

## Диатомовые водоросли современных донных отложений водоемов Сибирской Арктики

О. В. ПАЛАГУШКИНА<sup>1</sup>, Л. Б. НАЗАРОВА<sup>1,2</sup>, С. ВЕТТЕРИХ<sup>2</sup>, Л. ШИРРМАЙСТЕР<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Казанский Федеральный (Приволжский) университет,  
Институт управления и территориального развития  
420008, Казань, ул. Кремлевская, 18  
E-mail: opalagushkina@mail.ru

<sup>2</sup> Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера  
14473, Германия, Потсдам, Телеграфенберг, 43

### АННОТАЦИЯ

Проведено исследование видового состава и экологии диатомовых водорослей современных донных отложений в водоемах полигональной тундры трех субрегионов Северной Якутии. В результате определен 161 таксон диатомовых, статистически подтверждена определяющая роль глубины, электропроводности, pH среды и географической широты в их распределении, выявлено два комплекса видов в отношении ведущих абиотических факторов. Диатомовые первого комплекса предпочитают неглубокие водоемы высоких широт с нейтрально-слабощелочной реакцией воды и относительно большими значениями электропроводности. Второй комплекс приурочен к водоемам более низких широт с малыми значениями электропроводности, нейтральной – слабокислой реакцией воды.

**Ключевые слова:** арктические водоемы, диатомовые, донные отложения, экология, комплексы.

Арктические регионы наиболее чувствительны к глобальным изменениям климата, а арктические водоемы – отличные индикаторы происходящего повышения температуры воздуха на планете [1]. Водоемы полигональной тундры, наиболее характерные типы водных экосистем для Севера Сибири, отличаются небольшими глубинами (до 3 м), специфическим термальным и химическим режимом, что делает их крайне восприимчивыми к климатическим изменениям. Диатомовые водоросли обитают во всех поверхностных водах Земли, а их кремниевые панцири хорошо сохраняются в ископаемом состоянии, что позволяет использовать их в качестве биологических индикаторов изменений,

происходящих в окружающей среде (температурных, гидрохимических) [2, 3].

Планктонные диатомовые водоросли современных пресных водоемов Якутии изучают с 1932 г. [4–17]. Фоссилизированные диатомовые донных отложений интенсивно изучают последние 15 лет [18–25], причем наиболее исследованы на настоящий момент диатомеи озерных осадков Центральной и Северной Якутии (суб- и нижнеарктической зон), тогда как озера высоких широт в этом регионе (зона высокоширотной Арктики – 71° N и выше) по-прежнему являются малоизученными. Встречаются лишь отдельные сведения о водоемах Новосибирских островов – Большого Ляховского [26–28] и Жоховского

[29], в том числе о диатомовых четвертичных отложениях.

Цель нашего исследования – изучение диатомовых современных донных отложений водоемов полигональной тундры трех субрегионов Северной Якутии (о-в Большой Ляховский, побережье Ойгосского Яра, территория в районе Тикси) методом диатомового анализа и определение роли различных физических, химических и географических факторов в распределении таксонов диатомовых. Данное исследование является продолжением серии работ, направленных на создание базы данных по таксономии и экологии диатомовых водорослей Якутии [18–25], которая является основой для разрабатываемых диатомовых моделей, применяемых для количе-

ственных реконструкций палеоклиматических и палеоэкологических изменений северо-востока России.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В июле–сентябре 2007 г. произведен отбор проб современных донных отложений в водоемах зоны вечной мерзлоты трех субрегионов Северной Якутии: 15 водоемов южной части о-ва Большого Ляховского (73° N, 141° E), 16 водоемов побережья Ойгосского Яра (напротив пролива у о-ва Большой Ляховский, 72° N, 143° E) и трех водоемов в районе Тикси (71° N, 128° E) (рис. 1).

По климатическому районированию исследуемые субрегионы относятся к арктической

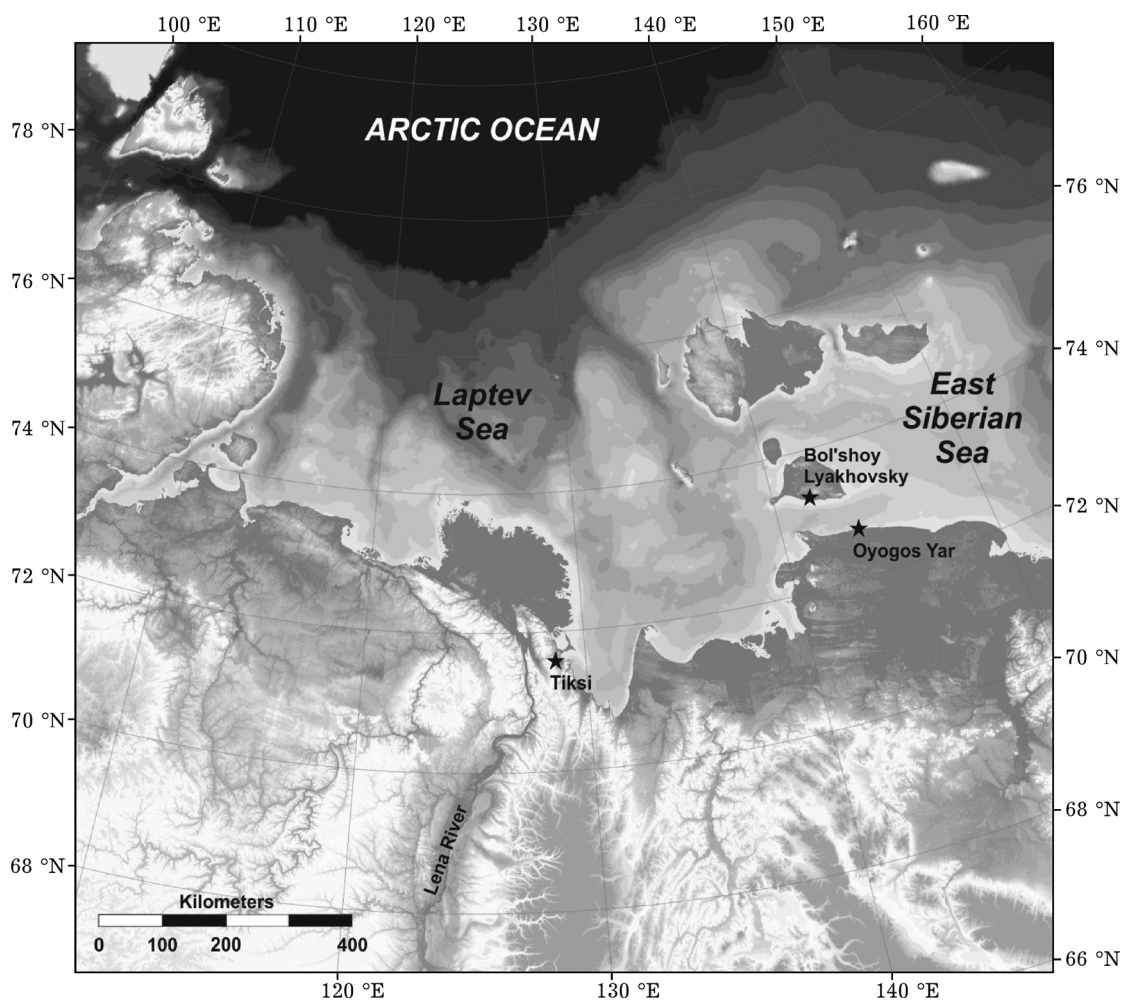


Рис. 1. Расположение районов исследования. Карта подготовлена Г. Гроссе (университет Аляски, Фэр-бэнкс) с использованием данных Международной батиметрической диаграммы Северного Ледовитого океана (IBCAO) и цифровой модели высот Земли (Globe DEM)

и субарктической зонам. Южная часть о-ва Большого Ляховского относится к арктической климатической зоне, отличается большим различием продолжительности солнечного освещения зимой и летом, холодный период длится 9 мес., безморозный – не превышает 30–45 дней. Средние температуры января меняются от  $-32$  до  $-35$  °С, средние температуры июля – от  $+6$  до  $+8$  °С, среднее годовое количество осадков – менее 150 мм. Побережье Ойгосского Яра и район Тикси относятся к субарктической климатической зоне. Продолжительность безморозного периода здесь 50–70 дней, средняя температура января  $-40$  °С, средние температуры июля от  $+12$  до  $+14$  °С, среднее годовое количество осадков 200–300 мм [30, 31].

Из каждого водоема отобрали пробы воды и поверхностного слоя донных отложений, представленных илистым или песчаным материалом с большей или меньшей долей растительного детрита.

Химический анализ определил тип воды большинства водоемов как гидрокарбонатно-хлоридный с преобладанием катионов магния. При типизации вод по субрегионам отмечено, что для водоемов о-ва Большого Ляховского и побережья Ойгосского Яра преобладающими анионами являются гидрокарбонаты и хлориды, а для водоемов в районе Тикси преобладающий тип воды – гидрокарбонатный кальциево-магниевый [32]. Минерализация воды всех исследованных водных объектов по классификации Алекина [33] характеризуется как малая, вода очень мягкая. Реакция воды (рН) водоемов о-ва Большого Ляховского нейтральная –слабощелочная, а озер побережья Ойгосского Яра и Тикси – нейтральная – слабокислая. Для водоемов в районе Тикси отмечены самые низкие значения электропроводности и жесткости (табл. 1).

Техническую обработку образцов донных отложений на диатомовый анализ проводили методом водяной бани [34] в лаборатории Института полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера (г. Потсдам, Германия). Для изготовления постоянных препаратов воспользовались высокопреломляющей смолой Naphrax. Видовой состав определен по отечественным и зарубежным данным [35–39].

Подсчет створок проводили по параллельным трансектам до 500 в образце с использованием светового микроскопа Axioplan Zeiss и иммерсионной среды. Общее число створок считали за 100 %. В процессе изучения диатомовых сделали фотографии наиболее распространенных видов с использованием электронного сканирующего микроскопа Ultra 55 Plus Zeiss Лаборатории электронной микроскопии Германского исследовательского центра геологических наук, г. Потсдам.

Эколого-географическая характеристика диатомовых включала местообитание, соленость, рН воды, географическое распространение, температурную приуроченность и реофильность [3, 40, 41]. Степень сходства таксономического состава сообществ диатомовых оценивали по коэффициенту Серенсена [42].

Для статистической обработки материала применили два пакета программ – Statistica 7 (факторный анализ, основанный на коэффициенте корреляции Спирмана ( $r$ ) при допустимом пределе достоверности  $p < 0,05$ ) и Canoco 4.5. Для проведения факторного анализа использовали доминирующие диатомовые (дающие 10 % и более от общего числа створок в пробе) и экологические параметры (см. табл. 1). Для построения диаграмм с доминирующими видами диатомовых использовали программу C2 версии 1.3 [43]. Статистический анализ в программе Canoco 4.5 проведен в основном в соответствии с методами Л. Б. Назаровой с соавторами [44]. В анализ включены таксоны диатомовых, которые встречены хотя бы в одном озере с относительной численностью более 5 %. Согласно данному критерию, в анализе оставлены 46 из 161 обнаруженных в озерах таксонов. Метод непрямой ординации, анализ соответствия с удаленным трендом (DCA) использовали для расчета длины общего экологического градиента, необходимого для оценки зависимости (линейная или одновершинная) между экологическими факторами среды в исследованном регионе и распределением диатомовых водорослей [45]. DCA (данные преобразованы извлечением квадратного корня) выявил, что градиентная длина оси 1 составляет 3,46 ед. стандартного отклонения, что определяет возможность при-

## Лимнологические характеристики исследованных озер трех субрегионов Северной Якутии

Номер озера	Широта град. с. ш.	Долгота град. в. д.	Глубина макс., м	$T_{июль}, ^\circ\text{C}$	Электрическая проводимость, $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	pH	$\Sigma$ ионов, $\text{мг} \cdot \text{л}^{-1}$	Жесткость, $\text{мг-экв} \cdot \text{л}^{-1}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{Si}^{4+}$	Al
<i>Остров Большой Ляховский</i>																
1d	73,34	141,33	0,60	3,5	192,0	8,0	139	1,88	94,4	11,5	0,49	17,0	9,7	9,0	< 0,10	< 20
2	73,34	141,34	0,20	3,5	121,0	7,8	81,9	1,13	52,0	9,6	0,13	8,9	5,5	6,1	< 0,10	< 20
3	73,34	141,32	0,40	3,6	245,0	8,7	160,1	2,30	90,7	28,0	0,99	20,9	11,2	12,0	< 0,10	< 20
4	73,34	141,32	0,20	3,6	100,0	8,3	61,6	0,89	31,0	12,5	1,21	6,1	3,6	8,5	< 0,10	< 20
5	73,28	141,83	0,20	3,6	80,0	-	44,6	0,67	18,8	12,5	0,65	3,1	3,2	7,8	< 0,10	27,0
6	73,28	141,83	0,15	3,6	48,0	-	29,7	0,44	14,0	7,2	0,25	1,9	2,2	4,3	< 0,10	< 20
7	73,28	141,83	0,20	3,4	80,0	-	43,8	0,67	19,1	12,6	0,13	4,3	3,5	5,0	0,45	< 20
8	73,28	141,84	0,30	3,4	90,0	-	52,6	0,79	25,5	12,9	0,28	5,2	4,2	6,0	< 0,10	< 20
9	73,34	141,33	0,30	3,6	138,0	8,7	89,7	1,30	49,1	15,5	1,84	10,0	6,0	9,0	< 0,10	< 20
10	73,34	141,32	0,30	3,6	190,0	8,6	136,4	1,86	89,2	13,5	0,91	16,3	9,3	9,8	< 0,10	< 20
11	73,35	141,43	0,40	3,5	168,0	7,8	114,0	1,60	76,7	10,3	0,55	14,4	8,5	7,8	0,47	< 20
12	73,35	141,44	0,50	3,5	97,0	7,0	59,3	0,82	37,5	7,1	0,28	7,9	4,0	5,8	0,17	22,3
13	73,35	141,43	0,40	3,5	200,0	7,0	129,8	1,80	85,2	14,4	0,15	18,5	10,0	7,5	0,52	35,6
14	73,33	141,36	0,10	3,5	163,0	7,6	108,7	1,54	65,6	16,5	< 0,1	12,2	8,5	7,9	1,02	< 20
15	73,33	141,36	0,10	3,5	148,0	7,6	92,5	1,33	53,2	16,3	< 0,1	10,8	7,4	8,1	0,66	< 20
<i>Ойгосский Яр</i>																
16a	72,68	143,51	0,65	3,9	48,0	6,0	25,2	0,46	15,3	2,7	0,16	3,8	3,3	2,2	0,86	90,6
17	72,68	143,57	0,40	3,9	127,0	6,3	85,4	1,20	49,0	9,7	5,22	10,7	5,1	6,7	2,37	21,4
18	72,68	143,52	0,40	3,9	54,0	6,4	28,4	0,43	9,8	7,2	3,02	2,9	1,5	5,4	3,10	99,7
19	72,68	143,56	0,50	3,9	123,0	6,9	84,6	1,14	58,3	6,0	0,72	11,5	5,9	4,7	0,77	< 20
20	72,68	143,56	0,50	3,9	112,0	6,9	75,4	1,01	53,4	4,7	0,25	9,6	5,7	4,6	0,36	< 20
21	72,68	143,52	0,60	3,9	59,0	6,5	35,5	0,50	22,6	4,2	0,60	4,8	3,0	3,4	1,61	82,5
22	72,68	143,52	0,40	3,9	70,0	6,7	41,2	0,60	20,7	6,7	2,88	4,8	2,6	5,1	2,39	51,7

23	72,68	143,52	0,15	3,9	58,0	6,7	33,8	0,48	19,8	4,9	0,96	4,6	2,7	3,7	1,45	62,6
24	72,68	143,44	0,20	3,8	63,0	6,3	37,8	0,60	25,0	4,3	0,20	3,2	5,0	3,8	1,97	49,0
25	72,68	143,43	0,10	3,8	86,0	6,0	52,7	0,80	34,9	5,4	0,71	4,9	6,8	4,4	2,76	57,0
26	72,67	143,34	0,10	3,8	96,0	7,5	53,9	0,80	28,5	11,2	0,42	5,9	4,3	5,9	1,13	165,0
27	72,67	143,34	0,45	3,8	175,0	6,9	122,5	0,46	88,1	5,6	1,25	17,0	8,4	6,8	2,00	22,1
28	72,68	143,44	0,40	3,8	48,0	6,2	24,4	1,63	14,2	3,3	0,21	2,9	3,7	2,5	1,96	61,0
29	72,67	143,54	0,20	3,9	49,0	6,2	32,8	0,45	24,4	1,1	0,12	4,9	2,3	1,4	1,44	< 20
31	72,67	143,53	0,35	3,9	72,0	6,1	42,6	0,43	27,8	2,9	0,36	7,5	4,1	2,7	2,65	358,0
32	72,67	143,51	0,45	3,9	98,0	6,7	33,6	0,70	21,0	3,8	< 0,1	5,2	3,5	2,4	1,62	66,6
<i>Район Туiksi</i>																
35	71,60	128,80	1,00	6,9	14,0	6,3	7,9	0,11	5,6	0,3	0,21	1,2	3,7	0,5	0,12	58,7
36	71,60	128,80	1,00	6,9	17,0	5,9	13,1	0,17	9,5	0,3	0,19	1,5	2,3	0,7	1,17	104,0
37	71,61	128,80	1,00	6,9	59,0	7,0	37,0	0,52	17,2	0,4	10,60	5,9	4,1	0,7	0,92	< 20

П р и м е ч а н и е. На водоемах № 30, 33 и 34 исследования диатомовых водорослей современных донных отложений не проводились.

менения унимодального метода ординации – канонического анализа соответствия (ССА) [46].

В статистический анализ (DCA) включены 19 экологических параметров, в которые кроме приведенных в табл. 1 вошли температура воды в момент взятия проб, прозрачность по диску Секки, общий фосфор, нитраты, железо общее. Данные по этим показателям приведены в статье Веттериха с соавт. [32]. Для достижения нормальности распределения выборки показателей концентрации нитратов и алюминия трансформированы логарифмированием. Для проверки мультиколлинеарности комплекса экологических переменных проведен анализ с использованием коэффициентов возрастания дисперсии (VIF). Экологические параметры со значениями VIF более 20 удаляли по одному, начиная с того, который имел самое высокое значение VIF, и до тех пор, пока значения VIF всех оставшихся факторов не были ниже 20. Минимальное количество экологических параметров, достоверно объясняющих вариации данных диатомовых, затем оценили методом отбора вперед.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований современных донных отложений 34 водоемов Северной Якутии определен 161 таксон диатомовых водорослей, относящийся к 25 родам, 13 семействам, 4 порядкам и 2 классам. Это составляет 32,5 % от общего систематического списка диатомовых донных отложений, составленного для 199 озер Якутии [25]. Наиболее широко распространенными оказались виды *Eunotia bilunaris* (Ehr.) Mills., *E. praeerupta* Ehr., *E. tenella* (Grun.) Hust., *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kütz., *Stauroneis phoenicenteron* (Nitzsch.) Ehr., *Cymbella silesiaca* Bleisch in Rabenhorst, *Stauroneis anceps* Hust., *Achnanthes minutissima* Kütz., *Gomphonema parvulum* Kütz., *Navicula pupula* Kütz. (рис. 2). Виды, составляющие 5 % и более от общего числа створок в пробе, и их распределение в озерах трех субрегионов Северной Якутии, представлены на рис. 3.

Большинство найденных диатомовых водорослей – бентосные организмы (73,3 % от

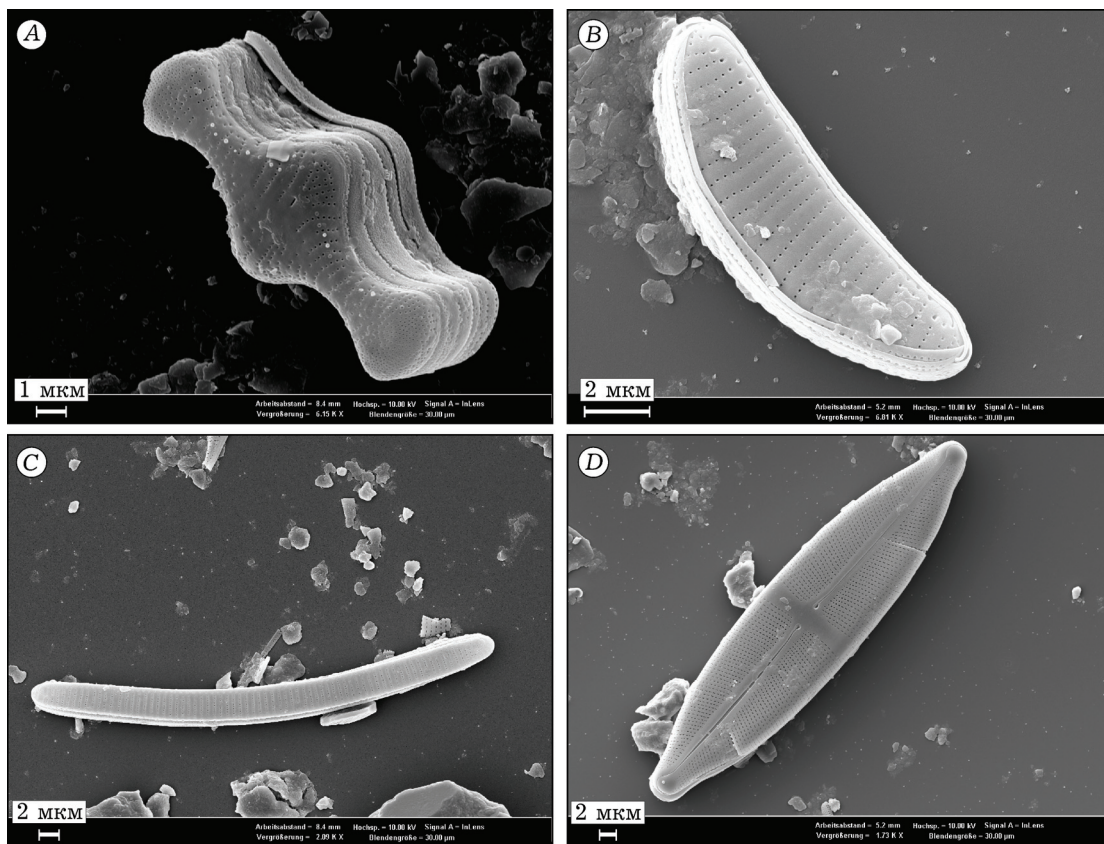


Рис. 2. *Tabellaria flocculosa* (A), *Eunotia tenella* (B), *Eunotia bilunaris* (C), *Stauroneis phoenicenteron* (D)

общего числа таксонов). Планктонно-бентосные формы составили 15,5 %, планктонные виды были самыми малочисленными – 4,3 %.

По отношению к солености воды большая часть выявленных видов – пресноводные олигогалобы (72 % от общего числа видов), из них большую часть составляют индифференты – 53,4 %, меньшую – галофилы (9,3 %) и галофобы (7,4 %). Наличие мезогалобов (1,9 %) – *Achnanthes flexella* (Kütz.) Brun, *Nitzschia levidensis* (W. Smith) Grun. in van Heurck. (Большой Ляховский), *Achnanthes hungarica* Grun. (Ойгосский Яр) может указывать на генетическую связь озер, находящихся на низком гипсометрическом уровне, с морем. Преобладание бентосных, индифферентных по отношению к солености воды видов и наличие мезогалобов также отмечалось в исследованиях Л. А. Пестряковой [25].

По отношению к pH большая часть отмеченных видов – индифференты (26,1 % от общего числа видов). Обитатели вод со ще-

лочной реакцией среды составили 24,8 %, из них большая часть – алкалифилы (22,4 %), меньшая – алкалибионты (2,5 %), доля ацидофилов – 18,6 %.

Диатомовые донных отложений арктических водоемов представлены в большей мере космополитными видами (36 % от общего числа таксонов), бореальные виды составили 11,2 % арктоальпийские – 9,9 %, также отмечены голарктические и альпийские космополитные виды (по 1,86 %) [3, 40, 41].

Информация по температурной приуроченности имеется для 31 вида, из них 24 – обитатели умеренных температурных условий, 4 – холодолюбивые, 3 – эвритермные [41].

Сведения о реофильности имеются только для 39 видов диатомовых, из них преобладают виды стоячих (17) и стояче-текучих вод (16), виды текучих вод представлены пятью видами, также отмечен один вид-аэрофил [41].

Эколого-географическая характеристика и доля таксонов диатомей в донных отложении



Т а б л и ц а 2

**Эколого-географическая характеристика и доля таксонов диатомей различных групп  
в донных отложениях трех субрегионов Северной Якутии**

Группа диатомей	Доля от общего числа таксонов, %		
	О-в Большой Ляховский	Ойгосский Яр	Район Тикси
По местообитанию:			
бентосные	69	71,6	73
планктонно-бентосные	23	18,3	19
планктонные	0	3,7	4,8
По солености:			
олигогалобы:			
индифференты	56,3	56,9	49,2
галофилы	12,6	9,2	9,5
галофобы	8	8,3	14,3
мезогалобы	2,3	0,9	0
По отношению к рН:			
алкалифилы	33,3	26,6	17,5
алкалибионты	1,1	2,8	1,6
индифференты	31	29,4	25,4
ацидофилы	12,6	22,9	25,4
По географическому распространению:			
бореальные	10,3	10,1	11,1
космополиты	58,6	52,3	49,2
арктоальпийские	8	11	14,3
альпийские космополиты	1,2	2,8	0
голарктические	1,2	0,9	1,6
По температурной приуроченности:			
индифференты	20,7	15,6	19
холодолюбивые	3,5	2,8	6,3
эвритермные	2,3	2,8	4,8
По реофильности:			
стоячих вод	11,5	12	12,7
стояче-текучих вод (индифференты)	11,5	12,8	3,2
текучих вод	3,5	2,8	3,2
аэрофильные	1,1	0,9	0

ях трех субрегионов Северной Якутии представлены в табл. 2.

Анализ полученных данных показывает наименьшее число видов диатомей в озерах района Тикси – 63. Характерны отсутствие мезогалобов и самые высокие проценты галофобных, ацидофильных, бентосных и

планктонных, арктоальпийских, бореальных и голарктических, а также холодолюбивых видов и видов стоячих вод.

Большее видовое богатство отмечено в водоемах о-ва Большого Ляховского – 87 таксонов. Для них характерно отсутствие планктонных видов, что может быть связано с ко-



Коэффициенты корреляции между экологическими показателями и ССА осями ординации

Экологический показатель	Ось		
	1	2	3
Глубина	-0,0372	0,7850	0,3798
pH	0,8388	-0,3434	0,1272
Электропроводность	0,6786	0,0818	-0,5430

ротким вегетационным периодом из-за высокой широты и низких температур воздуха, а также меньшими глубинами (от 0,1 до 0,6 м). Этой группе озер также свойственны самые высокие доли галофильных и мезогалофильных, алкалофильных и индифферентных к pH среды видов. По сравнению с другими исследованными озерами в водоемах о-ва Большого Ляховского наиболее представлена группа космополитов, индифферентов по температурной приуроченности, а также видов текучих вод и аэрофилов.

В донных отложениях водоемов Ойгосского Яра выявлено наибольшее число видов диатомовых – 109. В целом диатомеи водоемов этого региона по своим экологическим характеристикам занимают промежуточное положение между диатомовыми водоемов района Тикси и о-ва Большого Ляховского. Из характерных особенностей можно отметить самую высокую долю индифферентных видов по факторам солености и реофильности и высокую долю видов альпийских космополитов.

Сравнение видового состава озер трех субрегионов показало наибольшее сходство диатомовых о-ва Большой Ляховский и побережья Ойгосского Яра – 59,5 %. Коэффициент сходства диатомовых водоемов побережья Ойгосского Яра и района Тикси составил 41 %. Самый низкий коэффициент сходства отмечался между диатомовыми о-ва Большого Ляховского и Тикси – 35 %.

ССА с участием 46 таксонов диатомей с относительной численностью более 5 % хотя бы в одном озере (данные численности таксонов преобразованы извлечением квадратного корня) и 19 экологических параметров показал, что они объясняют 33,8 % вариаций таксономического состава диатомей и 52,5 % взаимодействия видового состава ди-

атомовых с факторами окружающей среды ( $\lambda_1 = 0,327$  и  $\lambda_2 = 0,160$ ). Девять экологических параметров: широта, долгота,  $\text{Ca}^{2+}$ , электропроводность,  $T_{\text{июль}}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  имели VIF больше 20, т. е. в значительной степени коррелировали между собой. По одному были удалены из анализа  $T_{\text{июль}}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , после чего VIF остальных экологических параметров стали ниже 20. Оставшиеся 16 экологических переменных объясняют 32,0 % вариаций видового состава, что говорит о том, что удаление трех коррелирующих переменных фактически не повлияло на эффективность анализа.

Методом мануального отбора вперед в ССА (Монте-Карло тест с 999 неограниченными перестановками) показано, что среди оставшихся в анализе 16 важнейших переменных pH, глубина и электропроводность составляют набор статистически достоверных экологических параметров ( $p \leq 0,05$ ), наиболее полно объясняющих изменчивость числа таксонов диатомовых в исследованных озерах. Собственные значения осей 1 и 2 трех наиболее значимых переменных составляют  $\lambda_1 = 0,282$  и  $\lambda_2 = 0,106$ . В сумме три канонические оси ССА объясняют 22,0 % вариаций видового состава диатомовых в исследованных группах озер. pH и электропроводность значимо положительно коррелируют с ССА осью 1, а глубина положительно и значимо коррелирует с ССА осью 2 (табл. 3).

Что касается пространственного расположения озер относительно ординационных осей 1 и 2, ССА показал, что сообщества диатомовых озер трех субрегионов Якутии отличаются друг от друга и в их формировании первостепенное значение играют разные экологические факторы. В озерах района Тикси (рис. 4, а), положительно коррелирующих с осью ординации 2, ведущую роль играет

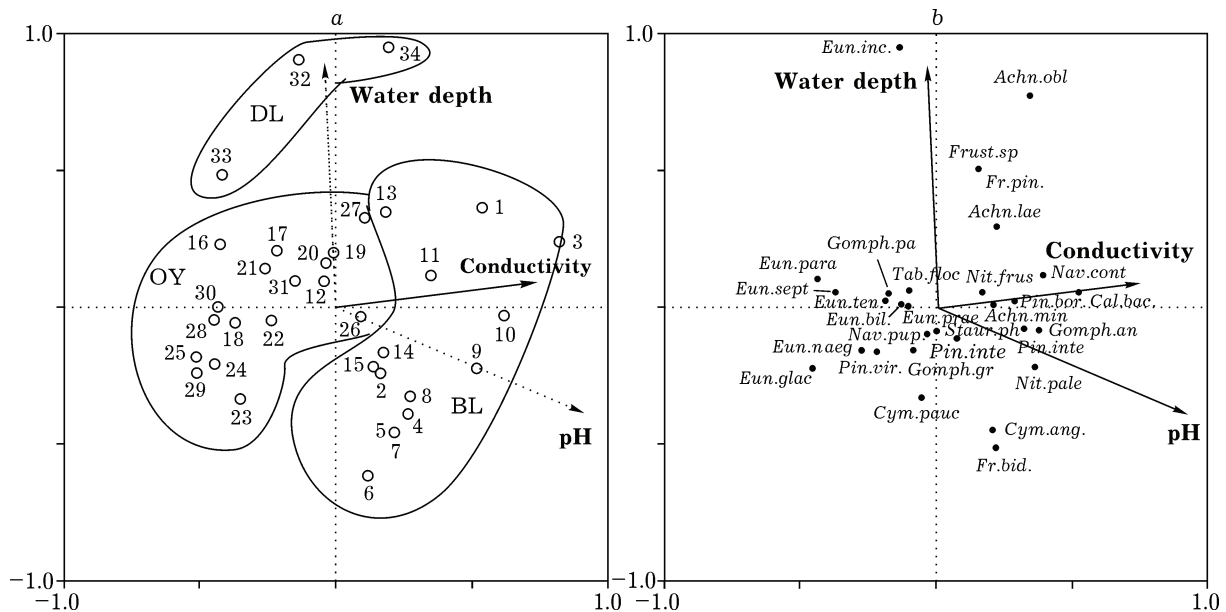


Рис. 4. ССА диаграммы, иллюстрирующие взаимосвязь наиболее значимых экологических факторов и сообщества диатомовых в исследованных озерах (а); отдельных видов диатомовых в исследованных озерах (б) (аббревиатуры субрегионов как на рис. 3)

глубина водоема. Слабую положительную корреляцию с глубиной проявил планктонно-бентосный вид-доминант *Tabellaria flocculosa* ( $r = 0,37$ ) (см. рис. 4, б).

Озера побережья Ойгосского Яра (см. рис. 4, а) сгруппированы в левой части ординации, т. е. отрицательно коррелируют с осью ССА 1 и имеют слабовыраженную положительную либо отрицательную корреляцию с осью 2. Диатомовые этой группы озер представлены в большей степени бентосными видами, предпочитающими слабоминерализованные воды с низкими значениями pH – *Eunotia septentrionalis* Oest., *E. tenella*, *E. bilunaris*, *E. praerupta*, *Tabellaria flocculosa*, *Gomphonema parvulum* (см. рис. 4, б).

Положительная корреляция озер Большого Ляховского острова с осью 1 ССА, а также более ярко выраженный, чем среди озер Ойгосского Яра, разброс вдоль оси 2 говорит о том, что все три значимых экологических фактора играют важную роль в формировании флоры диатомовых в данном субрегионе (см. рис. 4, а). Диатомовые представлены в основном бентосными видами, развивающимися при несколько больших значениях электропроводности (следовательно, минерализации) с нейтральной или слабощелочной реакцией воды – *Navicula con-*

*tenta* Grun., *Achnanthes minutissima*, *Caloneis baccilum* (Grun.) Cleve, *Nitzschia paleacea* (Grun.) Grun., *Cymbella angustata* (W. Sm.) Cl. (см. рис. 4, б).

Использование факторного анализа позволило выявить виды, проявляющие положительные корреляции с географической широтой, – *Navicula contenta* ( $r = 0,54$ ), *Nitzschia paleacea* ( $r = 0,41$ ), *Caloneis baccilum* ( $r = 0,39$ ) и *Achnanthes minutissima* ( $r = 0,35$ ). Это отчасти подтверждается отрицательными корреляциями с температурой воздуха для видов *Cymbella angustata* ( $r = -0,41$ ), *Achnanthes minutissima* ( $r = -0,39$ ), *Navicula contenta* ( $r = -0,36$ ). Отрицательную корреляцию с широтой проявляли виды *Eunotia septentrionalis* Oest. ( $r = -0,43$ ), *E. praerupta* ( $r = -0,39$ ), *Gomphonema parvulum* ( $r = -0,36$ ), что позволяет классифицировать их как виды более низких широт. Положительная корреляция с температурой воздуха отмечалась также для видов *Eunotia septentrionalis* ( $r = 0,5$ ), *Gomphonema parvulum* ( $r = 0,42$ ) и слабее – для *E. tenella* ( $r = 0,36$ ).

Использование двух статистических пакетов позволило наиболее полно выявить ведущие экологические факторы в формировании видового состава диатомей в водоемах трех исследуемых субрегионов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что диатомовые современных донных отложений Северной Якутии многочисленны и разнообразны. Более близки по видовому составу диатомеи о-ва Большого Ляховского и побережья Ойгосского Яра, менее близки диатомовые водоемов о-ва Большого Ляховского и района Тикси. Основными экологическими факторами, влияющими на распространение диатомовых, являются глубина водоема, рН и электропроводность воды. Географическая широта, определяющая температуру воздуха, также оказывает влияние на распределение водорослей в водоемах.

Статистический анализ позволил выделить два комплекса видов диатомовых по отношению к ведущим абиотическим факторам. Первый из них включает виды, способные существовать в неглубоких водоемах высоких широт с нейтрально-слабощелочной реакцией воды с относительно большими значениями электропроводности – это *Navicula contenta*, *Nitzschia paleacea*, *Caloneis baccillum*, *Achnanthes minutissima*, *Cymbella angustata*. Другой комплекс объединяет виды, приспособленные к существованию в водоемах с относительно меньшими значениями электропроводности, нейтральной – слабокислой средой, расположенных в более низких широтах при более высоких температурах воздуха. Это виды рода *Eunotia* – *E. septentrionalis*, *E. praerupta*, *E. tenella*, а также *Gomphonema parvulum*, *Tabellaria flocculosa*. Выявленные диатомовые комплексы могут быть использованы в качестве индикаторных для мониторинга процессов изменения климата в арктических регионах.

Авторы статьи выражают глубокую благодарность оператору электронного сканирующего микроскопа Ultra 55 Plus Zeiss лаборатории электронной микроскопии Германского исследовательского центра геологических наук в Потсдаме Юлиане Хервиг за помощь в электронном микроскопировании диатомовых и химикату Института морских и полярных исследований им. Альфреда Вегенера в Потсдаме Антье Ойленбург за предоставленные данные по физико-химическим исследованиям озер Северной Якутии.

Проект выполнен при поддержке Фонда ДААД (Программа “Михаил Ломоносов”, А0972849), Германия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Smol J. P., Wolfe A., Birks H. J. B., Douglas M. S. V., Jones V. J., Korhola A., Pienitz R., Rühland K., Sorvari S., Antoniades D. et al. Climate-driven regime shifts in the biological communities of arctic lakes // Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS). 2005. P. 102 : 34397–4402.
2. Battarbee R. W. The importance of palaeolimnology to lake restoration // Hydrobiology. 1999. P. 395/396: 149–159.
3. Давыдова Н. Н. Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1985. 244 с.
4. Алабышев В. В. Зональность озерных отложений // Изв. сапропелевого комитета. 1932. Вып. 6. С. 1–45.
5. Киселев И. А. Фитопланктон озер Центральной Якутии по материалам лимносъемки 1932 г. Исследование озер СССР // Тр. Гос. гидролог. ин-та. 1935. Вып. 8. С. 51–84.
6. Комаренко Л. Е. Характеристика флоры водорослей и зоопланктона водоемов бассейна среднего течения р. Лены // Тр. Ин-та биологии ЯФ СО АН СССР. 1956. Вып. 2. С. 145–212.
7. Комаренко Л. Е. Диатомовые водоросли р. Колымы // Изв. СО АН СССР. 1960. № 3. С. 81–90.
8. Комаренко Л. Е. Планктон левых притоков Вилюя рек Мархи и Тюнг // Тр. Ин-та биологии ЯФ СО АН СССР. 1962. № 8. С. 136–163.
9. Комаренко Л. Е. Состав и формирование флоры водорослей водоемов Якутии // Почвенные и ботанические исследования в Якутии. Якутск, 1972. С. 130–135.
10. Комаренко Л. Е., Васильева И. И. Состав и динамика альгофлоры озер Колымо-Индигоирской низменности в открытый период 1966–1967 гг. // Рыбохозяйственное освоение озер бассейна средней Колымы ЯФ СО АН СССР. Якутск, 1972. С. 39–86.
11. Васильева И. И. Пресноводные эвгленовые и желтозеленые водоросли водоемов Якутии. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1987. 265 с.
12. Васильева И. И. Водоросли водоемов криолитозоны СССР: систематический состав, экология, распространение (на примере Якутии): автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Кишинев, 1989. 50 с.
13. Васильева И. И., Иванова А. П. Альгологические исследования озера Сайсары // Ботанические исследования в криолитозоне. Якутск, 1992. С. 29–37.
14. Васильева И. И., Иванова А. П. Диатомовые водоросли озер долины Туймаада // Экология и география диатомовых водорослей: тез. докл. VI Международ. школы по диатомовым водорослям. Минск, 1995. С. 11–13.

15. Васильева-Кралина И. И., Габышев В. А. К изучению Bacillariophyta горных водоемов Верхоянья (Якутия) // Альгология. 1996. Т. 6, № 4. С. 394–400.
16. Васильева-Кралина И. И., Рожков О. Ф., Рожкова О. Ю. Особенности сезонной динамики развития фито- и бактериопланктона водотоков Олекминского заповедника (Республика Саха (Якутия)) // Там же. 1996. Т. 7, № 2. С. 166–169.
17. Васильева-Кралина И. И., Иванова А. П., Пшеничкова Е. В. Состав и динамика развития водорослей озер г. Якутска и его окрестностей (среднее течение р. Лены) // Там же. 1997. Т. 7, № 1. С. 30–34.
18. Пестрякова Л. А. Диатомовые водоросли поверхностных горизонтов донных отложений оз. Улахан Чабыды // Диатомовые водоросли – индикаторы изменений окружающей среды и климата: сб. ст. Междунар. диатом. школы. Иркутск, 1993. С. 59–60.
19. Пестрякова Л. А. Эволюция озерных экосистем Центральной Якутии (по материалам диатомового анализа донных отложений): автореф. дис. ... канд. биол. наук. Якутск: Изд-во ЯГУ, 1994. 23 с.
20. Пестрякова Л. А. Диатомеи донных отложений озера Нуочаха (бассейн Средней Лены) // Наука и образование. АН РС (Я). 1998. № 4. С. 63–65.
21. Пестрякова Л. А. Bacillariophyta озерных отложений Центральной Якутии // Альгология. 1999. Т. 9, № 2. С. 112–113.
22. Пестрякова Л. А. Диатомовые комплексы озерных отложений Якутии в голоцене. Озера холодных регионов // Вопросы палеоклиматологии, палеолимнологии и палеоэкологии. Якутск: Изд-во ЯГУ, 2000. Т. 4. С. 151–160.
23. Пестрякова Л. А. Диатомовые водоросли в осадках озер Верхней Таты. Аласные экосистемы: структура, формирование, динамика. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2005. С. 101–107.
24. Пестрякова Л. А., Босиков Н. П., Ксенофонтова М. И. Диатомовые комплексы и химизм воды термокарстовых озер Юкэчинского полигона // Наука и образование. 2007. № 2. С. 19–24.
25. Пестрякова Л. А. Диатомовые комплексы озер Якутии. Якутск: Изд-во ЯГУ, 2008. 174 с.
26. Рапорт Л. Г., Романовский Н. Н. Палеогеография четвертичного времени на северном побережье Яно-Индигирской низменности по диатомовой флоре // Вопросы физической географии полярных стран. 1959. Вып. 2. С. 196–203.
27. Пирумова Л. Г. Диатомеи четвертичных отложений Севера Яно-Индигирской низменности и острова Большого Ляховского // Ископаемые диатомовые водоросли СССР. М.: Наука, 1968. С. 80–83.
28. Andreev A. A., Grosse G., Schirrmeister L., Kuznetsova T. V., Kuzmina S. A., Bobrov A. A., Tarasov P. E., Novenko E. Y., Meyer H., Derevyagin A. Y., Kienast F., Bryantseva A., Kunitsky V. V. Weichselian and Holocene palaeoenvironmental history of the Bolshoy Lyakhovsky Island, New Siberian Archipelago, Arctic Siberia // *Boreas*. 2009. Vol. 38. P. 72–110.
29. Анисимов М. А., Иванова В. В., Пушина З. В., Питулько В. В. Лагунные отложения острова Жохова: возраст, условия формирования и значение для палеогеографических реконструкций региона Новосибирских островов // Изв. РАН. Сер. географ. 2009. № 4. С. 107–119.
30. Тахтаджян А. Л. Флористические области земли. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1978. 247 с.
31. Гаврилова М. К. Климат Центральной Якутии. Якутск: Институт мерзлотоведения АН СССР, 1973. 118 с.
32. Wetterich S., Herzsich U., Meyer H., Pestryakova L., Plessen B., Lopez C. M. L., Schirrmeister L. Evaporation effects as reflected in freshwaters and ostracod calcite from modern environments in Central and Northeast Yakutia (East Siberia, Russia) // *Hydrobiologia*. 2008. P. 614:171–195.
33. Алекин О. А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 444 с.
34. Battarbee R. W. Diatom analysis // *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology* / ed. B. E. Berglund. J. Wiley & Sons, 1986. P. 527–570.
35. Забелина М. М., Киселев И. А., Прошкина-Лавренко А. И., Пешукова В. С. Диатомовые водоросли // Определитель пресноводных водорослей СССР. М.: Сов. наука, 1951. Вып. 4. 620 с.
36. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. 1. Teil: Naviculaceae // *Suesswasserflora von Mitteleuropa*. Stuttgart – Jena: Gustav Fischer Verlag, 1986. 976 p.
37. Krammer K., Lange-Bertalot H., Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. 2. Teil: Bacillariaceae, Epitemiaceae, Surirellaceae // *Ibid.* 1988. 596 p.
38. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae // *Ibid.* 1991. 576 p.
39. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. 4. Teil: Achnanthaceae, Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema. Geamtliteraturverzeichnis // *Ibid.* 1991. 437 p.
40. Алешинская З. В., Заикина Н. Г. Руководство к практическим занятиям по курсу «Четвертичная геология» (метод диатомового анализа). М.: Изд-во Моск. ун-та, 1964. 72 с.
41. Баринаева С. С., Медведева Л. А., Анисимова О. В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Pilies Studio, 2006. 498 с.
42. Sorensen T. A new method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of a species content and its application to analysis of vegetation on Danish common // *Kgl. Dan. Selskab. Boil. Skr.* 1948. Bd. 5, N 4. P. 1–34.
43. Juggins S. User Guide: C<sup>2</sup>, Software for Ecological and Palaeoecological Data Analysis and Visualization User guide Version 1.3 // Department of Geography University of Newcastle. Newcastle upon Tyne. 2003. P. 1–69.

44. Nazarova L. B., Pestryakova L. A., Ushnitskaya L., Hubberten H. W. Chironomids (Diptera: Chironomidae) in lakes of central Yakutia and their indicative potential for paleoclimatic research // *Contemporary Problems of Ecology*. 2008. N 1. P. 335–345.
45. Birks H. J. B. Quantitative palaeoenvironmental reconstructions // *Statistical Modelling of Quaternary Science Data. Technical Guide 5. Quaternary Research Association*. Cambridge / eds. D. Maddy, J. S. Brew. 1995. P. 161–254.
46. ter Braak C. J. F. Šmilauer P. CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5) // *Microcomputer Power*. Ithaca. N.Y., 2002.

## **Diatoms of Modern Bottom Sediments in Siberian Arctic**

O. V. PALAGUSHKINA<sup>1</sup>, L. B. NAZAROVA<sup>1,2</sup>, S. WETTERICH<sup>2</sup>, L. SHIRRMEISTER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Kazan Federal (Privolzhskiy) Universtiy, Institute of Management and Territorial Development  
420008, Kazan, Kremlevskaya str., 18  
E-mail: opalagushkina@mail.ru*

<sup>2</sup> *Alfred Wegener Institute of Polar and Marine Research  
14473, Germany, Potsdam, Telegrafenberg, 43*

Investigation of the number of species and ecology of diatoms of modern bottom sediments in water bodies of the arctic polygon tundra in three sub-regions of Northern Yakutia was carried out. As a result, 161 taxons of diatoms were determined; the determinant role of depth, electroconductivity, pH of the medium, and geographic latitude in their distribution was confirmed, two complexes of species with respect to the leading abiotic factors were distinguished. The diatoms of the first complex prefer shallow water bodies of high latitudes with neutral and slightly alkaline water, and relatively high electroconductivity. The second complex is confined to the water bodies of lower latitudes with small electroconductivity, neutral and slightly acidic water.

**Key words:** Arctic water reservoirs, diatoms, bottom sediments, ecology, complexes.