

ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РОССИИ:
ОТ КАЛИНИНГРАДА ДО КАМЧАТКИ

УДК 551.89.551.8:574→556.55(470.111)

СООБЩЕСТВА CLADOCERA ОЗЕРА АРКТО-ПИМБЕРТО (НЕНЕЦКИЙ АО)
В СРЕДНЕМ И ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ[#]

© 2023 г. Н. М. Нигматуллин^{1,*}, Л. А. Фролова¹

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

*E-mail: NiMNigmatullin@kpfu.ru

Поступила в редакцию 31.01.2023 г.

После доработки 05.07.2023 г.

Принята к публикации 08.09.2023 г.

Проведен анализ сообществ субфоссильных Cladocera (Branciorpoda; Crustacea) колонки донных отложений озера Аркто-Пимберто, расположенного в Малоземельской тундре в дельте реки Печоры (северо-восток Европейской части России). Колонка донных отложений длиной 95 см отобрана в наиболее глубокой центральной части озера и охватывала период среднего и позднего голоцена. В исследованном керне были идентифицированы остатки 17 таксонов ветвистоусых ракообразных. Большинство выявленных субфоссильных остатков принадлежали пелагическим видам, обитавшим в глубоководной открытой части озера. По зоогеографическому районированию преобладали таксоны, широко распространенные в Палеарктике и в Голарктике. Обнаруженные фрагменты остатков *Rhynchotalona falcata* и *Alonopsis elongata* указывают на преобладание песчаных грунтов в литорали водоема. В исследованных сообществах отмечалось доминирование *Bosmina (Eubosmina) longispina* и *Chydorus cf. sphaericus*, доля которых незначительно варьировала по всей длине колонки, что свидетельствовало об относительно постоянной структуре сообществ субфоссильных Cladocera. Соотношение пелагических и литорально-фитофильных таксонов изменялось на всем исследованном интервале незначительно. По результатам кластерного анализа состава кладоцерных сообществ выделено четыре основные стратиграфические зоны. В ранней истории осадконакопления в озере наблюдался небольшой пик численности ветвистоусых ракообразных, после чего следовали спад и дальнейший постепенный рост на интервале, представленном верхними горизонтами колонки. В промежутке с 5700 кал. л. н. до 2100 кал. л. н. наблюдалось увеличение числа остатков пелагических организмов, при одновременном уменьшении числа остатков литоральных таксонов, что говорит нам о наличии хорошо развитой пелагической части водоема в то время. Наиболее значительные изменения в составе сообществ отмечены в верхних горизонтах, где наблюдаются увеличение таксономического разнообразия прибрежных организмов и рост концентрации остатков Cladocera в донных отложениях. Индекс видового разнообразия Шеннона-Уивера показал простую организацию сообщества субфоссильных Cladocera. Индекс сапробности по Пантле и Букку характеризует озеро как олигосапробное, этот статус сохранялся на протяжении всей исследованной истории развития водоема.

Ключевые слова: дельта Печоры, палеолимнология, Cladocera, кладоцерные сообщества, голоцен

DOI: 10.31857/S2949178923040072, **EDN:** GUSZUZ

ВВЕДЕНИЕ

Сообщества гидробионтов северных водоемов особенно чувствительны к антропогенной нагрузке, что ставит нас перед необходимостью уделять больше внимания изучению арктических озер и их биоты (Nigamatzyanova, 2016; Nazarova et al., 2017). Донные отложения озер, как разно-

видность геологических архивов, представляют собой записи, сохраняющие информацию об экологических условиях прошлого и подробные данные об изменении климата на региональном и планетарном уровнях (Andreev et al., 2004; Frolova, 2016). В последние годы значительно возрос интерес к палеоэкологическим, особенно палеолимнологическим исследованиям Северного полушария, что в первую очередь связано с возрастанием общественного интереса к проблеме глобального изменения климата (Subetto et al., 2017). Для разработки прогнозов будущих климатических изменений необходимы палеоэкологические реконструкции высокого разрешения на ос-

[#] Ссылка для цитирования: Нигматуллин Н.М., Фролова Л.А. (2023). Анализ изменений субфоссильных сообществ Cladocera донных отложений озера Аркто-Пимберто (Ненецкий АО) в среднем и позднем голоцене // Геоморфология и палеогеография. Т. 54. № 4. С. 131–144. <https://doi.org/10.31857/S2949178923040072>; <https://elibrary.ru/GUSZUZ>

нове долговременных рядов данных по комплексу высокочувствительных индикаторов (Прейс и др., 2016). Послойное исследование донных отложений континентальных водоемов представляет собой один из основных методов исторической экологии, который выявляет качественные и количественные изменения биоценозов во времени (Смирнов, 2010). Биологические объекты, такие, как диатомовые водоросли, споры и пыльца растений, хирономиды, остракоды и ветвистоусые ракообразные (Cladocera), хорошо зарекомендовали себя в качестве палеоиндикаторов экологических условий прошлого (Rautio, 2007; Фролова и др., 2018; Nigmatzuanova et al., 2018; Zinnatova et al., 2018). Субфоссильные остатки Cladocera широко используются в палеореконструкциях (Фролова, Ибрагимова, 2015; Фролова и др., 2018; Frolova et al., 2019; Nigmatullin et al., 2020).

Cladocera (Crustacea: Branchiopoda) являются основным компонентом планктонных и донных сообществ ракообразных озер и мелких водоемов. Они играют решающую роль в передаче углерода и энергии по пищевой цепи. Потребляя в основном бактерии, водоросли и детрит, большинство ветвистоусых ракообразных являются одним из основных компонентов питания многих хищных беспозвоночных, рыб и некоторых других, водных и околоводных позвоночных (Коровчинский и др., 2021). Сообщества субфоссильных Cladocera зарекомендовали себя как чувствительные индикаторы климатических изменений. Температура является одним из важных факторов распространения и обилия ракообразных, поскольку она оказывает прямое влияние на метаболизм и скорость размножения. Кроме температуры, мощными факторами воздействия на кладоцерные сообщества являются: доступность питательных веществ, глубина водоема, наличие макрофитов и хищников (Nevalainen et al., 2011; Frolova et al., 2013; Frolova et al., 2017).

Остатки кладоцер представляют собой одну из основных групп зоологических остатков, часто доминирующих по численности в донных отложениях водоемов (Смирнов, 2010). Экзоскелет погибших кладоцер распадается на головной щит, створки, постабдомен, его коготки, плавательные антенны, мандибулы и торакальные конечности, которые в силу инертности хитина хорошо сохраняются в донных отложениях. Но не все экзоскелетные остатки кладоцер хорошо сохраняются в донных отложениях, некоторые таксономические группы более значимы при проведении палеореконструкций в силу их лучшей сохранности, такowie семейства Chydoridae и Bosminidae. Соотношение остатков планктонных и прибрежных таксонов кладоцер может быть использовано в качестве индикатора изменения уровня воды в озере (Sarmaja-Korjonen, 2000a).

Работ по изучению субфоссильных Cladocera в донных отложениях озер в дельте реки Печоры и прилегающих территорий не так много (Sarmaja-Korjonen et al., 2003, Frolova et al., 2018; Frolova, Nigmatullin, 2019), что связано с труднодоступностью региона. Так, на озере Ванкавад были реконструированы основные этапы эволюции озера в среднем и позднем голоцене и выявлены основные изменения в комплексе доминантных видов субфоссильных Cladocera (Sarmaja-Korjonen et al., 2003). Проведены также палеоэкологические исследования в дельте Печоры с использованием остатков диатомовых водорослей (Valieva et al., 2020) и пыльцы (Nigmatzuanova et al., 2020). Кроме того, для региона опубликованы статьи по современным ветвистоусым ракообразным в зоопланктоне (Черевичко и др., 2011; Frolova et al., 2018; Nigmatullin, Frolova, 2019; Nigmatullin et al., 2020).

Территория Ненецкого автономного округа (НАО) в последние несколько десятилетий подвержена значительному техногенному воздействию, что обусловлено ростом числа разрабатываемых месторождений углеводородного сырья и обустройством их инфраструктуры. По этой причине появляется все большая необходимость в оценке техногенного воздействия на водоемы промышленных объектов (Лавриненко, 2018). Необходимы экспертная оценка экологического состояния экосистем и регионов, учет количественных и качественных показателей разнообразия фауны гидробионтов (Фефилова, Кононова, 2019). При этом ряд климатических и исторических важных районов, например, запад Европейской части России, остается малообеспеченным палеоклиматическими данными (Клименко и др., 2001). Цель нашей работы — реконструкция изменения палеоэкологических условий в голоцене в озере Аркто-Пимберто на территории дельты Печоры по результатам анализа субфоссильных остатков Cladocera.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Отбор колонки донных отложений производился сотрудниками Казанского федерального университета в рамках летней научно-исследовательской экспедиции на территории Государственного природного заказника федерального значения “Ненецкий” в августе 2018 г. С помощью пробоотборника Gravity Corer Uwites из наиболее глубокой части озера Аркто-Пимберто (68°26.114' с.ш. 053°32.311' в.д.) (рис. 1) на глубине 9 м была отобрана колонка донных отложений 18-Ре-01С длиной 95 см. Колонка была нарезана послойно с шагом в 1 см. Затем в лабораторных условиях образцы были высушены методом сублимационной сушки. Осадок исследованной

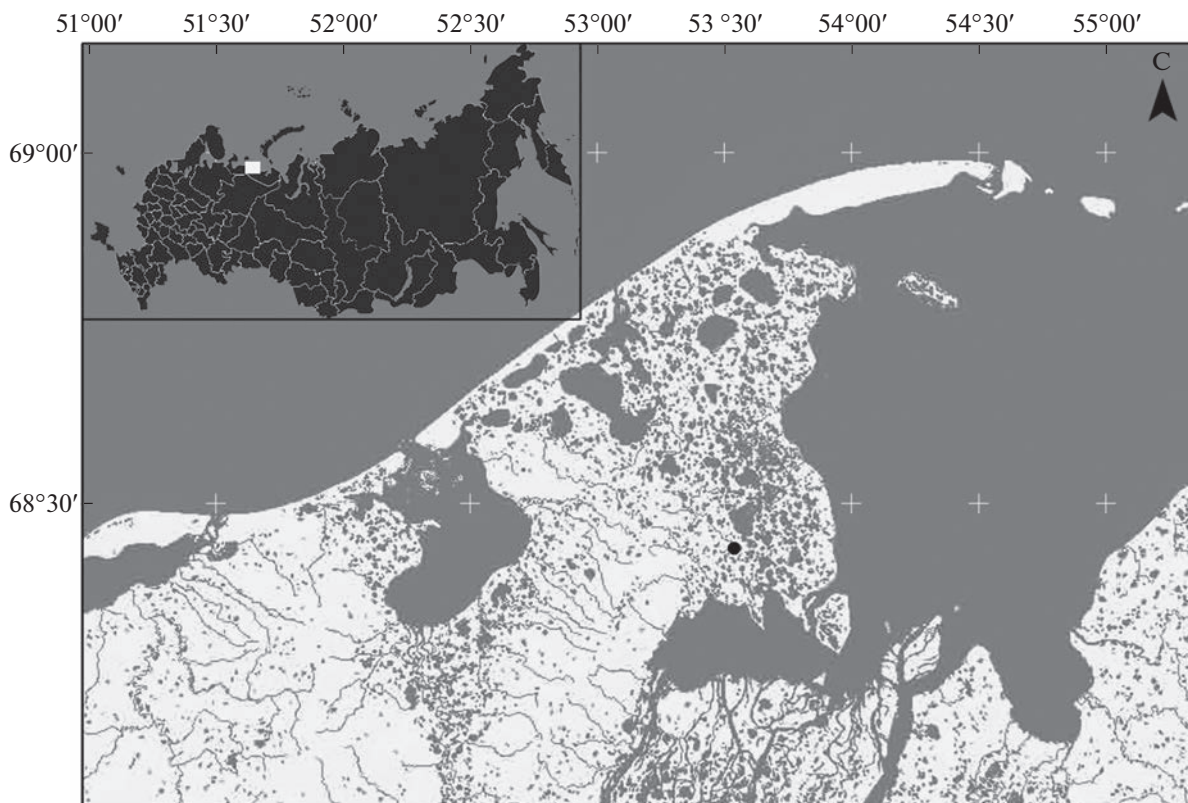


Рис. 1. Карта территории исследования дельты р. Печора.
Fig. 1. Map of the studied area in the Pechora River delta.

колонки представлял из себя темно-серый ил с песком.

Озеро для исследования выбирали по следующим критериям: оно должно быть небольшого размера, глубиной более 2 м, чтобы в холодный период года не происходило промерзания грунта; озеро не должно соединяться с другими водоемами и водотоками; без значительного прямого антропогенного воздействия.

В ходе экспедиционных работ фиксировали основные гидрологические, физические и гидрохимические показатели водоема: определяли высоту озера над уровнем моря и площадь озер с помощью GPS-навигатора, максимальную глубину по эхолоту. Кроме того, с использованием мультипараметрового анализатора Multi 3420 SET G WTW были проведены измерения основных гидрохи-

мических параметров озера (рН, удельная электропроводность, абсолютное и относительное содержание растворенного кислорода в воде, соленость, окислительно-восстановительный потенциал и др.). Для более детальных гидрохимических исследований в лабораторных условиях были отобраны пробы воды. Массовые концентрации главных ионов в пробах воды определены методом капиллярного электрофореза в камеральных условиях. Датирование отложений оз. Аркто-Пимберто выполнено с использованием ускорительной масс-спектрометрии (^{14}C в лаборатории радиоуглеродного датирования Национального Тайваньского университета (NTUAMS Lab) (г. Тайбей, Тайвань) (табл. 1). Расчет календарного возраста произведен с помощью калибровочной кривой IntCal13 (Reimer et al., 2013).

Таблица 1. Радиоуглеродные датировки осадков озера Аркто-Пимберто
Table 1. Radiocarbon dating of the sediments of Lake Arcto-Pimberto

Глубина, см	Название образца	Индексы лаборатории	Возраст, кал. л. н.	Календарный возраст
20–21	18-Рс-01С	NTUAMS-5876b	1259	1180
59–60	18-Рс-01С	NTUAMS-5877	3652	3995
94–95	18-Рс-01С	NTUAMS-5878	5577	6405

Возраст исследуемой колонки донных отложений составил ~6400 лет, т.е. период седиментации охватывает средний и поздний голоцен. Хронологические границы подразделений голоцена приведены согласно (Walker et al., 2012).

Подготовка проб для анализа субфоссильных Cladocera осуществлялась по стандартной методике (Korhola, Rautio, 2001). Образцы для исследования отбирали с шагом через 1 см. В термостабильную посуду объемом 250 мл помещали навеску сухого образца весом 0.1–0.2 г, растворяли в 10% КОН и нагревали до 75 °С в течение 30 мин. Полученную суспензию промывали через сито ячеей 50 мкм. Готовые пробы окрашивали сафранином и фиксировали спиртом для предотвращения гнилостных процессов.

Пробы просматривались под световым микроскопом Carl Zeiss Axio labA1 при 100–400 кратном увеличении. Все обнаруженные остатки были идентифицированы и подсчитаны (не менее 100 экземпляров на один подобраец). Подсчитывались постабдомены, постабдоменальные коготки, головные щиты, эфиппии и хвостовые иглы. Максимальное число встреченных фрагментов организма принималось за количество экземпляров. Идентификация встреченных остатков осуществлялась при помощи специализированных определителей современных (Мануйлова, 1964; Смирнов, 1971; Flössner, 2000; Котов и др., 2010; Коровчинский и др., 2021) и субфоссильных Cladocera (Szeroczyńska, Sarmaja-Korjonen, 2007), а также по публикациям по отдельным родам (Синев, 2002).

Для анализа структуры сообществ субфоссильных Cladocera был вычислен индекс видового разнообразия Шеннона-Уивера (Shannon, Weaver, 1963). Для оценки состояния воды в озере в разные периоды его развития был вычислен индекс сапробности по Пантле и Букка (Pantle, BUCK, 1955). Доминантов выделили по шкале Любарского (Любарский, 1974). Степени доминирования выделяются следующим образом: 0–4% – малозначимый вид; от 4–16% – второстепенный вид; 16–36% – субдоминант; 36–64% – доминант; 64–100% – абсолютный доминант. Стратиграфические зоны в колонке были выделены по результатам кластерного анализа CONISS программы Tilia 2.6.1.

РЕГИОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследований расположен за полярным кругом, в дельте р. Печоры (северо-восток Европейской России). Печора имеет длину 1809 км и площадь бассейна 322000 км². Русло реки распадается на рукава, протоки и образует много островов разной величины и формы. Острова в северной части дельты имеют плоский рельеф с

большим числом озер (Минеев, Минеев, 2002). Сложный ландшафт и гидрографическая сеть устьевой области Печоры, а также присутствие краевого эффекта, обеспеченного границами водных и наземных сред, позволяют предположить наличие здесь высокого водного биоразнообразия (Фефилова, Кононова, 2018).

В бассейне Печоры насчитывается более 60 тыс. озер, с общей площадью водной поверхности – 4019 км² (Никонова, 2015; Коковкин, 2016). В дельте Печоры повсеместно распространены преимущественно малые и средние озера термокарстового происхождения, большинство из них располагаются в бессточных понижениях. В весенний период избыток воды, как правило, сбрасывается временными водотоками (Никонова, 2016). Также распространены постепенно заболачивающиеся старицы. По гидрохимическим параметрам воды озера относятся к слабоминерализованному гидрокарбонатному классу кальциевой группы (Никонова, 2016).

Исследуемое озеро Аркто-Пимберто (68°26.114' с.ш. 53°32.311' в.д.) располагается в 12 км к северо-востоку от полуострова Костяной нос, имеет округлую форму, широкую мелководную часть и в центре глубоководную. Озеро отличается от близлежащих водоемов своей глубиной – максимальная глубина озера 9 м, тогда как средняя глубина озер вокруг около 2 м и располагается в высокой местности, которая не затапливается рекой или Коровинской губой.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты гидрохимического исследования приведены в табл. 2.

Во всей колонке донных отложений озера Аркто-Пимберто было обнаружено 7274 остатков ветвистоусых ракообразных, которые были идентифицированы до рода и вида. Среднее количество экземпляров Cladocera на образец составило 152 ± 7 , с минимальным количеством 100 экз. и максимумом 251 экз. Концентрация остатков субфоссильных кладоцер в образцах варьировала от 563 до 4464 экз./г, в среднем составив $1770 \pm \pm 135$ экз./г. В составе субфоссильных Cladocera было выявлено 17 таксонов, принадлежащих 4 семействам (Chydoridae, Bosminidae, Daphniidae и Euryteridae) (табл. 3). Основная часть таксономического разнообразия приходится на семейство Chydoridae (76%). Среди кладоцер преобладали виды, широко распространенные в Голарктике (42%) и Палеарктике (33%), 25% таксонов относились к космополитам. По количеству таксонов преобладают литорально-фитофильные кладоцеры, а по количеству обнаруженных экземпляров – пелагические.

Таблица 2. Основные физико-химические параметры и глубина озер дельты Печоры в 2018 г.
Table 2. The main physico-chemical parameters and depth of the lakes in the Pechora Delta in 2018

Параметры	Мин.	Ср. знач.	Макс.	Медиана	Ошибка ср.
Глубина, см	0.6	2.5	9.0	1.0	2.5 ± 0.8
T воды, °C	9.6	11.5	14.5	11.4	11.5 ± 0.3
Электропроводность, мкСм/см	16.2	43.5	165.0	34.0	43.5 ± 7.4
Минерализация, мг/л	13.0	35.5	80.0	29.0	35.5 ± 4.3
pH	5.2	6.6	7.7	6.6	6.6 ± 0.1
O ₂ , мг/л	8.9	9.7	10.2	9.7	9.7 ± 0.1
O ₂ , %	85.9	90.6	97.0	90.6	90.6 ± 0.6
NH ₄ ⁺ , мг/л	<0.5				
K ⁺ , мг/л	<0.5		0.6		
Na ⁺ , мг/л	2.8	4.3	6.6	3.9	1.3 ± 0.4
Mg ²⁺ , мг/л	0.3	1.0	3.3	0.7	0.9 ± 0.3
Ca ²⁺ , мг/л	0.6	2.7	13.3	1.0	4.2 ± 1.4
Cl ⁻ , мг/л	3.2	5.5	8.6	5.1	1.9 ± 0.6
SO ₄ ²⁻ , мг/л	0.6	1.1	2.3	1.0	0.6 ± 0.2
F ⁻ , мг/л	<0.10				

Таблица 3. Список обнаруженных таксонов Cladocera в донных отложениях и в зоопланктоне
Table 3. List of Cladocera taxa found in bottom sediments and zooplankton

Таксоны Cladocera	Субфоссильные Cladocera	Современные Cladocera
<i>Acroperus harpae</i> (Baird, 1834)	+	
<i>Biapertura affinis</i> (Leydig, 1860)	+	
<i>Alona guttata</i> (Sars, 1862)/ <i>Coronatella rectangula</i> (Sars, 1862)	+	
<i>Alona intermedia</i> (Sars, 1862)	+	
<i>Alona quadrangularis</i> (Müller, 1776)	+	
<i>Alona quadrangularis</i> (Müller, 1776)/ <i>Alona affinis</i> (Leydig, 1860)	+	
<i>A. guttata tuberculata</i> / <i>C. rectangula pulchra</i>	+	
<i>Alonella excisa</i> (Fischer, 1854)	+	
<i>Alonella nana</i> (Baird, 1843)	+	
<i>Alonopsis elongata</i> (Sars, 1862)	+	
<i>Bosmina (Eubosmina) coregoni</i> (Baird, 1857)	+	+
<i>Bosmina (Eubosmina) longispina</i> (Leydig, 1860)	+	+
<i>Bosmina longirostris</i> (Müller, 1785)		+
<i>Chydorus cf. sphaericus</i> (Müller, 1776)	+	+
<i>Daphnia cristata</i> (Sars, 1862)		+
<i>Daphnia</i> sp.	+	
<i>Euryercus lamellatus</i> (Müller, 1776)		+
<i>Euryercus</i> sp.	+	
<i>Graptoleberis testudinaria</i> (Fischer, 1851)	+	
<i>Holopedium gibberum</i> (Zaddach, 1855)		+
<i>Rhynchotalona falcata</i> (Sars, 1862)	+	
Итого:	17	7

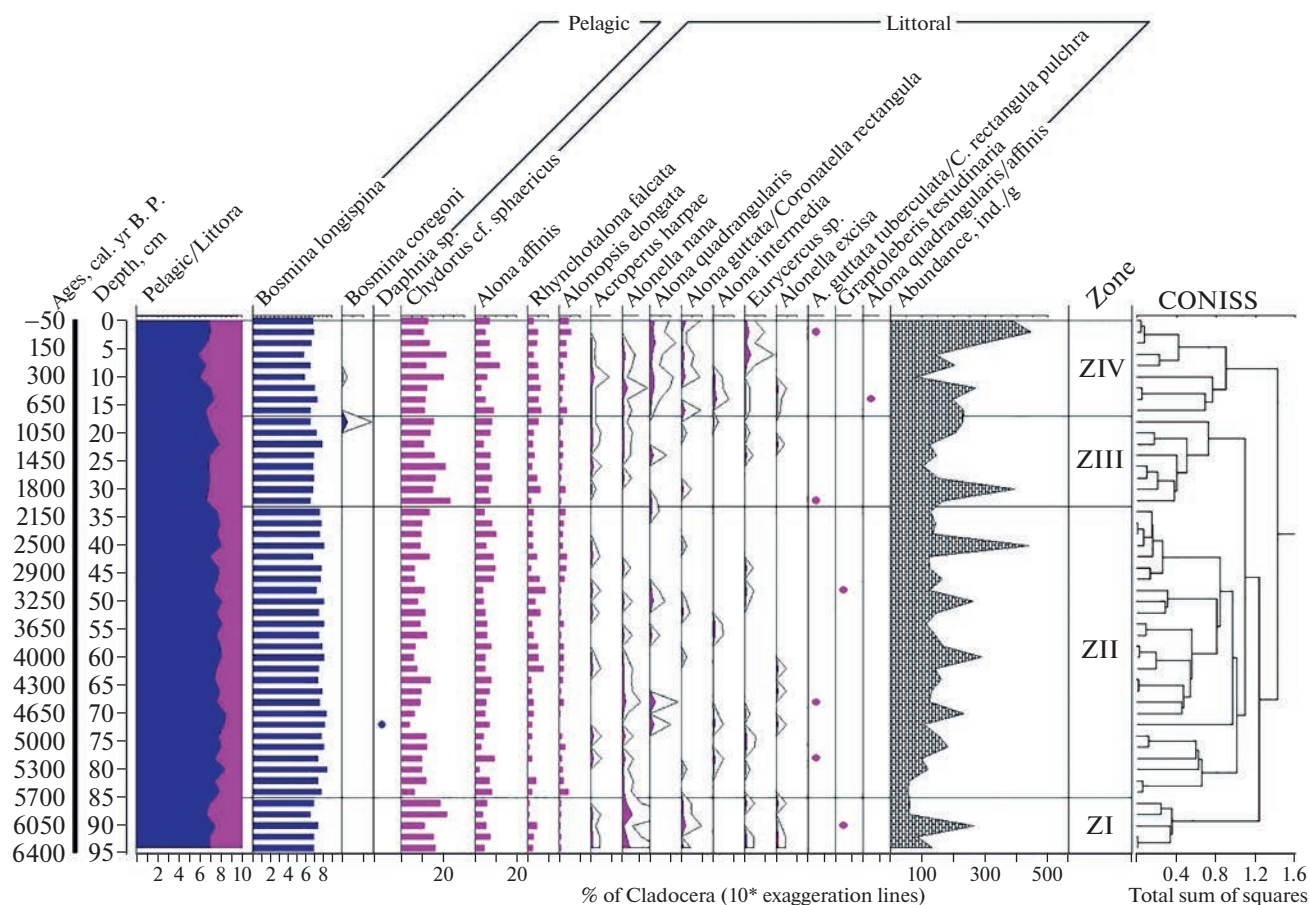


Рис. 2. Распределение таксонов Cladocera в колонке донных отложений озера Аркто-Пимберто в дельте Печоры (таксоны со средней встречаемостью <0.1% отмечены на диаграмме точкой).

Fig. 2. Distribution of the Cladoceran taxa in the bottom sediments core of Lake Arcto-Pemberto in the Pechora delta (taxa with mean occurrence <0.1% are marked with a dot in the diagram).

В колонке донных отложений по шкале Любарского абсолютным доминантом является *Bosmina (Eubosmina) longispina* (72.79%). По шкале Любарского доминанты и субдоминанты в исследуемом сообществе не выявлены. Второстепенными таксонами были *Chydorus cf. sphaericus* (12.29%), *B. affinis* (6.21%) и *R. falcata* (3.56%). Большая часть идентифицированных таксонов оказались малозначимыми для сообщества. Количество остатков увеличивается по мере продвижения к верхней части колонки.

Кластерный анализ CONISS выделяет в колонке четыре стратиграфические зоны (рис. 2).

Горизонт, соответствующий возрасту 5700–6400 кал. л. н. (85–95 см), был выделен в экологическую зону I. Количество таксонов в исследованных образцах менялось от 8 до 10. Зона характеризовалась доминированием пелагического таксона *B. (E.) longispina* (70.30%). Второстепенными таксонами оказались эвритопный и широко распространенный *Ch. cf. sphaericus* (15.77%) и литоральный вид *Biapertura affinis* (5.12%), осталь-

ные таксоны были отнесены в малозначимую группу организмов. Так же можно отметить таксон, который был встречен только в этом горизонте – *Graptoleberis testudinaria*. Кроме того, своей наибольшей численности в этой части колонки достигала *Alonella nana* (2.50%). Средняя концентрация остатков составила 1205 экз./г и изменялась в диапазоне от 582 и 2636 экз./г. Среднее значение индекса Шеннона-Уивера для данной зоны составило 1.43 ± 0.05 бит/экз. (min = 1.30; max = 1.57 бит/экз.), индекса сапробности 1.45 ± 0.01 (min = 1.43; max = 1.48) (табл. 4).

В зоне II (2100–5700 кал. л. н., 34–85 см) было идентифицировано 15 таксонов ветвистоусых ракообразных. Видовое богатство менялось в пределах от 5 до 9 таксонов в горизонте. *B. (E.) longispina* по-прежнему доминировала, ее значение в описываемом горизонте возросло и составило 78.3%, в то время как литоральный таксон *C. cf. shaericus* снизил свое количество до 9.1%. Численность *B. affinis* и *R. falcata* не претерпела существенных изменений и оставалась стабильной на протяже-

Таблица 4. Индексы, вычисленные на основе состава кладоцерного сообщества озера Аркто-Пимберто
Table 4. Indices calculated based on the composition of the cladocera community in Lake Arcto-Pimberto

Зоны	Кол-во таксонов	Индекс сапробности			Индекс Шеннона-Уивера		
		мин.	ср. знач.	макс.	мин.	ср. знач.	макс.
Зона I	11	1.43	1.45	1.48	1.30	1.43	1.57
Зона II	15	1.37	1.41	1.46	0.86	1.18	1.49
Зона III	14	1.40	1.45	1.50	1.19	1.41	1.67
Зона IV	15	1.40	1.42	1.43	1.49	1.66	1.85

нии всей колонки, в то время как численность *A. elongata* увеличилась до 1.68%. Концентрация субфоссильных остатков кладоцера на данном этапе существования озера возросла, составив в среднем 1564 экз./г, достигая максимального значения 4388 экз./г на глубине 40–41 см (~2500 кал. л. н.). Индекс Шеннона-Уивера снизился и имел средний показатель 1.18 ± 0.03 бит/экз., а индекс сапробности – 1.41 ± 0.01 .

Зона III, 700–2100 кал. л. н. (16–34 см). В зоне было обнаружено 14 таксонов ветвистоусых ракообразных, большинство таксонов (11) принадлежали к семейству Chydoridae. В зоне наблюдается уменьшение доли планктонных таксонов, в то время как прибрежные организмы увеличили свое значение, среди которых *C. cf. shaericus* был наиболее многочисленным. Впервые появилась *B. (E.) coregoni*, которая не достигала высокого обилия. Наблюдались небольшое снижение численности прибрежных организмов и увеличение численности пелагических форм на глубине 22–23 см (~1200 кал. л. н.). Средняя концентрация субфоссильных Cladocera возросла до 1950 экз./г. Значения индекса видового разнообразия Шеннона-Уивера менялись в пределах 1.01–1.47 бит/экз. Индекс сапробности по-прежнему характеризовал водоем как олигосапробный – 1.42 ± 0.01 .

Зона IV 0–700 кал. л. 15–0 см. Было идентифицировано 15 таксонов кладоцера, в отдельных образцах их количество менялось от 8 до 12. Абсолютным доминантом по-прежнему была *B. (E.) longispina* (66.27%), относительная численность которой снизилась в данном горизонте до минимальных значений. Доля *C. cf. shaericus* в сообществе составляла 13.99%. Второстепенные таксоны – *B. affinis*, *R. falcata* и *A. elongata* – практически не претерпевали количественных изменений. Кроме того, некоторые прибрежные организмы, такие как *Alona quadrangularis*, *Eurycercus* sp. и *Alona intermedia* увеличили свое присутствие в этой зоне. Анализ видового состава субфоссильных Cladocera выявил два пика концентраций литорально-фитофильных таксонов на глубинах 10–11 см (~300 кал. л. н.) и 6–7 см (~150 кал. л. н.). Видовое богатство и концентрация остатков ветвистоусых ракообразных имели максимальное значение в данной зоне

(2557 экз./г). Увеличение концентрации остатков отмечено по направлению к верхним горизонтам колонки и резкое уменьшение на глубине 10–11 см. Среднее значение индекса Шеннона-Уивера достигло 1.66 бит/экз., что свидетельствует об усложнении структуры сообщества ракообразных, а индекс сапробности составил 1.42 ± 0.02 .

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенное исследование субфоссильных Cladocera колонки донных отложений озера Аркто-Пимберто возрастом 6400 кал. л. н. выявило стабильный во времени танатоценоз. В составе кладоцерного сообщества на протяжении исследованной истории осадконакопления в озере доминировал один и тот же таксон, пелагическая *B. (E.) longispina*, составляя от 66 до 78% общей численности кладоцер. Это широко распространенный в Европе и Западной Сибири таксон, который встречается в водоемах различного типа. Центр разнообразия морфотипов этой босмины находится на северо-западе Европы, в Балтийском регионе (Bledzki, Rybak, 2016; Коровчинский и др., 2021). Доминирование данного таксона свидетельствует о наличии хорошо развитой открытой части водоема, которая преобладает над литоралью. Таким образом, озеро на всем исследованном периоде времени представляло собой относительно глубокий водоем с хорошо развитой глубоководной пелагической зоной. Босмины широко распространенные мелкие ракообразные, являющиеся фильтраторами, распространенные в открытых водоемах, как в литоральной, так и пелагической зон озер (Коровчинский и др., 2021). В исследуемом регионе доминирование *Bosmina (Eubosmina)* sp. в донных отложениях было отмечено также в озере Ванкавад, но там данный таксон начинает доминировать с 5400 кал. л. н., приходя на смену литоральным таксонам, и авторы связывают доминирование босмины с увеличением глубины водоема, что подтверждается по другим индикаторным группам (Sarmaja-Kojonen, 2003). Второстепенное значение в колонке оз. Аркто-Пимберто имели таксоны *C. cf. sphaericus*, *B. affinis* и *R. falcata*. Это литоральные или литорально-бентосные таксоны, часто связанные с

водной растительностью. Их относительно высокая численность наблюдается в периоды 5650–6400 кал. л. н. и 0–2000 кал. л. н., что, вероятно, связано с высоким содержанием органического вещества в озере и высокой продуктивностью водоема в эти периоды. Присутствие в озере *R. falcata* и *A. elongata* может свидетельствовать о наличии песчаных грунтов и подкисленности водоема (Bledzki, Rybak, 2016), отметим, что современная вода в озере слабокислая (рН = 6.9) (табл. 2).

В нижней части колонки 5700–6400 кал. л. н. при доминировании пелагического таксона *B. (E.) longispina* относительно высока численность литорально-фитофильных таксонов. В этой зоне достигает своих максимальных значений *A. nana* – широко распространенный в Европе вид, обитающий на песчаном побережье и среди растительности в озерах, в бассейнах рек, на возвышенностях, речных поймах и водохранилищах, и предпочитающий олиготрофные или мезотрофные воды с рН > 3.2 (Bledzki, Rybak, 2016). Еще один высокоспециализированный относительно теплолюбивый вид, связанный с прибрежной растительностью, который присутствует в этой зоне – это *G. testudinaria* (Nevalainen et al., 2010; Коровчинский и др., 2021). Его наличие также является показателем хорошо развитой мелководной литоральной зоны с макрофитами в условиях относительно теплого климата.

В настоящее время воды озера имеют показатели активности среды значения, близкие к нейтральным. 5700–6400 кал. л. н. значительное развитие таксона *A. nana*, предпочитающего кислые олиготрофные и мезотрофные водоемы с рН > 3.2 (Котов и др., 2010), свидетельствует о более низких значениях рН, вероятно, в результате процессов заболачивания. Для характеристики структуры кладоцерного сообщества был использован индекс видового разнообразия Шеннона-Уивера, который заметно менялся на протяжении всей колонки. В нижней части колонки в оптимум голоцена наблюдается относительно высокое значение индекса для этой колонки (1.43), что связано с обилием и разнообразием ветвистых ракообразных в тот период. По нашим данным мы наблюдаем увеличение численности остатков *Cladocera* на глубине 90–91 см (6100 кал. л. н.), что вероятно связано с благоприятными климатическими условиями в то время.

Согласно результатам палинологических исследований на севере Европейской части России климат в период 4500–6000 кал. л. н. (это последняя половина атлантического периода) характеризовался как влажный и теплый, среднегодовая температура была выше на 2–3°C, чем сегодня, а количество осадков было больше на 100 мм в год (Andreev, Klimanov, 2000). В европейской части российской Арктики голоценовый оптимум при-

ходился примерно на 3500–8000 кал. л. н., когда летние температуры в тундре были примерно на 3°C выше современных значений. Еловые леса простирались на 150 км к северу от нынешней границы тайги. Падение летних температур и исчезновение лесных массивов в районе реки Печоры за последние 3500 лет является частью общей тенденции позднеголоценового похолодания и отступления лесных массивов по всей арктической Евразии. В бассейне Печоры позднеголоценовое похолодание совпадает с усилением вечной мерзлоты, датируемым 3000–3200 кал. л. н. За этот период значительно расширяется северная тундра (Salonen et al., 2011).

В период 2100–5700 кал. л. н. уменьшалась доля прибрежных таксонов и увеличивалось число пелагических ракообразных, а именно босмин. Так как соотношение планктонных и литоральных таксонов в палеоклиматических реконструкциях может говорить об изменениях уровня воды в озере (Rutio, 2001), мы можем говорить об уменьшении площади мелководной литоральной зоны в пользу участков открытой пелагиали. Уменьшение плотности *C. cf. sphaericus* может говорить об изменении трофического статуса водоема в сторону уменьшения продуктивности. В этой зоне отмечено относительно низкое разнообразие кладоцер. Значения индекса Шеннона-Уивера значительно снижаются (M = 1.18, min = –0.98 (4700 кал. л. н.)), отражая ухудшение условий существования сообществ.

В течение последних 2100 кал. лет менялось соотношение пелагических и литоральных таксонов: вновь свою относительную численность наращивают прибрежные организмы. Увеличивалась численность *C. cf. sphaericus*, которая удвоилась в районе 1900 кал. л. н., что говорит о некотором повышении трофического статуса водоема. Известно, что он встречается в зоопланктоне богатых питательными веществами озер (Luoto et al., 2008). За последние 650 кал. лет наблюдается увеличение количества *A. elongata*, обычно обитающей на песчаных грунтах открытой литорали озер при рН больше 4.1 в олигосапробных водоемах (Flossner, 2000). Вероятно, это говорит о подкислении водоема и об увеличении открытой литорали. На диаграмме видно, что увеличивается количество остатков таких литоральных таксонов, как *A. quadrangularis*, *Alona guttata/Coronatella rectangula*, а особенно *A. nana* и *Eurycercus* sp. связанных с прибрежной растительностью. Все это свидетельствует о наличии в этот период литоральной зоны с хорошо развитой водной растительностью. Описываемый период характеризуются увеличением численности *Cladocera*. Особенно сильно возрастает концентрация остатков кладоцера за последние 100 лет. Происходит последовательный рост значений индекса Шеннона-Уивера, где максимальное число 1.85.

Этот рост сопровождается увеличением количества остатков в донных отложениях и увеличением таксономического разнообразия. Это может свидетельствовать об улучшении условий среды обитания ветвистоусых ракообразных.

Индекс сапробности в отдельных горизонтах менялся незначительно, в пределах от 1.41 до 1.45, характеризуя водоем как олигосапробный на всех этапах его развития.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование остатков кладоцер из колонки донных отложений 18-Рс-01С из озера Аркто-Пимберто в дельте реки Печора позволило нам проследить основные этапы эволюции водоема и экологических условий в нем. Изученная история осадконакопления в озере начинается примерно с 6400 кал. л. н., что приходится на голоценовый оптимум. Структура сообщества кладоцера была уже сформирована к этому моменту и не претерпевала кардинальных трансформаций на протяжении всей истории осадконакопления. Тем не менее происходили некоторые количественные изменения в соотношении литоральных и пелагических таксонов, менялся состав второстепенных и малозначимых таксонов. На основе выявленных изменений при помощи кластерного анализа мы выделили четыре значимые стратиграфические зоны.

По количеству остатков преобладали пелагические организмы, а по числу таксонов лидировали литорально-фитофильные ракообразные. Абсолютным доминантом являлся пелагический вид *B. (E.) longispina*, доминанты и субдоминанты отсутствовали. Второстепенные роли в сообществе выполняли *C. cf. sphaericus*, *B. affinis* и *R. falcata*.

5700–6400 кал. л. н. наблюдался более теплый, чем в настоящее время климат, кислотность воды была выше, также выше доля литоральных таксонов и, соответственно, выше доля мелководных литоральных участков, заросших макрофитами и мхами. Впоследствии произошло увеличение доли пелагических организмов, снизилась доля ацидофильных таксонов, указывая на повышение щелочности воды. Снижение индексов видового разнообразия и концентраций остатков в донных отложениях указывает на снижение продуктивности водоема. Наиболее значительные изменения произошли в последнее время, когда вновь увеличилась доля литоральных таксонов, увеличились индексы видового разнообразия, значительно увеличилась концентрация остатков *Cladocera* в донных отложениях, отражая более благоприятные климатические условия последнего столетия. На всем исследованном интервале водоем оставался олигосапробным и был заселен

относительно простым сообществом ветвистоусых ракообразных.

БЛАГОДАРНОСТИ

Реконструкция экологических изменений выполнена с использованием субфоссильных *Cladocera* за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания проект № FZSM-2023-0023 в сфере научной деятельности. Часть лабораторных работ выполнена по Программе Стратегического академического лидерства Казанского федерального университета. Выражаем огромную благодарность сотрудникам государственного природного заповедника «Ненецкий» за помощь в организации и проведении экспедиционных работ. Отдельная благодарность А.С. Сергееву и Г.С. Кашеварову за неоценимую помощь при проведении полевых работ и отборе колонок донных отложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабушкин А.Г.* (2007). Гидрохимический мониторинг поверхностных вод Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Новосибирск: Наука. 152 с.
- География и мониторинг биоразнообразия (2002) / Под ред. Н.С. Касимова, Э.П. Романовой, А.А. Тишкова. М.: Изд-во НУМЦ. 432 с.
- Ибрагимова А.Г.* (2020). Тафоценозы *Cladocera* (Branchiopoda, Crustacea) гляциогенных озер европейской части России. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Казань: КФУ. 23 с.
- Климченко В.В., Климанов В.А., Сирин А.А. и др.* (2001). Изменение климата на западе Европейской части России в позднем голоцене // ДАН. Т. 376. № 5. С. 679–683.
- Коковкин А.В.* (2016). Река Печора // Известия Коми отделения РГО. Вып. 1 (17)) / Мат-лы Комплексной Печорской экспедиции. Сыктывкар: Геопринт. С. 7–8.
- Коровчинский Н.М., Котов А.А., Синева А.Ю. и др.* (2021). Ветвистоусые ракообразные (Crustacea: Cladocera) Северной Евразии. Т. I–II. М.: Товарищество научных изданий КМК. 544 с.
- Котов А.А., Синева А.Ю., Глаголев С.М. и др.* (2010). Ветвистоусые ракообразные (*Cladocera*) // Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод европейской России. М.: Товарищество научных изданий КМК. С. 151–276.
- Лавриненко И.А.* (2018). Карта техногенной нарушенности растительного покрова Ненецкого автономного округа // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. Т. 15. № 2. С. 128–136. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-128-136>
- Любарский Е.Л.* (1974). К методике экспресс-квалификации и сравнения описаний фитоценозов // Количественные методы анализа растительности. Уфа: БФАН СССР. С. 39–42.
- Мануйлова Е.Ф.* (1964). Ветвистоусые рачки (*Cladocera*) фауны СССР. М.–Л.: Наука. 328 с.

- Минеев О.Ю., Минеев Ю.Н. (2002). Птицы дельты реки Печоры // Рус. орнитол. журн. Экспресс-выпуск. Т. 11. № 183. С. 373–381.
- Никонова А.Н. (2015). Трансформация пойменных экосистем дельты Печоры в зоне влияния Кумжинского газоконденсатного месторождения (Ненецкий Автономный Округ) // Известия РАН. Сер. географическая. № 5. С. 117–129. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2015-5-117-129>
- Никонова А.Н. (2016). Трансформация экосистем дельты Печоры в зоне влияния Кумжинского газоконденсатного месторождения (Ненецкий Автономный Округ). Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: ИГ РАН. 29 с.
- Орлова Ю.С. (2013). Использование индексов биологического разнообразия для анализа альгофлоры бассейна р. Алатырь // Вестн. Мордовского ун-та. № 3–4. С. 53–57.
- Прейс Ю.И., Симонова Г.В., Сладогова Е.А. (2016). Детальная стратиграфия и динамика Хасырея Центрального Ямала в верхнем голоцене // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. Т. 327. № 10. С. 35–49.
- Семенов В.Ф. (2016). Изучение геоморфологии долины реки Печоры и прилегающих территорий // Известия Коми отделения РГО. Вып. 1 (17) / Мат-лы Комплексной Печорской экспедиции. Сыктывкар: Геопринт. С. 9–25.
- Синев А.Ю. (2002). Ключ для определения ветвистых ракообразных рода Alona (Anomopoda, Chydoridae) европейской части России и Сибири // Зоологический журнал. Т. 81. № 8. С. 926–939.
- Смирнов Н.Н. (1971). Фауна СССР. Ракообразные. Т. 1. Вып. 2. Chydoridae фауны мира. Л.: Наука. 533 с.
- Смирнов Н.Н. (2010). Историческая экология пресноводных зооценозов. М.: Товарищество научных изданий КМК. 219 с.
- Фефилова Е.Б., Кононова О.Н. (2019). Разнообразие планктонной фауны дельты реки Печоры // Сибирский экологический журнал. Т. 3. С. 314–326.
- Фефилова Е.Б., Кононова О.Н. (2018). Новые данные по составу зоопланктона дельты реки Печора // Известия Коми Республиканского отделения РГО. Вып. 2 / Результаты Комплексной Печорской экспедиции – 2016. Сыктывкар: Геопринт. С. 56–64.
- Фролова Л.А., Ибрагимов А.Г. (2015). Карцинологический анализ донных отложений озер Километровое и Котово Харьейской системы (Большеземельская тундра) // Труды КарНЦ РАН. № 5. Сер. Лимнология. С. 5–17. <https://doi.org/10.17076/lim34>
- Фролова Л.А., Ибрагимов А.Г., Субетто Д.А. и др. (2018). Палеоэкологические и палеоклиматические реконструкции карельского перешейка на основе изучения субфоссильных Cladocera озера Медведское (Северо-запад России) // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. Т. 160. Кн. 1. С. 93–110.
- Черевичко А.В., Мельник М.М., Прокин А.А. и др. (2011). Современное состояние зоопланктона и макрозообентоса низовий р. Печора (Ненецкий АО) // Вода: химия и экология. № 9. С. 53–59.
- Andreev A.A., Klimanov V.A. (2000). Quantitative Holocene climatic reconstruction from Arctic Russia // J. Paleolimnol. Vol. 24. Iss. 1. P. 81–91. <https://doi.org/10.1023/A:1008121917521>
- Andreeva A.A., Tarasov P.E., Klimanov V.A. et al. (2004). Vegetation and climate changes around the Lama Lake, Taymyr Peninsula, Russia during the Late Pleistocene and Holocene // Quat. Int. Vol. 122. Iss. 1. P. 69–84. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2004.01.032>
- Bledzki L.A., Rybak J.I. (2016). Freshwater crustacean zooplankton of Europe. Springer International Publishing Switzerland. 923 p.
- Flossner D. (2000). Die Haplopoda und Cladocera (ohne Bosminidae) Mitteleuropas. Leiden: Backhuys Publishers. 428 p.
- Frolova L. (2016). Subfossil Cladocera (Branchiopoda, Crustacea) in climatic and palaeoenvironmental investigations in Eastern Siberia (Russia) // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. Vol. 2. Iss. 4. P. 601–606. <https://doi.org/10.5593/SGEM2016/B42/S19.077>
- Frolova L.A., Ibragimova A.G., Ulrich M. et al. (2017). Reconstruction of the History of a Thermokarst Lake in the Mid-Holocene Based on an Analysis of Subfossil Cladocera (Siberia, Central Yakutia) // Contemp. Probl. Ecol. Vol. 10. Iss. 4. P. 423–430. <https://doi.org/10.1134/S1995425517040023>
- Frolova L.A., Nazarova L.B., Pestryakova L.A. et al. (2013). Analysis of the Effects of Climate-Dependent Factors on the Formation of Zooplankton Communities that Inhabit Arctic Lakes in the Anabar River Basin // Contemp. Probl. Ecol. Vol. 6. Iss. 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.1134/S199542551301006X>
- Frolova L.A., Nigmatullin N.M. (2019). First record of Phreatalona protzi (hartwig, 1900) (Branchiopoda: Anomopoda) in a tundra lake in North-East European Russia // 19th International multidisciplinary scientific Geoconference SGEM. Vol. 19. Iss. 5.1. P. 285–290. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/5.1/S20.036>
- Frolova L., Nigmatullin N., Frolova A. (2018). Paleolimnological studies of tundra lakes in the Pechora delta (Nenets Autonomous Region, Russia) // 18th International multidisciplinary scientific Geoconference SGEM. Vol. 18. Iss. 5/1. P. 621–627. <https://doi.org/10.5593/sgem2018/5.1/S20.080>
- Korhola A., Rautio M. (2001). Cladocera and other branchiopod crustaceans // Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Developments in Palaeoenvironmental Research. Vol. 4. P. 125–165. https://doi.org/10.1007/0-306-47671-1_2
- Korosi J.B., Kurek J., Smol J.P. (2013). A review on utilizing Bosmina size structure archived in lake sediments to infer historic shifts in predation regimes // J. Plankton Res. Vol. 35. Iss. 2. P. 1–17. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbt007>
- Luoto T.P., Nevalainen L., Sarmaja-Korjonen K. (2008). Multiproxy evidence for the ‘Little Ice Age’ from Lake Hamptask, Southern Finland // J. Paleolimnol. Vol. 40.

- Iss. 4. P. 1097–1113.
<https://doi.org/10.1007/s10933-008-9216-4>
- Nazarova L.B., Self A.E., Brooks S.J. et al.* (2017). Chironomid Fauna of the Lakes from the Pechora River Basin (East of European part of Russian Arctic): Ecology and Reconstruction of Recent Ecological Changes in the Region // *Contemp. Probl. Ecol.* Vol. 10. Iss. 4. P. 350–362.
<https://doi.org/10.1134/S1995425517040059>
- Nevalainen L., Luoto T.P., Kultti S. et al.* (2011). Do subfossil Cladocera and chydorid ephippia disentangle Holocene climate trends? // *The Holocene.* Vol. 22. Iss. 3. P. 291–299.
<https://doi.org/10.1177/0959683611423691>
- Nevalainen L., Rantala M.V., Luoto T.P.* (2015). Sedimentary cladoceran assemblages and their functional attributes record late Holocene climate variability in southern Finland // *J. Paleolimnol.* Vol. 54. Iss. 2. P. 239–252.
<https://doi.org/10.1007/s10933-015-9849-z>
- Nigmatzyanova G.R., Frolova L.A., Abramova E.N.* (2016). Zooplankton spatial distribution in thermokarst lake of The Lena River Delta (Republic of Sakha (Yakutia)) // *Res. J. Pharm., Biol. Chem. Sci.* Vol. 7. Iss. 5. P. 1288–1297.
<https://doi.org/10.1007/s10933-015-9849-z>
- Nigmatzyanova G., Frolova L., Kosareva L.* (2018). Palynological analysis of bottom sediments of lake rubskoe (Ivanovo region, Russia) // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM.* Vol. 18. Iss. 5.1. P. 629–636.
<https://doi.org/10.5593/sgem2018/5.1/S20.081>
- Nigmatzyanova G.R., Frolova L.A., Nigmatullin N.M. et al.* (2020). Vegetation and climate changes in the northeast European Russia (Nenets Autonomous Okrug, Russia) // *20 International multidisciplinary scientific geoconference SGEM.* Vol. 20. Iss. 4.1. P. 547–552.
<https://doi.org/10.5593/sgem2020/4.1/s19.068>
- Nigmatullin N., Frolova L., Gareev B.* (2020). Subfossil Cladocera from the Bottom Sediments of Lake Lebedinoe (Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Russia) // *Kazan Golovkinsky “Young Scientists” Stratigraphic Meeting.* P. 143–147.
- Nigmatullin N., Frolova L., Nigmatzyanova G. et al.* (2020). A study of zooplankton in tundra lakes of the pechora river delta (North-Eastern European Russia) // *20th International multidisciplinary scientific Geoconference SGEM.* Vol. 20. Iss. 4.1. P. 289–296.
<https://doi.org/10.5593/sgem2020/4.1/s19.036>
- Nigmatullin N.M., Frolova L.A.* (2019). Zooplankton community structure and environmental conditions of tundra lakes in the Pechora River delta (Northern Russia) // *19th International multidisciplinary scientific Geoconference SGEM.* Vol. 19. Iss. 5.1. P. 817–824.
- Pantle F., Buck H.* (1955). Die biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse // *Gas-Wasserfach.* Vol. 96. № 18. P. 604–620.
- Rautio M.* (2007). Cladocera. S.A. Elias (ed.). *Encyclopedia of Quaternary Sciences.* Elsevier. P. 463–472.
- Rautio M., Dufresne F., Laurion I. et al.* (2011). Shallow freshwater ecosystems of the circumpolar Arctic // *Ecoscience.* Vol. 18. Iss. 3. P. 204–222.
<https://doi.org/10.2980/18-3-3463>
- Reimer P., Bard E., Bayliss A. et al.* (2013). IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves, 0–50000 years cal BP // *Radiocarbon.* Vol. 55. Iss. 4. P. 1869–1887.
https://doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16947
- Salonen J.S., Seppä H., Väiliranta M. et al.* (2011). The Holocene thermal maximum and late-Holocene cooling in the tundra of NE European Russia // *Quat. Res.* Vol. 75. Iss. 3. P. 501–511.
<https://doi.org/10.1016/j.yqres.2011.01.007>
- Sarmaja-Korjonen K.* (2001). Correlation of fluctuations in cladoceran planktonic: littoral ratio between three cores from a small lake in southern Finland: Holocene water-level changes // *The Holocene.* Vol. 11. Iss. 1. P. 53–63.
<https://doi.org/10.1191/0959683016770713>
- Sarmaja-Korjonen K., Hakojärvi M., Korhola A.* (2000). Subfossil remains of an unknown chydorid (Anomopoda: Chydoridae) from Finland // *Hydrobiologia.* Vol. 436. Iss. 1–3. P. 165–169.
<https://doi.org/10.1023/A:1026502219867>
- Sarmaja-Korjonen K., Kultti S., Solovieva N. et al.* (2003). Mid-Holocene palaeoclimatic and palaeohydrological conditions in northeastern European Russia: a multiproxy study of Lake Vankavud // *J. Paleolimnol.* Vol. 30. P. 415–426.
- Shannon C.E., Weaver W.* (1963). *The mathematical theory of communication.* Illinois press. 1963. 117 p.
- Subetto D.A., Nazarova L.B., Pestryakova L.A. et al.* (2017). Paleolimnological studies in Russian northern Eurasia: A review // *Contemp. Probl. Ecol.* Iss. 10. P. 327–335.
<https://doi.org/10.1134/S1995425517040102>
- Szeroczyńska K., Sarmaja-Korjonen K.* (2007). *Atlas of Subfossil Cladocera from Central and Northern Europe.* Friends of the Lower Vistula Society. 84 p.
- Valieva E., Frolova L., Nigmatzyanova G. et al.* (2020). Diatoms in bottom sediments of the arctic lake in the pechora river delta (Nenets Autonomous Okrug, Russia) // *20th Int. multidisciplinary scientific geoconference proceedings SGEM.* Vol. 20. Iss. 4.1. P. 391–398.
<https://doi.org/10.5593/sgem2020/4.1/s19.049>
- Walker M.J.C., Berkelhammer M., Björck S. et al.* (2012). Formal subdivision of the Holocene Series/Epoch: A Discussion Paper by a Working Group of INTIMATE (Integration of ice-core, marine and terrestrial records) and the Subcommission on Quaternary Stratigraphy (International Commission on Stratigraphy) // *J. Quat. Sci.* Vol. 27. Iss. 7. P. 649–659.
<https://doi.org/10.1002/jqs.2565>
- Zinnatova E., Frolova L., Kulikovskiy M.* (2018). Diatom complexes in the bottom sediments of Rubskoe Lake (The east European plain, Russia) // *18th Int. Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM.* Vol. 18. Iss. 5.1. P. 275–282.
<https://doi.org/10.5593/sgem2018/5.1/S20.036>

CLADOCERA COMMUNITIES OF LAKE ARCTO-PIMBERTO (NENETS AUTONOMOUS DISTRICT) IN THE MIDDLE AND LATE HOLOCENE¹

N. M. Nigmatullin^{a,#} and L. A. Frolova^a

^aKazan Federal University, Kazan, Russia

[#]E-mail: NiMNigmatullin@kpfu.ru

The analysis of the subfossil Cladocera community in the bottom sediments from Lake Arcto-Pimberto located in the Pechora River delta (Nenets Autonomous District) was carried out. A 95-cm-long continuous core of bottom sediments was collected in the deepest part of the lake and covers approximately 6400 years of sediment accumulation during Middle and Late Holocene. 17 cladoceran taxa were identified in the studied core. Species with Holarctic and Palearctic distributions prevailed in the lake. Most of the identified subfossil remains belong to pelagic species living in the open part of the lake. Found fragments of chitinized remains of *Rhynchotalona falcata* and *Alonopsis elongata* indicate the presence of sandy soils in the water body. The samples were dominated by *Bosmina* (*Eubosmina*) *longispina* and *Chydorus* cf. *sphaericus*, which are evenly distributed along the continuous sediment core. We have studied the history of the development and evolution of the lake based on changing of the taxonomic composition of microcrustaceans in the bottom sediment core. The structure of the subfossil Cladocera community stayed relatively constant. The ratio of pelagic and littoral-phytophilic taxa changed slightly. Depending on the changes in the species composition of the cladoceran assemblage, the sediment core was divided into 4 ecological zones. In the early history of sedimentation in the lake, there is a small peak in the abundance of crustaceans, followed by decrease and further gradual increase towards the upper horizons of the column. Between from 5700 cal. years BP to 2100 cal. years BP there is an increase in abundance of pelagic organisms, with a decrease in abundance of littoral taxa. This marks the presence of a well-developed pelagic part of the reservoir at that time. In the upper zones, we observe the taxonomic diversity of littoral organisms and an increase in abundance of their remains. The Shannon-Weaver species diversity Index showed a simple organization of the community of subfossil Cladocera. The Pantle and Buck saprobity Index characterized the lake as oligosaprobic, this status is maintained throughout its evolution of the lake.

Keywords: Pechora delta, paleolimnology, Cladocera, cladocan communities, Holocene

ACKNOWLEDGMENTS

The reconstruction of environmental changes using the analysis of subfossil Cladocera was carried out with the support of the Russian Science Foundation (project No. 22-47-08001). Hydrochemical analysis of water was carried out at the expense of a subsidy allocated to Kazan Federal University to fulfill the state task project no. FZSM-2023-0023 in the field of scientific activity. Part of the laboratory work was performed as part of the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program. We express our thankful to the staff of the Nenets Nature Reserve for organizing the field work. Special thanks to A.S. Sergeyev and G.S. Kashevarov for their invaluable assistance in carrying out field work.

REFERENCES

- Andreev A.A., Klimanov V.A. (2000). Quantitative Holocene climatic reconstruction from Arctic Russia. *J. Paleolimnol.* Vol. 24. Iss 1. P. 81–91. <https://doi.org/10.1023/A:1008121917521>
- Andreeva A.A., Tarasov P.E., Klimanov V.A. et al. (2004). Vegetation and climate changes around the Lama Lake, Taymyr Peninsula, Russia during the Late Pleistocene and Holocene. *Quat. Int.* Vol. 122. Iss. 1. P. 69–84. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2004.01.032>
- Artyukhov V.G., Dobrovolsky G.V., Marfenin N.N. et al. (Eds.). (2002). *Geografiya i monitoring bioraznoobraziya* (Geography and monitoring of biodiversity). M.: Publishing House of the Scientific and Scientific-Methodical Center Publ. (Publ.). 432 p. (in Russ.)
- Babushkin A.G. (2007). *Gidrokhimicheskii monitoring po-verkhnostnykh vod Khanty-Mansiiskogo avtonomnogo okruga – Yugry* (Hydrochemical monitoring of surface waters of Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra). Novosibirsk: Nauka (Publ.). 152 p. (in Russ.)
- Bledzki L.A., Rybak J.I. (2016). *Freshwater crustacean zooplankton of Europe*. Springer International Publishing Switzerland. 923 p.
- Cherevichko A.V., Melnik M.M., Prokin A.A. et al. (2011). Current state of zooplankton and macrozoobenthos of Pechora lower reaches (Nenets Autonomous Area). *Voda: himiya i ekologiya*. No. 9. P. 53–59. (in Russ.)
- Fefilova E.B., Kononova O.N. (2019). Diversity of planktonic fauna of the Pechora River Delta. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*. Vol. 3. P. 314–326. (in Russ.)

¹ For citation: Nigmatullin N.M., Frolova L.A. (2023). Cladocera communities of Lake Arcto-Pimberto (Nenets Autonomous District) in the Middle and Late Holocene. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 54. No. 4. P. 131–144. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2949178923040072>. <https://elibrary.ru/GUSZUZ>

- Fefilova E.B., Kononova O.N. (2018). New data on zooplankton structure of the Pechora delta. *Izvestiya Komi Respublikanskogo otdeleniya RGO*. Vol. 2. P. 56–64. (in Russ.)
- Flossner D. (2000). Die Haplopoda und Cladocera (ohne Bosminidae) Mitteleuropas. Leiden: Backhuys Publishers (Publ.). 428 p.
- Frolova L. (2016). Subfossil Cladocera (Branchiopoda, Crustacea) in climatic and palaeoenvironmental investigations in Eastern Siberia (Russia). *16th Int. Multidisciplinary Sc. GeoConf. SGEM*. Vol. 2. Iss. 4. P. 601–606. <https://doi.org/10.5593/SGEM2016/B42/S19.077>
- Frolova L.A., Ibragimova A.G., Ulrich M. et al. (2017). Reconstruction of the History of a Thermokarst Lake in the Mid-Holocene Based on an Analysis of Subfossil Cladocera (Siberia, Central Yakutia). *Contemp. Probl. Ecol.* 2017. Vol. 10. Iss. 4. P. 423–430. <https://doi.org/10.1134/S1995425517040023>
- Frolova L.A., Nazarova L.B., Pestryakova L.A. et al. (2013). Analysis of the Effects of Climate-Dependent Factors on the Formation of Zooplankton Communities that Inhabit Arctic Lakes in the Anabar River Basin. *Contemp. Probl. Ecol.* Vol. 6. Iss. 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.1134/S199542551301006X>
- Frolova L., Nigmatullin N., Frolova A. (2018). Paleolimnological studies of tundra lakes in the Pechora delta (Nenets Autonomous Region, Russia). *18th Int. Multidisciplinary Sc. GeoConf. SGEM*. Vol. 18. Iss. 5/1. P. 621–627. <https://doi.org/10.5593/sgem2018/5.1/S20.080>
- Frolova L.A., Nigmatullin N.M. (2019). First record of Phreatolona protzi (hartwig, 1900) (Branchiopoda: Anomopoda) in a tundra lake in North-East European Russia. *19th Int. Multidisciplinary Sc. GeoConf. SGEM*. Vol. 19. Iss. 5.1. P. 285–290. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/5.1/S20.036>
- Frolova L.A., Ibragimova A.G. (2015). Cladocera remains from sediments of Kilometrovoe and Kotovo lakes, Kharbey system (Bolshezemelskaya tundra). *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN*. Iss. 5. P. 5–17. (in Russ.). <https://doi.org/10.17076/lim34>
- Frolova L.A., Ibragimova A.G., Subetto D.A. et al. (2018). Paleoeological and Paleoclimatic Reconstructions for the Karelian Isthmus Based on the Study of Subfossil Cladocera from Lake Medvedevskoe (Northwest Russia). *Uch. Zap. Kazanskogo un-ta. Ser. estestvennye nauki*. Vol. 160. Iss. 1. P. 93–110. (in Russ.)
- Ibragimova A.G. (2020). Tafotsenozy Cladocera (Branchiopoda, Crustacea) glyatsiogenykh ozer evropeiskoi chasti Rossii (Taphocenoses of Cladocera (Branchiopoda, Crustacea) glaciogenic lakes of the European part of Russia). PhD thesis. Kazan: KFU (Publ.). 206 p. (in Russ.)
- Klimenko V.V., Klimanov V.A., Sirin A.A. et al. (2001). Climate change in the west of the European part of Russia in the Late Holocene. *Dokl. Earth Sci.* Iss. 377. P. 190–194.
- Kokovkin A.V. (2016). Pechora River. *Izvestiya Komi otdeleniya RGO. Vol. 1. Mat-ly Kompleksnoi Pechorskoj ekspeditsii*. Syktyvkar: Geoprint (Publ.). P. 7–8. (in Russ.)
- Korhola A., Rautio M. (2001). Cladocera and other branchiopod crustaceans. *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Developments in Paleoenvironmental Research*. Vol. 4. P. 125–165. https://doi.org/10.1007/0-306-47671-1_2
- Korosi J.B., Kurek J., Smol J.P. (2013). A review on utilizing *Bosmina* size structure archived in lake sediments to infer historic shifts in predation regimes. *J. Plankton Res.* Vol. 35. Iss. 2. P. 1–17. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbt007>
- Korovchinsky N.M., Kotov A.A., Sinev A.Yu. et al. (2021). Vetvistousye rakoobraznye (Crustacea: Cladocera) Severnoi Evrazii (Cladocera (Crustacea: Cladocera) Northern Eurasia). Vol. I–II. Moscow: Partnership of scientific publications KMK (Publ.). 544 p. (in Russ.)
- Kotov A. A., Sinev A. Ju., Glagolev S. M. et al. (2010). Vetvistousye rakoobraznye (Cladocera). Opredelitel' zooplanktona i zoobentosa presnykh vod Evropeiskoi Rossii (Cladocera in Identification Key of zooplankton and zoobenthos of European Russia freshwater, issuel, Zooplankton). Moscow: Partnership of scientific publications KMK (Publ.). P. 151–276. (in Russ.)
- Lavrinenko I.A. (2018). Map of technogenic disturbance of Nenets Autonomous District. *Sov. Probl. DZZ Kosm.* Vol. 15. Iss. 2. P. 128–136. (in Russ.) [10.21046/2070-7401-2018-15-2-128-136](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-128-136)
- Luoto T.P., Nevalainen L., Sarmaja-Korjonen K. (2008). Multiproxy evidence for the 'Little Ice Age' from Lake Hamptask, Southern Finland. *J. Paleolimnol.* Vol. 40. Iss. 4. P. 1097–1113. <https://doi.org/10.1007/s10933-008-9216-4>
- Lyubarsky E.L. (1974). To the methodology of express qualification and comparison of descriptions of phytocenoses. *Kolichestvennye metody analiza rastitel'nosti*. Ufa: BFAN USSR (Publ.). P. 39–42. (In Russ.)
- Manuilova E.F. (1964). Vetvistousye rachki (Cladocera) fauny SSSR (Cladocera of the fauna of the USSR). Moscow-Leningrad: Nauka (Publ.). 328 p. (in Russ.)
- Mineev O.Yu., Mineev Yu.N. (2002). Birds of the Pechora River delta. *Russkii ornitologicheskii zhurnal. Ekspress-vypusk*. Vol. 11. Iss. 183. P. 373–381. (in Russ.)
- Nazarova L.B., Self A.E., Brooks S.J. et al. (2017). Chironomid Fauna of the Lakes from the Pechora River Basin (East of European part of Russian Arctic): Ecology and Reconstruction of Recent Ecological Changes in the Region. *Contemp. Probl. Ecol.* Vol. 10. Iss. 4. P. 350–362. <https://doi.org/10.1134/S1995425517040059>
- Nevalainen L., Luoto T.P., Kultti S. et al. (2011). Do subfossil Cladocera and chydorid ephippia disentangle Holocene climate trends? *The Holocene*. Vol. 22. Iss. 3. P. 291–299. <https://doi.org/10.1177/0959683611423691>
- Nevalainen L., Rantala M.V., Luoto T.P. (2015). Sedimentary cladoceran assemblages and their functional attributes record late Holocene climate variability in southern Finland. *J. Paleolimnol.* Vol. 54. Iss. 2. P. 239–252. <https://doi.org/10.1007/s10933-015-9849-z>
- Nigmatzyanova G.R., Frolova L.A., Abramova E.N. (2016). Zooplankton spatial distribution in thermokarst lake of The Lena River Delta (Republic of Sakha (Yakutia)). *Res. J. Pharm., Biol. Chem. Sci.* Vol. 7. Iss. 5. P. 1288–1297.
- Nigmatzyanova G., Frolova L., Kosareva L. (2018). Paleontological analysis of bottom sediments of lake rubskoe

- (Ivanovo region, Russia). *Int. Multidisciplinary Sci. GeoConf. Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. Vol. 18. Iss. 5.1. P. 629–636. <https://doi.org/0.5593/sgem2018/5.1/S20.081>
- Nigamatzyanova G.R., Frolova L.A., Nigmatullin N.M. et al. (2020). Vegetation and climate changes in the north-east European Russia (Nenets Autonomous Okrug, Russia). *20th Int. Multidisciplinary Sci. GeoConf. SGEM. M*. Vol. 20. Iss. 4.1. P. 547–552. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/4.1/s19.068>
- Nigmatullin N., Frolova L., Gareev B. (2020). Subfossil Cladoceran from the Bottom Sediments of Lake Lebedinoe (Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Russia). *Kazan Golovkinsky "Young Scientists" Stratigraphic Meeting*. P. 143–147.
- Nigmatullin N., Frolova L., Nigamatzyanova G. et al. (2020). A study of zooplankton in tundra lakes of the pechora river delta (North-Eastern European Russia). *20th Int. Multidisciplinary Sci. GeoConf. SGEM*. Vol. 20. Iss. 4.1. P. 289–296. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/4.1/s19.036>
- Nigmatullin N.M., Frolova L.A. (2019). Zooplankton community structure and environmental conditions of tundra lakes in the Pechora River delta (Northern Russia). *19th Int. Multidisciplinary Sci. GeoConf. SGEM*. Vol. 19. Iss. 5.1. P. 817–824.
- Nikonova A.N. (2016). Transformatsiya ekosistem del'ty Pechory v zone vliyaniya Kumzhinskogo gazokondensatnogo mestorozhdeniya (Nenetskiy Avtonomnyi Okrug) (Transformation of Floodplain Ecosystems in the Pechora Delta within the Kumzhinsk Gas Condensate Field (Nenets Autonomous Okrug)). PhD thesis. Moscow: Institute of Geography of RAS (Publ.). 29 p. (in Russ.)
- Nikonova A.N. (2015). Transformation of Floodplain Ecosystems in the Pechora Delta within the Kumzhinsk Gas Condensate Field (Nenets Autonomous Okrug). *Izvestiya RAN. Ser. Geograficheskaya*. No. 5. P. 117–129. (in Russ.). <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2015-5-117-129>
- Orlova Yu.S. (2013). Using of diversity indexes to analysis of algoflora of Alatyr river basin. *Vest. Mordovskogo universiteta*. Iss. 3–4. P. 53–57. (in Russ.)
- Pantle F., Buck H. (1955). Die biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse. *Gas-Wasserfach*. Vol. 96. Iss. 18. P. 604–620.
- Preis Yu.I., Simonova G.V., Slogoda E.A. (2016). Detailed stratigraphy and dynamics of Central Yamal Khasyrey during the late Holocene. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. Vol. 327. Iss. 10. P. 35–49.
- Rautio M. (2007). Cladocera S.A. Elias (ed.). *Encyclopedia of Quat. Sci*. Elsevier (Publ.). P. 463–472.
- Rautio M., Dufresne F., Laurion I. et al. (2011). Shallow Freshwater Ecosystems of the Circumpolar Arctic. *Eco-science*. Vol. 18. Iss. 3. P. 204–222. <https://doi.org/10.2980/18-3-3463>
- Reimer P., Bard E., Bayliss A. et al. (2013). IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves, 0–50000 years cal BP. *Radiocarbon*. Vol. 55. Iss.4. P. 1869–1887. https://doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16947
- Salonen J.S., Seppä H., Väliranta M. et al. (2011). The Holocene thermal maximum and late-Holocene cooling in the tundra of NE European Russia. *Quat. Res*. Vol. 75. Iss 3. P. 501–511. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2011.01.007>
- Sarmaja-Korjonen K. (2001). Correlation of fluctuations in cladoceran planktonic: littoral ratio between three cores from a small lake in southern Finland: Holocene water-level changes. *The Holocene*. Vol. 11. Iss. 1. P. 53–63. <https://doi.org/10.1191/0959683016770713>
- Sarmaja-Korjonen K., Hakojärvi M., Korhola A. (2000). Subfossil remains of an unknown chydorid (Anomopoda: Chydoridae) from Finland. *Hydrobiologia*. Vol. 436. Iss. 1–3. P. 165–169. <https://doi.org/10.1023/A:1026502219867>
- Sarmaja-Korjonen K., Kultti S., Solovieva N. et al. (2003). Mid-Holocene palaeoclimatic and palaeohydrological conditions in northeastern European Russia: a multiproxy study of Lake Vankavad. *J. Paleolimnology*. 2003. Vol. 30. P. 415–426.
- Semenov V.F. (2016). The study of the geomorphology of the Pechora River valley and adjacent territories. *Izvestiya Komi otdeleniya RGO. Mat-ly Kompleksnoi Pechorskoj ekspeditsii*. Syktyvkar: Geoprint (Publ.). Vol. 1. P. 9–25. (in Russ.)
- Shannon C.E., Weaver W. (1963). The mathematical theory of communication. Illinois press (Publ.). 117 p.
- Sinev A.Yu. (2002). A key to identifying cladocerans of the genus Alona (Anomopoda, Chydoridae) from the Russian European part and Siberia. *Zoologicheskii zhurnal*. Vol. 81. Iss. 8. P. 926–939. (in Russ.)
- Smirnov N.N. (1971). Fauna SSSR. Rakoobraznye (Fauna of the USSR. Crustaceans). Leningrad: Nauka (Publ.). Vol. 1. Iss. 2. P. 351. (in Russ.)
- Subetto D.A., Nazarova L.B., Pestryakova L.A. et al. (2017). Paleolimnological Studies in Russian Northern Eurasia: A Review. *Contemp. Probl. Ecol*. Iss. 4. P. 369–380. <https://doi.org/10.1134/S1995425517040102>
- Szeroczyńska K., Sarmaja-Korjonen K. (2007). Atlas of Subfossil Cladocera from Central and Northern Europe. Friends of the Lower Vistula Society. 84 p.
- Valieva E., Frolova L., Nigamatzyanova G. et al. (2020). Diatoms in bottom sediments of the arctic lake in the pechora river delta (Nenets Autonomous Okrug, Russia). *20th Int. Multidisciplinary Sci. GeoConf. SGEM*. Vol. 20. Iss. 4.1. P. 391–398. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/4.1/s19.049>
- Walker M.J.C., Berkelhammer M., Björck S. et al. (2012). Formal subdivision of the Holocene Series/Epoch: a Discussion Paper by a Working Group of INTIMATE (Integration of ice-core, marine and terrestrial records) and the Subcommission on Quaternary Stratigraphy (International Commission on Stratigraphy). *Journal of Quat. Sci*. Vol. 27. Iss. 7. P. 649–659. <https://doi.org/10.1002/jqs.2565>
- Zinnatova E., Frolova L., Kulikovskiy M. (2018). Diatom complexes in the bottom sediments of rubskoe lake (The east european plain, Russia). *Int. Multidisciplinary Sci. GeoConf. Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. Vol. 18. Iss. 5.1. P. 275–282. <https://doi.org/10.5593/sgem2018/5.1/S20.036>