шкалирования (MDS) (вверху) и кластерного анализа (внизу), выполненных на основе матрицы индексов Брея – Кертиса для зообентоса. Станции (пробы), расположенные в поясе значительного воздействия, обозначены буквой z и красным цветом, среднего – s и розовым, незначительного – n и желтым, фон – f и зеленым. Звездочками обозначены пробы станций № 1–19, отобранные в 2023 г. По осям 1 и 2 в относительных единицах отложены функции двух наименьших стрессов (напряжений), дающих наибольшее сходство воспроизведенной матрицы с исходной

степенью воздействия, в целом не являются достоверными:  $P = 0,062$ . Однако попарное сравнение групп, относящихся к различным поясам воздействия, выявило достовер-

ные различия ( $P < 0,03$ ) между ПСВ, ПНВ и ПФВ, тогда как группа станций ПЗВ достоверно отличалась от всех остальных групп (см. рис. 4).

Чтобы прояснить группировку станций по составу видов зообентоса и их численности, провели кластерный анализ матрицы индексов сходства Брея – Кертиса (см. рис. 4), по которому выделили кластеры (группы) станций, представленные в табл. 5. По этой таблице можно заметить, что выделенные группы станций (озер) различаются по частоте доминирования и составу доминантов. Также они отличаются в той или иной мере по пределам колебаний и средним значениям глубины, температуры, pH.

Так, в первую группу станций (f17, f18, f19, z7, см. рис. 4) вошли большие глубокие холодные Норильские озера (см. табл. 1) с доминированием личинок хирономид *Parakiefferiella bathophila* (см. табл. 5). Специфическими для этих озер являются личинки *Diplocladus cultriger*, *Mesocricotopus thienemanni* (см. табл. 5) и амфиподы *Eulimnogammarus* sp., не вошедшие в таблицу доминантов. Попавшее в эту группу озеро z7 было сравнительно неглубоким (см. табл. 1) с преобладанием в нем личинок хирономид *Paratrichocladius inaequalis* и *Paratanytarsus austriacus*.

К первой группе станций по составу зообентоса близко примыкает вторая группа станций (f19\*, f30, n15, n16\*) с разными глубинами, в которых доминируют амфиподы *Monoporeia affinis* и олигохеты *Lumbriculidae* gen sp. (см. табл. 5). Специфическими для первой и второй групп станций отмечены амфиподы *Pallasea kessleri* (n15, f18, f19) и личинки хирономид *Monodiamesa bathyphila* (n15, n16\*, f17), которые не вошли в таблицу доминантов.

В третью группу станций (n13, n13\*, n14, n14\*, s8, s8\*, s10, s11\*, s26, s28, z1, z1\*, z2) вошли мелкие водоемы с доминированием личинок хирономид *Cladotanytarsus* gr. *mancus*, *Paratanytarsus lauterborni*, *Tanytarsus verralli*, *Procladius ferrugineus* (см. табл. 5). Почти во всех перечисленных озерах обнаружены олигохеты *Spirosperma ferox*, амфиподы *Gammarus lacustris*, моллюски *Sphaerium* sp. Также только в этой группе озер зарегистрированы поденки, ручейники, моллюски рода *Cincinna* (n13, n14, s11\*), *Lytnaeva ovata* (n13, n14, z2), которые не вошли в таблицу с доминантами.

Четвертая группа станций (s9, s10\*, s11, s12, s27, z3, z3\*, z4, z24, z25) – это мелкие озера с более высокой температурой и разным pH.

В этих озерах преобладали личинки хирономид *Psectrocladius fabricius*, *Procladius ferrugineus*, встречались олигохеты *Lumbriculidae* gen sp., *Spirosperma ferox*. В озерах z4, s11 в составе доминантов также отмечены личинки хирономид *Chironomus salinarius* и *Derotanypus sibiricus* (см. табл. 5). Специфическими в этой группе озер обнаружены жаброногие раки *Polyartemia forcipata*, *Branchinecta paludosa* (z24, z25) и личинки хирономид *Cricotopus* gr. *silvestris* (z4), не вошедшие в таблицу с доминантами.

Пятую группу образуют неглубокие водоемы (s12\*, s29, z7\*) с доминированием личинок хирономид *Cladopelma lateralis*, *Cladotanytarsus* gr. *mancus*, встречались олигохеты *Spirosperma ferox* и *Lumbriculidae* gen sp. (см. рис. 4, табл. 5).

Шестую группу образуют мелкие водоемы (z4\*, z6) и крупное озеро (f18\*) за счет преобладания в них личинок хирономид *Procladius choreus* и *Procladius ferrugineus*. Совместно с ними встречались личинки хирономид *Pagastiella orophila* (z6), *Parakiefferiella triquetra* (z6), *Stictochironomus* gr. *histrio* (f18\*). Специфическими для этой группы станций отмечены личинки большекрылок *Sialis sibirica* (z6), амфиподы *Pallasea kessleri* (f18\*), которые не вошли в таблицу с доминантами.

Седьмую группу образуют мелкие водоемы (n16, z2\*, z23, см. рис. 4) в основном за счет доминирования в них амфипод *Gammarus lacustris* (z2\*, z23).

В восьмую группу станций вошли мелководные озера с разной pH (z5, z22), с доминированием личинок хирономид *Camptochironomus tentans*, *Chironomus cingulatus*. Совместно с ними в озере z22 обнаружены личинки хирономид *Dicrotendipes pelochloris*, *Tanytarsus pseudolestagei* (см. табл. 5).

Озера z20, z21, f17\* формируют отдельные три группы озер (см. рис. 4). Так, в озере z20 отмечено низкое содержание кислорода (см. табл. 1), в нем доминировали мокрецы. В озере z21 найдены только личинки хирономид *Abalabesmyia* gr. *monilis*. В озере f17\*, как и в озерах второй группы, преобладали амфиподы *Monoporeia affinis*, встречены личинки хирономид *Conchapelopia* sp. (см. табл. 5).

Биомасса зообентоса значительно варьировала как в группах, выделенных по видовому составу (см. табл. 5), так и в пространственно

Выделенные по результатам MDS и кластерного анализа группы станций поясов воздействия значительного (z), среднего (s), незначительного (n) и фона (f) с пределами колебаний (над чертой) и средними  $\pm$  стандартная ошибка (под чертой) показатели температуры, pH воды, глубины станции (озера), числа видов в пробе, индекса Шеннона и биомассы; тип грунта, частота встречаемости (%) видов зообентоса в доминантах с численностью  $> 10\%$  от суммарной на станции. Норильский дивизион, 2022–2023 гг.

| Показатель                                | 1. f17, f18, f19, z7                            | 2. f19*, f30, n15, n16* | 3. n13, n14, s8, s10, s11*, s13, s26, s28, z1, z2           | 4. s9, s10*, s11, s12, s27, z3, z4, z24, z25                       | 5. s12*, s29, z7*                        | 6. z4*, z6, f18* | 7. n16, z2*, z23                                     | 8. z5, z22      | 9. z20 | 10. z21                                 | 11. f 17* |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------|------------------------------------------------------|-----------------|--------|-----------------------------------------|-----------|
| 1                                         | 2                                               | 3                       | 4                                                           | 5                                                                  | 6                                        | 7                | 8                                                    | 9               | 10     | 11                                      | 12        |
| Число проб                                | 4                                               | 5                       | 13                                                          | 11                                                                 | 3                                        | 4                | 3                                                    | 3               | 1      | 1                                       | 1         |
| t, °C, lim                                | 9,2–14,5                                        | 4,8–17,8                | 8,7–20,4                                                    | 10,9–20,7                                                          | 10,1–11,4                                | 6,0–14,9         | 11,0–19,0                                            | 9,2–14,2        | 19,9   | 9,5                                     | 6,1       |
| средняя $\pm$ SE                          | 10,7 $\pm$ 1,3                                  | 12,2 $\pm$ 2,4          | 13,6 $\pm$ 0,8                                              | 14,7 $\pm$ 0,9                                                     | 10,7 $\pm$ 0,4                           | 10,4 $\pm$ 1,8   | 13,8 $\pm$ 2,6                                       | 11,2 $\pm$ 1,5  |        |                                         |           |
| pH, lim                                   | 6,69–8,31                                       | 6,28–7,67               | 6,47–8,60                                                   | 3,84–9,98                                                          | 6,18–8,25                                | 5,73–8,19        | 7,28–8,54                                            | 3,33–8,54       | 6,88   | 6,48                                    | 6,40      |
| средняя $\pm$ SE                          | 7,20 $\pm$ 0,38                                 | 6,79 $\pm$ 0,24         | 7,44 $\pm$ 0,23                                             | 6,93 $\pm$ 0,55                                                    | 7,07 $\pm$ 0,61                          | 7,09 $\pm$ 0,55  | 8,05 $\pm$ 0,39                                      | 5,10 $\pm$ 1,72 |        |                                         |           |
| H, м, lim                                 | 4,5–28,0                                        | 4,0–30,0                | 1,0–3,5                                                     | 1,0–3,0                                                            | 1,0–4,0                                  | 2,5–30,0         | 1,5–2,0                                              | 1,7–2,5         | 3,00   | 2,75                                    | 30,00     |
| средняя $\pm$ SE                          | 17,7 $\pm$ 5,0                                  | 12,4 $\pm$ 5,1          | 2,1 $\pm$ 0,2                                               | 1,6 $\pm$ 0,2                                                      | 2,25 $\pm$ 0,90                          | 10,6 $\pm$ 6,5   | 1,7 $\pm$ 0,2                                        | 2,0 $\pm$ 0,3   |        |                                         |           |
| Число видов, lim                          | 10–23                                           | 6–20                    | 15–36                                                       | 4–20                                                               | 5–9                                      | 3–12             | 3–7                                                  | 1–7             | 2      | 1                                       | 2         |
| средняя $\pm$ SE                          | 14 $\pm$ 3                                      | 11 $\pm$ 3              | 21 $\pm$ 2                                                  | 12 $\pm$ 2                                                         | 7 $\pm$ 1                                | 7 $\pm$ 2        | 5 $\pm$ 1                                            | 4 $\pm$ 2       |        |                                         |           |
| Шеннона, lim                              | 0,7–3,1                                         | 1,3 $\pm$ 2,7           | 2,0–3,8                                                     | 1,6–3,6                                                            | 0,8–2,7                                  | 1,0–3,3          | 0,8–2,4                                              | 0,0–2,4         | 0,72   | 0,00                                    | 1,00      |
| средняя $\pm$ SE                          | 1,7 $\pm$ 0,3                                   | 2,1 $\pm$ 0,3           | 3,2 $\pm$ 0,1                                               | 2,5 $\pm$ 0,2                                                      | 1,9 $\pm$ 0,6                            | 1,8–0,5          | 1,7 $\pm$ 0,5                                        | 0,9 $\pm$ 0,8   |        |                                         |           |
| Биомасса, г/м <sup>2</sup> , lim          | 0,40–8,28                                       | 0,70–19,54              | 2,49–23,40                                                  | 1,15–14,98                                                         | 0,38–4,63                                | 0,41–3,83        | 0,15–6,94                                            | 0,22–9,88       | 0,08   | 0,05                                    | 0,33      |
| средняя $\pm$ SE                          | 2,50 $\pm$ 0,90                                 | 9,47 $\pm$ 3,86         | 10,35 $\pm$ 1,52                                            | 4,96 $\pm$ 1,36                                                    | 1,92 $\pm$ 1,36                          | 2,06 $\pm$ 0,88  | 2,88 $\pm$ 2,07                                      | 6,00 $\pm$ 2,94 |        |                                         |           |
| Грунт                                     | Ил, детрит, камни, высшая водная растительность | Ил, камни, детрит       | Ил, растительность, детрит, мох, торф, глина, галька, камни | Ил, детрит, высшая водная растительность, торф, мох, галька, камни | Камни, ил, высшая водная растительность, | Ил, детрит       | Ил, детрит, мох, высшая водная растительность, камни | Ил, детрит, мох | Ил     | Ил, песок, высшая водная растительность | Камни, ил |
| Тип Annelida                              | 25                                              | 60                      | 8                                                           | 27                                                                 | 33                                       |                  |                                                      |                 |        |                                         |           |
| Класс Oligochaeta                         |                                                 |                         |                                                             |                                                                    |                                          |                  |                                                      |                 |        |                                         |           |
| Lumbriculidae gen sp.                     |                                                 |                         |                                                             |                                                                    |                                          |                  |                                                      |                 |        |                                         |           |
| <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> Claparede | 25                                              |                         |                                                             |                                                                    |                                          |                  |                                                      |                 |        |                                         |           |

| 1                                                   | 2 | 3  | 4  | 5  | 6   | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12  |
|-----------------------------------------------------|---|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|-----|
| <i>Spirosperma ferox</i> Eisen                      |   |    | 15 | 27 | 33  |    |    |    |    |    |     |
| <i>Tubifex tubifex</i><br>O. F. Müller              |   |    | 8  | 9  |     | 25 |    |    |    |    |     |
| Тип Arthropoda                                      |   |    | 15 |    |     |    | 67 |    |    |    |     |
| Класс Malacostraca                                  |   |    |    |    |     |    |    |    |    |    |     |
| <i>Gammarus lacustris</i> Sars                      |   |    |    |    |     |    |    |    |    |    |     |
| <i>Monoporeia affinis</i><br>Lindström              |   | 80 |    |    |     |    |    |    |    |    | 100 |
| Класс Insecta                                       |   |    |    |    |     |    |    | 67 |    |    |     |
| Отр. Diptera                                        |   |    |    |    |     |    |    |    |    |    |     |
| Сем. Chironomidae                                   |   |    |    |    |     |    |    |    |    |    |     |
| Подсем. Chironominae                                |   |    |    |    |     |    |    |    |    |    |     |
| <i>Camptochironomus</i><br><i>tentans</i> Fabricius |   |    |    |    |     |    |    |    |    |    |     |
| <i>Chironomus cingulatus</i><br>Meigen              |   |    | 8  |    |     |    |    | 67 |    |    |     |
| <i>Chironomus salinaricus</i><br>Kieffer            |   |    |    | 9  |     |    |    |    |    |    |     |
| <i>Cladopelma gr. lateralis</i>                     |   |    | 8  | 9  | 67  |    | 33 |    |    |    |     |
| <i>Cladotanytarsus</i><br><i>gr. mancus</i>         |   |    | 39 |    | 100 |    |    |    |    |    |     |
| <i>Cryptochironomus</i><br><i>gr. defectus</i>      |   |    | 8  |    |     |    |    |    |    |    |     |
| <i>Dicrotendipes pelochloris</i><br>Kieffer         |   |    | 8  |    |     |    |    | 33 |    |    |     |
| <i>Dicrotendipes nervosus</i><br>Staeger            |   |    |    | 9  |     |    |    |    |    |    |     |
| <i>Endochironomus</i><br><i>albipennis</i> Meigen   |   |    | 8  |    |     |    |    |    |    |    |     |
| <i>Microtendipes pedellus</i><br>De Geer            |   |    | 8  | 9  |     |    |    |    |    |    |     |
| <i>Pagastiella orophila</i><br>Edwards              |   |    |    |    |     | 25 |    |    |    |    |     |



|                                                                  |    |    |    |    |    |  |
|------------------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|--|
| <i>Paracladopelma</i><br><i>gr. camptolabis</i>                  | 20 |    |    |    |    |  |
| <i>Paratanytarsus austriacus</i><br>Kieffer                      | 25 |    |    |    |    |  |
| <i>Paratanytarsus lauterborni</i><br>Kieffer                     |    | 39 |    |    |    |  |
| <i>Stictochironomus</i><br><i>gr. histrio</i>                    |    |    | 33 | 25 | 33 |  |
| <i>Tanytarsus lestagei</i><br>Goetghebuer                        | 20 | 8  |    |    |    |  |
| <i>Tanytarsus pallidicornis</i><br>Walker                        |    |    | 9  |    |    |  |
| <i>Tanytarsus pseudolestagei</i><br>Shilova                      |    | 39 | 33 |    | 33 |  |
| <i>Tanytarsus verralli</i><br>Goetghebuer                        |    | 23 | 33 |    |    |  |
| Понцем.Orthocladinae<br><i>Diplocladius cultriger</i><br>Kieffer | 25 |    |    |    |    |  |
| <i>Heterotrissocladius</i><br><i>gr. macaeri</i>                 | 20 |    |    |    |    |  |
| <i>Heterotrissocladius</i><br><i>gr. subpilosus</i>              | 20 |    |    |    |    |  |
| <i>Mesocricotopus</i><br><i>thienemanni</i> Goeth.               | 25 |    |    |    |    |  |
| <i>Paratrichocladius</i><br><i>inaequalis</i> Kieffer            | 25 |    |    |    | 33 |  |
| <i>Parakiefferiella triquetra</i><br>Pancratova                  |    |    |    | 25 | 33 |  |
| <i>Parakiefferiella bathophila</i><br>Kieffer                    | 75 |    |    |    |    |  |
| <i>Psectrocladius fabricus</i><br>Zelentsov                      |    |    | 50 |    |    |  |

| 1                                                         | 2  | 3  | 4  | 5  | 6 | 7  | 8  | 9 | 10  | 11  | 12  |
|-----------------------------------------------------------|----|----|----|----|---|----|----|---|-----|-----|-----|
| <i>Psectrocladius sordidellus</i><br>Zett.                |    |    |    | 18 |   |    |    |   |     |     |     |
| <i>Orthocladius defensus</i><br>Makar. et Makar.          | 25 |    |    |    |   |    |    |   |     |     |     |
| <i>Orthocladius saricola</i><br>Kieffer                   | 25 |    |    |    |   |    | 33 |   |     |     |     |
| Подсем. Tanytopodinae                                     |    |    | 15 |    |   |    |    |   |     |     |     |
| <i>Ablabesmyia gr. monilis</i>                            |    |    |    |    |   |    |    |   |     | 100 |     |
| <i>Ablabesmyia gr. annulata</i>                           |    |    | 8  | 9  |   |    |    |   |     |     |     |
| <i>Conchapelopia</i> sp.                                  |    |    |    |    |   |    |    |   |     |     | 100 |
| <i>Derotanyptus sibiricus</i><br>Kruglova et Tshernovskij |    |    |    | 9  |   |    |    |   |     |     |     |
| <i>Procladius choreus</i> Meigen                          |    |    |    | 9  |   | 50 |    |   |     |     |     |
| <i>Procladius ferrugineus</i><br>Kieffer                  |    | 20 | 39 | 27 |   | 75 |    |   |     |     |     |
| Сем. Ceratopogonidae<br>gen. sp.                          |    |    |    |    |   |    |    |   | 100 |     |     |
| Тип Mollusca                                              |    |    |    |    |   |    |    |   |     |     |     |
| Класс Bivalvia                                            |    |    |    | 9  |   |    |    |   |     |     |     |
| Euglesa sp.                                               |    |    |    |    |   |    |    |   |     |     |     |
| <i>Sphaerium</i> sp.                                      |    |    | 8  |    |   |    |    |   |     |     |     |

выделенных поясах воздействия (см. табл. 3). Минимальная биомасса отмечена в озерах z20, z21, в кислом озере z5\* и озере n16, а максимальная – в озере z1, другие высокие ( $\geq 10$  г/м<sup>2</sup>) значения – в озерах ПЗВ (z2, z25), ПСВ (s26), ПНВ (n13, n14, n15). Прослеживается увеличение средней биомассы зообентоса от ПФВ к ПНВ и снижение к ПСВ и ПЗВ, но различия между всеми поясами воздействия не достоверны ( $P > 0,05$ ) (см. табл. 3). Число видов и видовое разнообразие бентофауны увеличиваются от станций ПФВ к станциям ПНВ и ПСВ и снижаются к станциям ПЗВ. Однако по данным ANOVA с post-hoc тестами по четырём априори пространственно выделенным поясам выявлено достоверное различие только между группами станций ПЗВ и ПСВ как в числе видов, так и в индексе Шеннона (см. табл. 3). То есть, число видов и индекс Шеннона в озерах ПСВ были существенно выше, чем в озерах ПЗВ (см. табл. 3).

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что видовой состав гидробионтов озёр рассматриваемой территории в целом очень сходен (см. рис. 2–4). Единственная группа, которая очевидно образовала отдельную ветвь на кластерном дереве – станции ПФВ (кластеры № 1 на рис. 2, 3, № 1, 2 на рис. 4). Однако это может объясняться спецификой озёр – фоновые станции располагались в крупных глубоких холодноводных озёрах тектонического происхождения – Лама, Собачье и Глубокое, относящихся к Норило-Пясинской озерно-речной системе. Видовой состав этих озёр оказался, с одной стороны, специфичным и отличался от остальной группы более мелких и меньших по площади озёр, а с другой стороны – достаточно сходным между собой, что позволило им сформировать отдельную группу. Комплекс видов в целом близок к ранее опубликованным для этих озёр спискам [Глуценко, Заделенов, 2015; Дубовская и др., 2010; Дубовская, 2020; Fefilova et al., 2021]. Следует, однако, отметить, что различия видового состава могут в значительной степени нивелироваться при использовании в качестве фона озёр более близких по морфометрии и гидрофизическим показателям к озёрам остальных поясов. Например, состав планктона в обследо-

ванных нами ранее небольших и неглубоких озёрах, расположенных в 100–200 км южнее [Дубовская и др., 2010] и 500 км севернее [Гладышев и др., 2023] Норильска и, очевидно, не испытывающих воздействия промышленных предприятий, был более сходен с озёрами ПЗВ и ПСВ, чем состав планктона озёр Лама, Глубокое и Собачье. Две станции ПНВ – n15 и n16, оказавшиеся в одном кластере с фоновыми станциями (см. рис. 2–4), расположены в озёрах Глубокое и Мелкое той же Норило-Пясинской системы, что и фоновые озёра, причем ниже их по течению, чем, очевидно, и объясняется сходство их видового состава.

Для остальных озёр не обнаружено явной зависимости видового состава от принадлежности к определенному поясу (т. е. от расстояния до источника антропогенного воздействия). Более того, нам не удалось выявить достоверных различий видового состава между озёрами ПЗВ и каждого из остальных поясов, включая фоновые. Рассмотрим возможные причины.

Предполагается, что на обследованной территории существует общий пул видов (мета-сообщество), а преобладание определенного комплекса видов в конкретном водоеме определяется характеристиками водоема. На первый взгляд, при анализе бета-разнообразия это должно приводить к разделению озёр по поясам воздействия. Однако, судя по результатам нашего анализа, существенные изменения видового состава происходят только в случае кардинального изменения условий обитания. В анализируемой совокупности мы можем выделить шесть таких озёр.

В первую очередь это кислые озёра z3 и z5, которые населяет коловратка-ацидобийонт *Brachionus sericus* [Кутикова, 1970] и встречаются ацидофильные виды [Барина и др., 2000] – диатомеи рода *Eunotia*. Однако, судя по очень низкой биомассе фито- и зоопланктона в z5, водоем токсичен даже для толерантных видов. Действительно, в составе зообентоса этого озера преобладали личинки хируномид рода *Chironomus*, что указывает на то, что озеро подвержено загрязнению.

Также специфичен видовой состав озёр z4, z20 (озеро с высокой температурой воды и низким содержанием кислорода, см. табл. 1), z21 и z22. В зоопланктоне этих озёр доминируют виды, указываемые И. Н. Андрониковой

[1996] как индикаторы эвтрофирования, а именно *Keratella quadrata* (z4, z21, z22), коловратки рода *Brachionus* (z4, z20, z22), *Filinia longiseta* (z20, z22), *Daphnia pulex* (z4, z20), *Bosmina longirostris* (z22), *Cyclops kolensis* (z21, z22). Преобладающая в планктоне z4 и z20 *Moina macroscopa* – теплолюбивый вид, выдерживающий значительное осолонение и высокие величины pH [Коровчинский и др., 2021], т. е. способный развиваться в водоемах, получающих органоминеральные теплые стоки. Некоторые из зоопланктеров (*B. longirostris*, *K. quadrata*, *A. girodi*) отнесены Н. М. Калинкиной, Т. П. Куликовой [2009] к видам с высокой толерантностью к изменению ионного состава воды при загрязнении минеральными стоками. В фитопланктоне озера z4 отмечена экстремально низкая величина индекса Шеннона (0,02–0,13), обусловленная массовым развитием хлорококковой водоросли *Dictyosphaerium pulchellum* – космополита, индифферентного по отношению к солености и pH [Барина и др., 2000]; в z20 доминирует *Oscillatoria limosa* – галофил [Барина и др., 2000], относимый С. М. Palmer [1969] к “топ-5” видов, устойчивых к органическому загрязнению. В бентосном сообществе озера z4 преобладают виды, характерные для солоноватых вод, – *Psectrocladius sordidellus*, *Chironomus salinarius*, *Cricotopus*, а также обитатель водоемов с низким содержанием кислорода – *Derotanytus sibiricus*. В озере z22 в составе зообентоса преобладали личинки хирономид рода *Chironomus*, а в озерах z20 и z21 отмечено не более двух таксонов зообентоса и крайне низкие численность и биомасса. Очевидно, водоемы z20 и z4 являются приемниками (биологически очистными прудами) неких стоков, а водоемы z21, z22 – эвтрофированные вследствие прямого и/или косвенного воздействия находящихся вблизи предприятий. Однако, вероятно, из-за разнонаправленного воздействия (закисление, тепловое воздействие, минерализация, поступление органики), видовой состав этих озер значительно различается. В итоге, на ординационной диаграмме MDS эти станции располагаются по периферии и образуют облако точек, а на кластерном дереве формируют отдельные располагающиеся по краям ветви (кластеры № 6–8 на рис. 2, № 7, 8 на рис. 3, № 8–10 на рис. 4).

Для остальных озер ПЗВ обнаружено сходство видовой состава с озерами ПСВ и ПНВ,

и в отдельных случаях – даже ПФВ (см. рис. 2–4). Можно предположить, что все эти озера, независимо от пояса воздействия, испытывают только косвенное влияние расположенных поблизости промышленных предприятий, и изменения видовой состава в них значительно менее выражены, а комплекс видов характерен для природных северных водоемов, обычно олиготрофных. Так, во многих озерах отмечены индикаторы олиготрофных условий [Андроникова, 1996]: *Synchaeta grandis* (доминирует в группах водоемов 1 и 6, см. табл. 4), *Bipalpus hudsoni* (2 и 6), *Limnosida frontosa* (присутствует в группе 2), *Holopedium gibberum* (1 и 2), *Bosmina* (E.) *longispina* (доминирует в группах 1 и 2), *Limnocalanus macrurus* (группа 1), *Heteroscore appendiculata* (доминирует в группах 2 и 3), *Cyclops scutifer* (2 и 4). Также зарегистрированы виды зообентоса, которые чувствительны к ухудшению условий среды: реликтовые рачки *Mysis relicta* (озеро Собачье) и *Monoporeia affinis* (озера Лама, Собачье, Глубокое, Мелкое), личинки поденок *Caenus horaria* Linne (z1, s10, s14, s28), *Cloeon* sp. (z2), *Siphonurus* sp. (n14), личинки ручейников *Agrypnia* (*Agrypnetes*) *crassicornis* Mc L. (s12), *Asynarchus lapponicus* Zett. (n13), *Cyrrnus flavidus* Mc L. (n13, s27), *Goera* sp. (s12), *Mystacides niger* L. (z1, z2), *Mystacides sibiricus* Mart. (z1, z2), *Mystacides dentatus* Mart. (s11), *Molannodes tinctus* Zett. (s9), *Molanna albicans* Zett. (z1), *Limnephilus stigma* Curtis (z1).

Очевидно, формирование планктонных и бентосных сообществ этих озер, их видовой состав и комплекс доминантов больше определялись природными факторами, чем степенью антропогенного воздействия. Исследованные озера априори различались по размерам, типу питания, соотношению пелагиали и литорали, количеству и составу макрофитов, температурному режиму, pH и другим абиотическим факторам. Соответственно, сообщества гидробионтов, формирование которых первично определяется этими природными факторами, различались по видовому составу и доминантам. Поэтому в одном кластере оказывались озера разных поясов воздействия, сообщества которых сходны между собой, но отличаются от таковых в других озерах этих же поясов. Вариабельность состава планктона и бентоса малых водоемов, его высокое бета-разнообразие, т. е. несходство сообществ близко распо-

ложенных малых водоемов в Арктике, неоднократно отмечалось ранее [Батурина и др., 2014; Чертопруд и др., 2021; Chertoprud et al., 2022; Fefilova et al., 2022; Schartau et al., 2022].

Помимо вышеперечисленных факторов, видовой состав бентосных сообществ в большей степени обусловлен типом грунта и глубиной отбора проб. Схожесть видового состава зообентоса на однотипных грунтах и глубинах характерна для многих озер [Батурина и др., 2014; Чертопруд и др., 2021]. Так, в глубоководных озерах Лама, Собачье, Глубокое и в большом озере Мелкое из групп озер 1 и 2 (см. табл. 5) на камнях и заиленном детрите доминировали характерные для северных олиготрофных озер личинки хирономид *Mesocricotopus thienemanni*, *Heterotrissocladius gr. maeaei* и *Heterotrissocladius gr. subpilosus*, амфиподы *Monoporeia affinis*. Эврибионтные личинки хирономид, которые предпочитают иловые отложения с детритом – *Paratrichocladius inaequalis*, род *Parakiefferiella*, *Psectrocladius fabricus*, отмечены как в крупных Норильских озерах групп 1 и 2, так и в озерах групп 4, 6, 7. Амфиподы *Gammarus lacustris*, личинки хирономид *Abalabesmyia gr. monilis*, *Cladotanytarsus gr. mancus*, родов *Tanytarsus*, *Paratanytarsus*, олигохеты *Spirosperma ferox*, которые предпочитают обитать на грунтах с повышенным содержанием биогенных веществ с растительными остатками и отсутствуют в местах загрязнения поллютантами, преобладали в разной степени в озерах групп 3 и 5 (см. рис. 4, табл. 5). Эврибионты, которые предпочитают заиленные грунты и эвтрофные водоемы, преобладали в водоемах групп 3, 4, 6 – личинки хирономид рода *Procladius*, олигохеты *Tubifex tubifex*, в озерах группы 8 – личинки хирономид родов *Chironomus*, *Camptochironomus*.

При однократном отборе за вегетационный сезон существенное влияние на результаты анализа также может оказывать межгодичная вариабельность видового состава и сезонная динамика. Вероятно, этим объясняется расположение в разных кластерах одинаковых станций, отобранных в разные годы (для фитопланктона это озера z3 и z5, для бентоса – целый ряд озер).

Усложняет задачу то, что мы рассматриваем воздействие не одного предприятия, а целой группы предприятий, различающихся по

типу воздействия и дальности его распространения. Так, расположенные в районе Талнаха шахты и обогатительная фабрика потенциально могут оказывать значительно меньшее влияние на окружающую среду, чем предприятия металлургического производства, расположенные в окрестностях г. Норильска. При воздушном загрязнении на направление его распространения оказывает воздействие роза ветров, при попадании загрязнителей в воду – рельеф местности. Аэропорт – потенциальный источник загрязнения территории органикой [Sulej-Suchomska et al., 2024], расположение которой может оказывать не ингибирующее, а, напротив, стимулирующее воздействие на биоту [Гладышев, 2021]. То есть в одном выделенном нами поясе, но в окрестностях разных предприятий могут располагаться озера, испытывающие разное по силе и, возможно, разнонаправленное воздействие, что из-за небольшого количества точек в каждом поясе не позволяет получить единую картину воздействия.

Интересно отметить, что почти все обнаруженные нами виды зоопланктона присутствовали в ранее опубликованных для данного региона списках [Fefilova et al., 2021; Chertoprud et al., 2022]. Новые для региона виды найдены нами в основном в наиболее подверженных антропогенному воздействию водоемах: коловратки *Asplanchna girodi*, *Asplanchna brightwelli* Gosse 1850 (водоемы z4, z21–22), кладоцеры *Moina macrocopa* (z4, z20), *Euryercus chernovi* Bekker et Kotov, 2016 (z24). Вышеназванные аспланхны питаются коловратками рода *Keratella* при их массовом развитии [Лазарева, 2004], которое для *K. quadrata* (индикатор эвтрофирования) мы наблюдали в водоемах z4, z21, z22. Как отмечалось выше, *A. girodi* и *M. macrocopa* толерантны к загрязнению воды минеральными стоками. Следовательно, антропогенное изменение среды приводит к инвазии видов, не характерных для природных (т. е. не подверженных воздействию) водоемов региона.

Таким образом, нам не удалось выявить различия четырех выделенных априори зон воздействия, основываясь только на анализе видового состава озер. Изучение на Кольском полуострове влияния на водную биоту стоков горно-рудного производства и аэротехногенных загрязнений показало, что в планктоне



и бентосе происходит не только изменение видового состава, но и уменьшение видового богатства и разнообразия (индекса Шеннона) [Вандыш, 2012; Кашулин и др., 2012; Вандыш и др., 2015]. Наши данные также показали, что видовое богатство и разнообразие зоопланктона достоверно выше в озерах ПФВ и ПНВ, чем в озерах ПСВ и ПЗВ. Для бентоса отмечено достоверное увеличение этих показателей в ПСВ по сравнению с ПЗВ. Так что в дополнение к вариациям видового состава такие структурные показатели, как число видов и индекс Шеннона, следует учитывать при индикации степени воздействия промышленных предприятий на сообщества водных беспозвоночных. При этом биомасса как таковая для них не является хорошим индикатором. Для фитопланктона, напротив, достоверных различий видового богатства и разнообразия между поясами не обнаружено, но биомасса в ПЗВ оказалась достоверно выше, чем в ПСВ.

Между тем при эвтрофировании водоемов происходят очень похожие процессы (увеличение биомассы планктона, обеднение видового состава, появление и резкое увеличение численности видов-индикаторов эвтрофирования) [Андроникова, 1996; Кашулин и др., 2012]. Напрашивается вывод, что нарушения в структуре и функции водных сообществ при загрязнении от предприятий “Норникеля” тяжелыми металлами и серой, поступающими как с промышленными и бытовыми стоками, так и через атмосферные пыль и осадки, сходны с таковыми при эвтрофировании водоемов. Собственно, и происходит эвтрофирование в результате поступления с производственными и хозяйственными стоками и из атмосферы минеральных элементов и органических веществ. Следует заметить, что элементы минерального питания и органические вещества способны снижать токсичность тяжелых металлов и других поллютантов [Вандыш, 2012; Кашулин и др., 2012]. Вероятно, снижению токсичности способствуют и относительно высокие значения рН водоемов Норильского дивизиона, за исключением отдельных кислых озер.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ разнообразия водных сообществ с использованием индекса Брея – Кертиса

не позволил выявить различия между априори выбранными поясами комплексного воздействия ряда предприятий ГМК “Норникель”. Метод оказался достаточно чувствительным только для шести водоемов, экосистемы которых, судя по всему, испытывают непосредственное воздействие предприятий, что привело к кардинальным изменениям среды и значительной перестройке сообществ. В озерах z3 и z5, подверженных закислению, доминирует коловратка-ацидобионт *Brachionus sericus* и встречаются ацидофильные виды – диатомеи рода *Eunotia*. В озере z5 наличие источника загрязнения подтверждает очень низкая биомасса планктона и преобладание в составе зообентоса личинок хирономид рода *Chironomus*. Наши результаты свидетельствуют, что озера z20 и z4 являются приемниками неких стоков, а водоемы z21, z22 – эвтрофированные вследствие прямого и/или косвенного воздействия находящихся вблизи предприятий. Это подтверждает доминирование в зоопланктонном сообществе видов, устойчивых к органическому и (или) минеральному загрязнению: *Keratella quadrata* (z4, z21, z22), коловратки рода *Brachionus* (z4, z20, z22), *Filinia longiseta* (z20, z22), *Daphnia pulex* (z4, z20), *Bosmina longirostris* (z22), *Cyclops kolensis* (z21, z22), *Moina macroscopa* (z4, z20). В фитопланктоне озера z4 отмечено массовое развитие зеленой водоросли *Dictyosphaerium pulchellum* – космополита, индифферентного по отношению к солености и рН; в z20 доминирует *Oscillatoria limosa* – галофил, устойчивый к органическому загрязнению. В бентосном сообществе озера z4 преобладают виды, характерные для солоноватых вод, – *Psectrocladius sordidellus*, *Chironomus salinarius*, *Cricotopus*, а также обитатель водоемов с низким содержанием кислорода *Derotanyptus sibiricus*. В озере z22 в составе зообентоса преобладали личинки хирономид рода *Chironomus*, а в озерах z20 и z21 отмечено не более двух таксонов зообентоса и крайне низкие численность и биомасса. В остальных озерах изменения менее выражены, и формирование сообществ в большей степени определяется природными факторами, а не уровнем антропогенного воздействия. При индикации степени воздействия промышленных предприятий на сообщества водных беспозвоночных следует в дополнение к изменениям видового



го состава учитывать другие структурные показатели, в частности число видов и индекс Шеннона, а в случае фитопланктона – биомассу. Найдены новые для региона виды зоопланктона, три из которых проявились в результате антропогенного воздействия на водоемы. Изменения в структуре сообществ планктона и бентоса при воздействии промышленных предприятий “Норникеля” оказались аналогичны таковым при эвтрофировании водоемов.

#### Благодарности

Авторы благодарны анонимному рецензенту за ценные замечания.

#### Вклад авторов

Глущенко Л. А., Агеев А. В., Карпов В. А., Андрущенко П. Ю., Андрущенко С. В., Дроботов А. В. – подготовка экспедиционных работ, отбор проб, написание статьи; Кравчук Е. С., Дубовская О. П., Морозова И. И., Шулепина С. П., Иванова Е. А. – обработка проб, анализ данных, написание статьи; Сущик Н. Н., Гладышев М. И. – руководство и координация работ, анализ данных, написание статьи.

#### Финансирование

Работа поддержана хозяйдоговорами № 223-ЕП-2021-87/116 и № 223-ЕП-2023-13 с Сибирским отделением РАН (Генеральный заказчик – ПАО “Норильский никель”), а также Государственным заданием Института биофизики СО РАН № FWES-2024–0024.

#### Соблюдение этических стандартов

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

#### Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Алимов А. Ф., Богатов В. В., Голубков С. М. Продукционная гидробиология. СПб.: Наука, 2013. 343 с.
- Андриенко А. И., Богданов Г. И., Михалев С. В. Состояние запасов рыб бассейна реки Пясины // Проблемы использования и охраны природных ресурсов Центральной Сибири. Вып. 4. Красноярск: КНИИГиМС, 2003. С. 263–267.
- Андроникова И. Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разных трофических типов. СПб.: Наука, 1996. 189 с.
- Баринова С. С., Медведева Л. А., Анисимова О. В. Водоросли-индикаторы в оценке качества окружающей среды. М.: ВНИИприроды, 2000. 150 с.
- Батурина М. А., Лоскутова О. А., Щанов В. М. Структура и распределение зообентоса озер Харбейской системы // Журн. Сиб. федерал. ун-та. Биология. 2014. Т. 7, № 4. С. 4–28.
- Вандыш О. И. Особенности зоопланктонного сообщества субарктического озера Имандра в зонах техногенного воздействия (губы Монче, Белая, Молочная) // Экология. 2012. № 5. С. 366–373. [Vandysh O. I. Specific features of zooplankton community in industrially polluted areas of subarctic Lake Imandra (Monche, Belaya, and Molochnaya Bays) // Russian Journal of Ecology. 2012. Vol. 43, N 5. P. 390–397.]
- Вандыш О. И., Черепанов А. А., Кашулин Н. А., Денисов Д. Б. Влияние стоков горнорудного производства на зоопланктонное сообщество губы Белой озера Имандра // Тр. КарНЦ РАН. 2015. № 1. С. 48–62.
- Гладышев М. И. Разливы нефти в пресных водах и состояние экосистемы оз. Пясино до аварийного разлива 2020 г. // Сиб. экол. журн. 2021. Т. 28, № 4. 395–407. [Gladyshev M. I. Oil spills in fresh waters and state of ecosystem of Lake Pyasino before the incidental spill of 2020 // Contemporary Problems of Ecology. 2021. Vol. 14, N 4. P. 313–322. (In Russ.)]
- Гладышев М. И., Розенфельд С. Б., Ануфриева Т. Н., Киртаев Г. В., Кравчук Е. С., Рябицев А. В., Колмакова А. А., Иванова Е. А., Анищенко О. В. Влияние скоплений гусеобразных птиц на сестон и фитопланктон озер полуострова Таймыр // Сиб. экол. журн. 2023. Т. 30, № 6. С. 735–746. [Gladyshev M. I., Rosenfeld S. B., Anufrieva T. N., Kirtaev G. V., Kravchuk E. S., Ryabitsev A. V., Kolmakova A. A., Ivanova E. A., Anishchenko O. V. Effect of flocks of anseriform birds on seston and phytoplankton in lakes of the Taimyr Peninsula // Contemporary Problems of Ecology. 2023. Vol. 16, N 6. P. 679–687. (In Russ.)]
- Глущенко Л. А., Заделенов В. А. Водоросли некоторых водоемов и водотоков на территории плато Путорана, 2014 г. // Науч. тр. Федерального государственного бюджетного учреждения “Объединенная дирекция заповедников Таймыра” / отв. ред. Л. А. Колпацников, А. А. Романов. Норильск: АПЕКС, 2015. 272 с.
- Дубовская О. П. Жизненный цикл и таксономический статус *Senecella siberica* Vyshkvartzeva 1994 (Copepoda, Calanoida) в небольших Норильских озерах (бассейн реки Пясины, Центральная Сибирь) // Зоол. журн. 2020. Т. 99, № 11. С. 1263–1267. [Dubovskaya O. P. Life cycle and taxonomic status of *Senecella siberica* Vyshkvartzeva 1994 (Copepoda, Calanoida) in large Norilsk lakes, Pyasina River Basin, Central Siberia // Biol. Bull. 2021. Vol. 48, N 8. P. 1236–1239.]
- Дубовская О. П., Котов А. А., Коровчинский Н. М., Смирнов Н. Н., Синев А. Ю. Зоопланктон озер отрогов плато Путорана и прилегающих территорий (север Красноярского края) // Сиб. экол. журн. 2010. Т. 17, № 4. С. 571–608. [Dubovskaya O. P., Kotov A. A., Krovchinsky N. M., Smirnov N. N., Sinev A. Yu. Zooplankton of lakes in the spurs of the Putorana Plateau and adjacent territories (North of Krasnoyarsk Krai) // Contemporary Problems of Ecology. 2010. Vol. 3, N 4. P. 401–434. (In Russ.)]
- Калинкина Н. М., Куликова Т. П. Эволюционная обусловленность реакции гидробионтов на изменение ионного состава воды (на примере пресноводного зоопланктона) // Изв. РАН. Сер. биол. 2009. № 2. С. 243–248.
- Кашулин Н. А., Денисов Д. Б., Валькова С. А., Вандыш О. И., Терентьев П. М. Современные тенденции изменений пресноводных экосистем Евро-Арктиче-

- ского региона // Тр. Кольского НЦ РАН. 2012. Т. 1, № 2. С. 7–54.
- Коровчинский Н. М., Котов А. А., Синев А. Ю., Неретина А. Н., Гарибян П. Г. Ветвистоусые ракообразные (Crustacea: Cladocera) Северной Евразии. Т. II. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2021. 544 с.
- Кутикова Л. А. Коловратки фауны СССР. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1970. 744 с.
- Лазарева В. И. Сезонный цикл развития и питание хищных коловраток рода *Asplanchna* в Рыбинском водохранилище // Биология внутр. вод. 2004. № 4. С. 59–68.
- Павлов Д. С., Савваитова К. А., Груздева М. А., Максимов С. В., Медников Б. М. и др. Разнообразие рыб Таймыра: систематика, экология, структура видов как основа биоразнообразия в высоких широтах, современное состояние в условиях антропогенного воздействия. М.: Наука, 1999. 207 с.
- Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / под ред. В. А. Абакумова. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 318 с.
- Румянцев В. А., Драбкова В. Г., Измайлова А. В. Озера азиатской части России. СПб.: Свое издательство, 2017. 480 с.
- Семенченко В. П., Корнеев В. Н., Мороз М. Д., Тишчиков Г. М. Связь структуры макрозообентоса с гидрохимическими показателями в реках разного порядка бассейна Немана // Вод. ресурсы. 2024. Т. 51, № 3. С. 330–335. [Semenchenko V. P., Korneev V. N., Moroz M. D., Tishchikov G. M. Relationship between macrozoobenthos structure and hydrochemical characteristics in rivers of different order in the Neman Basin // Water Resources. 2024. Vol. 51, N 3. P. 284–289. (In Russ.)]
- Чертопруд М. В., Крыленко С. В., Лукиных А. И., Глазов П. М., Дубовская О. П., Чертопруд Е. С. Особенности сообществ макрозообентоса малых арктических озер Евразии // Биология внутр. вод. 2021. № 4. С. 378–391. [Chertoprud M. V., Krylenko S. V., Lukinykh A. I., Glazov P. M., Dubovskaya O. P., Chertoprud E. S. Specific features of the macrozoobenthic communities of small Arctic Lakes in Eurasia // Inland Water Biology. 2021. Vol. 14, N 4. P. 401–414. (In Russ.)]
- Chertoprud E. S., Novichkova A. A., Novikov A. A., Fefilova E. B., Vorobjeva L. V., Pechenkin D. S., Glubokov A. I. Assemblages of meiobenthic and planktonic microcrustaceans (Cladocera and Copepoda) from small water bodies of mountain Subarctic (Putorana Plateau, Middle Siberia) // Diversity. 2022. Vol. 14, N 6. P. N 492.
- Denisov D., Terentjev P., Valkova S., Kudryavtzeva L. Small lakes ecosystems under the impact of non-ferrous metallurgy (Russia, Murmansk Region) // Environments. 2020. Vol. 7, N 4. P. 29.
- Fefilova E., Dubovskaya O., Kononova O., Frolova L., Abramova E., Nigamatzyanova G. Data on taxa composition of freshwater zooplankton and meiobenthos across Arctic regions of Russia // Data in Brief. 2021. Vol. 36. P. 107112.
- Fefilova E., Dubovskaya O., Frolova L., Abramova E., Kononova O., Nigamatzyanova G., Zuev I., Kochanova E. Biogeographic patterns of planktonic and meiobenthic fauna diversity in inland waters of the Russian Arctic // Freshwater Biol. 2022. Vol. 67, N 1. P. 78–94.
- Kolmakova O. V., Gladyshev M. I., Rozanov A. S., Peltek S. E., Trusova M. Y. Spatial biodiversity of bacteria along the largest Arctic river determined by next-generation sequencing // FEMS Microbiol. Ecol. 2014. Vol. 89, N 2. P. 442–450.
- Palmer C. M. A composite rating of algae tolerating organic pollution // J. Phycol. 1969. Vol. 5, N 1. P. 78–82.
- Schartau A. K., Mariash H. L., Christoffersen K. S., Bogan D., Dubovskaya O. P., Fefilova E. B., Hayden B., Ingvason H. R., Ivanova E. A., Kononova O. N., Kravchuk E. S., Lento J., Majaneva M., Novichkova A. A., Rautio M., Rühland K. M., Shaftel R., Smol J. P., Vrede T., Kahilainen K. K. First circumpolar assessment of Arctic freshwater phytoplankton and zooplankton diversity: Spatial patterns and environmental factors // Freshwater Biol. 2022. Vol. 67, N 1. P. 141–158.
- Schultz J. G. E., Kovatch J. J., Anneken E. M. Bacterial diversity in a large, temperate, heavily modified river, as determined by pyrosequencing // Aquat. Microb. Ecol. 2013. Vol. 70, N 2. P. 169–179.
- Sulej-Suchomska A. M., Szumińska D., de la Guardia M., Przybyłowski P., Polkowska Z. Airport runoff water: state-of-the-art and future perspectives // Sustainability. 2024. Vol. 16, N 18. P. 8176.

# Plankton and benthos biodiversity of Taimyr lakes in the “Nornickel”-affected area

E. S. KRAVCHUK<sup>1</sup>, O. P. DUBOVSKAYA<sup>1, 2</sup>, S. P. SHULEPINA<sup>2</sup>, E. A. IVANOVA<sup>1, 2</sup>, N. N. SUSHCHIK<sup>1, 2</sup>,  
L. A. GLUSHCHENKO<sup>2</sup>, I. I. MOROZOVA<sup>2</sup>, A. V. AGEEV<sup>1, 2</sup>, V. A. KARPOV<sup>1, 2</sup>, P. YU. ANDRUSHCHENKO<sup>1, 2</sup>,  
S. V. ANDRUSHCHENKO<sup>1, 2</sup>, A. V. DROBOTOV<sup>1</sup>, M. I. GLADYSHEV<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Biophysics, Federal Research Center  
“Krasnoyarsk Science Center of SB RAS”  
50/50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia*

<sup>2</sup>*Siberian Federal University  
79, Svobodny ave., Krasnoyarsk, 660041, Russia*

The study addresses species diversity of phytoplankton, zooplankton, and zoobenthos in twenty-eight Arctic lakes located in the Taimyr Peninsula within a radius of about 100 km from the city of Norilsk. The aim was to compare biodiversity between four zones defined based on a lake distance from Nornickel facilities: the zones of intense, moderate, and low impact (ZII, ZMI, and ZLI, respectively), and the reference zone (RZ). Beta diversity analysis based on the Bray-Curtis dissimilarity index did not reveal any significant differences between lakes in ZII and the other zones. Planktonic and benthic community structures alter substantially only in six lakes located in close proximity to the industrial area. In other lakes, the changes are less pronounced and their community compositions are likely determined by natural factors rather than the level of anthropogenic impact. Significant differences between zones were revealed for the average number of species and Shannon index: both indicators were significantly higher for zooplankton in lakes of RZ and ZLI compared to ZII and ZMI and for zoobenthos in lakes of ZMI compared to ZII lakes. Significant differences in biomass were observed only for phytoplankton: in ZII, it was higher than in ZMI. Therefore, the number of species, Shannon index, and biomass should be considered in addition to changes in species composition when determining the extent of industrial impact on planktonic and benthic communities. Alterations of plankton and benthos community structures noted here are similar to those observed under eutrophication of a water body.

**Key words:** phytoplankton, zooplankton, zoobenthos, biodiversity, Taimyr Peninsula, Norilsk, anthropogenic impact, Shannon index, species richness, biomass.