

УДК 551.8.574:556.55(571.511)

КЛАДОЦЕРНЫЕ ПАЛЕОСООБЩЕСТВА И ИЗМЕНЕНИЯ БИОРАЗНООБРАЗИЯ ОЗЕРА НА ЮГЕ ТАЙМЫРА (СЕВЕР ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИБИРИ) ЗА ПОСЛЕДНИЕ 7100 ЛЕТ[#]

© 2025 г. Л. А. Фролова^{1, *}, Н. М. Нигматуллин², Я. Т. Шнейдман³, Н. А. Рудая^{1, 4}, У. Херцшу^{5, 6}

¹Институт археологии и этнографии СО РАН, Новосибирск, Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

³Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

⁴Институт географии РАН, Москва, Россия

⁵Потсдамский Университет, Потсдам, Германия

⁶Институт полярных и морских исследований имени Альфреда Вегенера, Потсдам, Германия

* E-mail: larissa.frolova@kpfu.ru

Поступила в редакцию 31.03.2025 г.

После доработки 24.06.2025 г.

Принята к публикации 10.07.2025 г.

Исследована история развития клadoцерного сообщества и изменений его биоразнообразия для небольшого тундрового озера на границе распространения леса в южной части п-ова Таймыр на основе изучения колонки донных отложений длиной 131.5 см. В составе клadoцерных сообществ отмечены 24 таксона ветвистоусых ракообразных, три таксона — впервые для региона. Наиболее существенные изменения в составе клadoцерных сообществ происходили около 7100 кал. л. н., 6550 кал. л. н., 2300—2000 кал. л. н., 850 кал. л. н. На начальной стадии формирования водоема около 7100 кал. л. н. реконструированы нестабильные условия, что отражается в наибольших изменениях величин альфа- и бета-разнообразия. Первые 400 лет в составе клadoцерного сообщества высока доля ассоциированных с хорошо развитой прибрежной растительностью и обитающих в богатом детрите мелководье заболоченных участков литоральных таксонов. По данным клadoцерного анализа на ранних этапах формирования озера реконструированы условия небольшого водоема с незначительной глубиной на пониженном заболоченном участке суши. Около 6550 кал. л. н. существенные изменения в составе клadoцерных сообществ выразились в увеличении значения пелагических таксонов, что отражают процессы увеличения глубины водоема. Далее, по данным клadoцерного анализа, уровень воды не испытывал существенных изменений и оставался стабильно высоким до 5300 кал. л. н. В течение последних 2500 отмечены флюктуации глубины озера, 2300—2000 кал. л. н. реконструированы ухудшения климатических условий, когда в составе сообществ увеличилось значение пионерных холодноводных таксонов, отмечен редкий таксон с ограниченным арктоальпийским ареалом распространения — *Alona werestchagini*. В период 850—600 кал. л. н. выявлены кратковременное увеличение доли литоральных таксонов, снижение значений индексов Хилла как показатель снижения альфа разнообразия, при этом максимального значения в сообществе достигает *Chydorus* cf. *sphaericus*. Результаты клadoцерного анализа дополняют реконструкции палеоэкологических и палеоклиматических условий прошлого на основе био-геопрокси и хорошо соотносятся с основными региональными палеоклиматическими изменениями.

Ключевые слова: Арктика; Сибирь; Таймыр; Хатанга; Cladoscaga; термокарстовое озеро; голоцен; реконструкция

DOI: 10.7868/S2949179725040097

[#] Ссылка для цитирования: Фролова Л. А., Нигматуллин Н. М., Шнейдман Я. Т., Рудая Н. А., Херцшу У. (2025) Кладocerные палеосообщества и изменения биоразнообразия озера на юге Таймыра (север Центральной Сибири) за последние 7100 лет. *Геоморфология и палеогеография*. Т. 56. № 4. С. 713—731. <https://doi.org/10.7868/S2949179725040097>

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия изучению динамики климата и связанных с ней изменений экологических параметров окружающей среды уделяется повышенное внимание в свете наблюдаемых глобальных климатических изменений, в первую очередь в высокоширотных регионах. Климатические изменения, обусловленные глобальным потеплением, проявляются наиболее ярко в Арктике и Субарктике (Arctic Amplification) (IPCC, 2019). За последние два десятилетия приповерхностная температура воздуха в Арктике выросла более чем в два раза по сравнению со среднемировыми значениями (Notz, Stroeve, 2016; IPCC, 2019). Исследование вековой динамики экосистем дает возможность выявить основные тренды естественных и антропогенных изменений окружающей среды, а также использовать их в пространственно-временных реконструкциях для прогноза реакции экосистем на изменения климата в будущем. Один из важнейших инструментов реконструкции условий прошлого — палеолимнологические исследования донных отложений озер (Subetto et al., 2017). Поскольку озера являются уникальным природным архивом и содержат информацию об изменениях растительности, климата и окружающей среды, их изучению в приполярных областях Северной Европы посвящено значительное количество работ. Однако палеореконструкций о климатических изменениях позднеледникового и голоцена, основанных на палеолимнологических исследованиях, для территории Полярного Урала и севера Сибири, в силу их труднодоступности значительно меньше (Палеоклимат..., 2019, Новенко и др., 2022). Исследования палеоэкологических и палеоклиматических условий прошлого на основе анализа донных отложений озер, включая реконструкции ландшафтов, гидрологических и гидрохимических условий водоемов, а также биоты и биоразнообразия территорий севера Сибири в плейстоцене и голоцене наиболее активно проводились в дельте р. Лены (Andreev, Klimanov, 2000; Andreev et al., 2004; Biskaborn et al., 2013, 2016; Herzschuh et al., 2013; Klemm et al., 2013; Frolova, Nigmatzyanova, 2019), на Таймыре (Большаинов и др., 2013; Andreev et al., 2002; Klemm et al., 2016; Syrykh et al., 2017), в Центральной Якутии (Pestryakova et al., 2012; Ulrich et al., 2017; Glückler et al., 2022; Biskaborn et al., 2019, Frolova, Frolova, 2017; Baisheva et al., 2023) и в северо-восточной Сибири (Swann et al., 2010; Frolova et al., 2014; Frolova 2016; Andreev et al., 2022; Biskaborn et al., 2023) и др.

К числу наиболее широко применяемых биологических индикаторов, используемых для реконструкции долговременной динамики развития

водоема и биоразнообразия пресноводных сообществ, относится группа Cladocera (Branchiopoda: Crustacea). Ветвистоусые ракообразные многочисленны в пресноводных водоемах различных типов — озера, пруды, водохранилища, лужи, водотоки — и выполняют значимую роль в потоках вещества и энергии в пресноводных экосистемах. Кладоцеры широко распространены в географическом плане, населяют в том числе высокогорные и высокоширотные водоемы (Flössner, 2000; Szeroczyńska, Sarmaja-Korjonen, 2007). Экологические предпочтения этой таксономической группы достаточно хорошо изучены (Коровчинский и др., 2021; Flössner, 2000; Bledzki, Rybak, 2016), что делает их хорошими индикаторами при реконструкциях палеоэкологических условий озер, включая такие показатели, как трофический статус водоемов, колебания уровня воды, pH и прессинг хищников (Hofmann, 2000; Davidson et al., 2010; Frolova et al., 2014). Соотношение остатков планктонных и прибрежных таксонов кладоцер может быть использовано в качестве индикатора изменения уровня воды в озере (Korhola, Rautio, 2001; Nigmatullin et al., 2023), но при интерпретации необходимо учитывать многофакторность действия других абиотических факторов, которые влияют на смещение соотношений (Sarmaja-Korjonen, 2001; Nevalainen et al., 2008).

Использование Cladocera в палеолимнологических исследованиях предоставляет значимую информацию о долгосрочных изменениях экосистем пресноводных водоемов, позволяя не только реконструировать климатические и экологические условия прошлого, но и прогнозировать возможные тенденции в изменении водных экосистем и их биоразнообразия в будущем.

Реконструкции условий прошлого с использованием Cladocera широко и успешно применяются в Европе (Hofmann, 2000; Davidson et al., 2010; Luoto et al., 2008; Nevalainen et al., 2011, 2015; Zawiska et al., 2015 и др.), в России работы по выполнению палеоклиматических реконструкций по рецентным и субфоссильным остаткам ветвистоусых ракообразных начаты не так давно, но число таких исследований растет в последнее время в геометрической прогрессии (Смирнов, 2010; Фролова, Ибрагимова, 2015; Фролова и др., 2018; Frolova, 2016; Frolova et al. 2013, 2014, 2017; Lenz et al., 2020; Nazarova et al., 2021; Nigmatullin et al., 2019, 2020, 2023; Rogozin et al., 2025). Тем не менее, работ по изучению субфоссильных Cladocera в донных отложениях озер Севера Сибири по-прежнему не так много, что связано с труднодоступностью региона и недостаточной таксономической изученностью группы (Frolova et al., 2014). Для п-ова Таймыр ра-

нее палеоэкологические и палеоклиматические реконструкции с применением субфоссильных *Cladocera* не проводились; это первая подобная работа для данного региона.

В рамках многолетних совместных российско-немецких исследований в арктической и субарктической зонах Сибири, на северной границе распространения леса (treeline), был выполнен комплексный анализ морфологических, гидрологических, гидрохимических, гидробиологических и палеоэкологических особенностей озер (Subetto et al., 2017). С целью комплексного исследования и реконструкции климатических параметров голоцена изучаемой территории были отобраны поверхностные донные отложения и керны донных отложений, выполнено радиоизотопное датирование, литостратиграфический, гранулометрический, геохимический, споро-пыльцевой анализы (Klemm et al., 2016), а также хирономидный анализ (Syrykh et al., 2017).

Целью работы была реконструкция изменения палеоэкологических и палеоклиматических условий за последние 7100 лет в южной части п-ова Таймыр, в бассейне р. Хатанга, на основе анализа субфоссильных *Cladocera* в донных отложениях озера с условным названием 11-СН-12, а также сравнение наших результатов с ранее полученными реконструкциями на основе других прокси (Klemm et al., 2016; Syrykh et al., 2017).

2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Полевые работы проводились в рамках совместной российско-германской экспедиции на юге п-ова Таймыр в августе 2011 г. Отбор колонки донных отложений проб производился в центральной части небольшого безымянного озера с условным названием 11-СН-12 на максимальной глубине 14.3 м (рис. 1). Озеро для проведения исследований и отбора колонки донных отложений должно было соответствовать ряду параметров, а именно — обладать простой морфометрией, достаточной глубиной (более 2 м, во избежание разрушающего промерзания донных отложений) и не иметь непосредственного влияния речной сети. КERN 11-СН-12А (72°23'55.9" с. ш., 102°17'19.5" в. д., 60 м над у. м.) длиной 131.5 см был отобран с помощью гравитационного керноотборника UWITEC с ударным механизмом (диаметр трубы 6 см). КERN хранился в прохладном и темном месте до транспортировки в лабораторию Института им. Альфреда Вегенера (AWI, Потсдам, Германия), где был нарезан с шагом в 1 см для дальнейших видов анализа. В ходе отбора образцов определялись основные гидрологические, физические показатели водоема (географические координаты, высота озера над у. м.

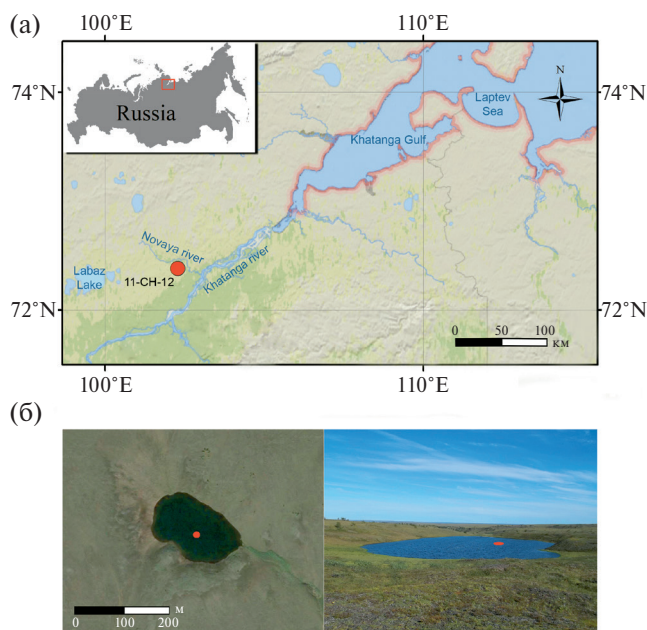


Рис. 1. Карта региона исследований: (а) — расположение озера 11-СН-12; (б) — озеро 11-СН-12, обозначена точка отбора колонки донных отложений. Карта создана с использованием источников: National Geographic World Map (doc.arcgis.com), Google Earth; фото озера — Р. М. Городничев.

Fig. 1. Location of the study region: (a) — map showing the location of Lake 11-CH-12; (b) — lake 11-CH-12, with the coring site marked. The map was created using the sources: National Geographic World Map (doc.arcgis.com), Google Earth; photo of the Lake — R. M. Gorodnichev.

с помощью GPS навигатора, максимальные глубина водоема и глубина в точке проведения отбора проб, прозрачность по диску Секки; температура воды) и гидрохимические показатели воды. Удельная электропроводность, рН, содержание растворенного кислорода, окислительно-восстановительный потенциал оценивались с использованием мультипараметрового анализатора Multi 340 WTW в гидрохимической лаборатории Института им. Альфреда Вегенера.

Абсолютное датирование колонки донных отложений 11-СН-12А выполнено на основе радиоизотопного датирования, которое является широко используемым методом для точного определения возраста озерных отложений и получения информации об изменениях скорости осадконакопления со временем. Для датирования верхней части колонки отложений исследуемого озера было определено содержание изотопов ^{210}Pb и ^{137}Cs в 13 образцах верхних 10 см отложений озера в Центре исследований радиоактивности окружающей среды (Ливерпульский университет, Великобритания)

(Appleby et al., 1991; Tracking..., 2001). Радиоуглеродное датирование 15 образцов донных отложений и органических растительных остатков было выполнено в Познаньской радиоуглеродной лаборатории (Познань, Польша). Интегральная возрастная модель построена в среде программирования R, версия 3.02, специализированный пакет Bacon (Blaauw, Christen, 2011; R Core Team, 2013). Расчет календарного возраста выполнен с использованием калибровочной кривой IntCal13 (Reimer et al., 2013).

Термохимическую пробоподготовку образцов донных отложений для кладоцерного анализа проводили по общепризнанным методикам (Frey, 1986; Korhola, Rautio, 2001). Предварительно высушенную в сублимационной сушике навеску донных отложений массой 1–2 г растворяли в 10% растворе КОН. Раствор нагревали при 75°C в течение 30 мин, полученную суспензию фильтровали через сито с ячейей 50 мкм. Субфоссильные остатки Cladocera окрашивали сафранином и фиксировали 96% этиловым спиртом. Подготовленные препараты анализировали под световым микроскопом Axio Lab.A1 Carl Zeiss при 100–400-кратном увеличении. Обнаруженные в образце остатки ветвистоусых ракообразных (головные щиты, карапаксы, постабдомены, постабдоменальные коготки, эфиппии и др.) идентифицировали до морфы, вида или рода. За количество экземпляров принимали максимальное число встреченных фрагментов одного таксона (Szeroczynska, Sarmaja-Korjonen, 2007; Frolova, 2018). В среднем на один образец было идентифицировано 175 ± 25 особей Cladocera (max=502 экз.) Идентификация остатков кладоцера осуществлялась с использованием специализированных определительных ключей, как современных, так и субфоссильных Cladocera (Мануйлова, 1964; Смирнов, 1971; Синев, 2002; Котов и др., 2010; Коровчинский и др., 2021; Flössner, 2000; Szeroczynska, Sarmaja-Korjonen, 2007; Bledzki, Rybak, 2016), а также по публикациям по отдельным таксонам (Nykänen et al., 2007; Bjerring et al., 2008; Van Damme et al., 2009, 2011, 2019).

Изменение биоразнообразия в кладоцерных палеосообществах во временном аспекте оценено в отношении трендов альфа- и бета-разнообразия (Рудая, 2021; Hill, 1973; Chao et al., 2014). Альфа-разнообразие выборок данных оценивалось с использованием индексов Хилла (Hill, 1973), вычисляли значение видового богатства (N_0), число типичных, фоновых таксонов (N_1), количество доминирующих таксонов в кладоцерных палеосообществах (N_2) (Hill, 1973; Chao et al., 2014). При оценке трендов альфа-разнообразия наряду с видовым богатством учитывали вырав-

ненность (Gadagkar, 1989). Вычисление индексов альфа-разнообразия выполнено в пакете iNEXT (version 2.0.5) на языке программирования R (The R Project..., 2018).

Бета-разнообразие рассчитано с использованием детрендированного канонического анализа соответствий (detrended canonical correspondence analysis, DCCA) в программе CANOCO 4.5 (ter Braak, Prentice, 1988; Braak, Šmilauer, 2002; Birks, 2007,). Бета-разнообразие оценивалось в величинах стандартных отклонений (standard deviation, SD) (Birks, 2007). Изменения средневзвешенных баллов по выборке (WA, weighted average sample scores) отражают изменения композиционного состава в единицах стандартного отклонения (SD) вдоль временного градиента (Marquer et al., 2014; Felde et al., 2020;). Величины близкие к 4 SD указывают на полную смену таксономического состава сообщества, значения около 0 SD отражают отсутствие или незначительные изменения в видовом составе (Рудая, 2021; Legendre, Legendre, 2012).

Построение стратиграфической диаграммы выполнено в программе Tilia 2.6.1, выделение локальных фаунистических зон в колонке донных отложений проводилось с использованием кластерного анализа пакета CONISS в программе TiliaGraph (Grimm, 1987, 1991, 2004).

3. РЕГИОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследований расположен за полярным кругом, в дельте р. Хатанга на территории востока Северо-Сибирской низменности в южной части п-ова Таймыр, в пределах Таймырского Долгано-Ненецкого муниципального района (Красноярский край, Россия). Исследуемое озеро находится между горами Бырранга и Средне-Сибирским плоскогорьем в водосборном бассейне р. Новая, которая является главным левым притоком р. Хатанги в ее нижнем течении (рис. 1) (Ары-Мас..., 1978). Южно-Таймырский бассейн состоит преимущественно из складчатых карбонатных отложений ордовика каменноугольного возраста, перекрытых мелководно-морскими и дельтовыми осадочными породами позднего карбона и триаса (Inger et al. 1999). Водосборный бассейн изучаемого озера подстилается толщей терригенных и вулканических отложений, богатых смектитами, привнесенными сюда в результате размыва горных массивов зоны развития траппового магматизма (Геологическая карта... 2008, 2016; Wahsner et al., 1999; Vernikovskiy et al., 2013; Klemm et al., 2016). Вышележащие четвертичные перигляциальные и озерно-аллювиальные отложения имеют преимущественно пutorанское базальтовое происхождение (Peregovich et al., 1999, Klemm et al., 2016).

В период последнего ледникового максимума (LGM) территория не подвергалась сплошному оледенению (Andreev et al., 2002; Svendsen et al., 2004; Ehlers, Gibbard, 2007). Оледенение в позднем плейстоцене и в голоцене в центральной части Северо-Сибирской низменности ограничивалось локальными горно-долинными участками и значительными высотами (Белорусова, Украинцева, 1980; Svendsen et al., 2004). Таким образом, этот регион на протяжении относительно длительного времени являлся рефугиумом для сохранения реликтовых видов растений и животных в период экстремальных климатических условий окружающей среды Таймыра.

Район р. Новой находится в зоне сплошных многолетних мерзлотных пород мощностью 400–600 м (Геокриологическая... 1991; Романовский 1993). Развита различные криогенные формы рельефа – бугры пучения, морозобойные трещины, полигональные грунты, термокарстовые депрессии, солифлюкция и т.д. (Derevyagin et al., 1997; Möller et al., 1999). Глубина протаивания (активный слой) в вегетационный сезон в тундре составляет 10–20 см, на южных склонах пологих холмов она может достигать 50–70 см (Ары-Мас..., 1978).

В геоморфологическом отношении Хатангская впадина представляет собой пологую и грядово-холмистую ступенчатую равнину с абс. отметками высот до 225 м (Ары-Мас..., 1978). На плоских междуречьях на разных высотах многочисленны небольшие озера преимущественно термокарстового генезиса (Ары-Мас..., 1978; Kienel, Siegert, 1999).

Территория исследования в бассейне р. Новая характеризуется континентальным субарктическим климатом. По данным наблюдений ближайшей метеорологической станции в пос. Хатанга (71.983° с. ш., 102.466° в. д., данные с 1934 по 2016 гг.), самым холодным месяцем является февраль со среднемесячной температурой воздуха –31.7°C (средняя температура воздуха января –31.5°C). Период с положительными температурами составляет около 70–75 дней в году (Атлас Арктики, 1985). Абсолютный минимум температуры зафиксирован в январе 1987 г. (–59.0°C), а самая теплая температура января была зафиксирована в 2016 г. (–1.6°C). Температура воздуха в самом теплом месяце, июле, может достигать +36.7°C (1979), а ее среднемесячное значение составляет +12.5°C. Регион характеризуется высокой относительной влажностью воздуха, обычно 78%. Годовое количество осадков составляет около 280 мм. Большая часть осадков выпадает летом, с пиком в июле-августе. Снежный покров держится около 250 дней, а его высота достигает 30–50 см на от-

крытых участках и 60–70 см на защищенных от ветра местах (Ары-Мас..., 1978). Снег появляется в конце сентября и тает на возвышенных участках в первой декаде июня, но часто сохраняется в течение всего лета на северных склонах и в понижениях (Ары-Мас..., 1978).

Исследуемое термокарстовое озеро 11-СН-12 (72°23'55.9" с. ш., 102°17'19.5" в. д.) расположено в замкнутой впадине примерно в 30 км к западу от р. Хатанги. Озеро небольшое, эллипсовидной формы (200×120 м), занимает площадь около 0.024 км², имеет атмосферное питание. Озеро не имеет притоков, но с восточной части озера вытекает небольшой ручей, впадающий в правый приток р. Новой.

Озеро расположено в зоне южной кустарниковой тундры, рядом с северной границей произрастания деревьев. Растительный покров имеет мозаичную структуру, в южной тундре вокруг озера доминируют карликовые кустарники: *Vaccinium vitis-idaea*, *V. uliginosum*, *Dryas punctata*, *Cassiope tetragona*, *Ledum palustre*. В окрестностях озера встречаются *Salix* spp. и *Betula nana*, формирующие ерниковые заросли в восточной части озера, где из него вытекает ручей. Виды *Carex* spp., *Eriophorum vaginatum*, *Arctophila fulva* распространены на более увлажненных участках прибрежной зоны. Изредка встречаются отдельно растущие и небольшие группы деревьев *Larix gmelinii* (2–5 м высотой). Недалеко от озера (8 км к северу) расположен уникальный островной лесной массив Ары-Мас, образованный *L. gmelinii* и признанный одним из самых северных лесных участков в мире (Тюлина, 1937; The physical geography..., 2002).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Гидрохимические исследования показали нейтральную реакцию среды (рН 7.5) и низкую минерализацию воды (удельная электропроводность 34.9 мкСм/см). Прозрачность по диску Секки была высокой, составляя 5.00 м (табл. 1).

Общий возраст колонки донных отложений 11-СН-12А составил 7100 лет. Скорость осадконакопления была относительно стабильна и составила около 0.030 см/г по результатам датирования по ²¹⁰Pb/¹³⁷Cs и приблизительно 0.025 см/г по результатам датирования по ¹⁴C. Более детально результаты изучения хронологии осадконакопления в озере опубликованы ранее (Klemm et al., 2016).

В колонке донных отложений озера 11-СН-12 в общей сложности идентифицировано 4133 экземпляра Cladocera. Таксономический состав кладоцерных палеосообществ включал представителей 24 таксонов (рис. 2) из пяти семейств (Holopedidae, Daphniidae, Bosminidae, Chydoridae и Polyphemidae), большая часть из которых при-

Таблица 1. Основные характеристики озера 11-СН-12 и исследованной колонки донных отложений**Table 1.** Main characteristics of Lake 11-CH-12 and the studied sediment core

Показатель	11-СН-12
Географические координаты, широта	72°23'55.9" с. ш.
Географические координаты, долгота	102°16'50.2" в. д.
Высота над уровнем моря, м	60
Площадь озера, га	2.4
pH	7.5
Удельная электропроводность	34.9
Прозрачность по диску Секки, м	5.0
Максимальная глубина, м	14.3
Глубина в точке отбора керна, м	14.3
Длина керна, см	131.5

надлежала семейству Chydoridae (18 таксонов). Три вида Cladocera ранее не были отмечены в регионе, это — *Camptocercus fennicus* (Stenroos, 1898), *Oxyurella tenuicaudis* (Sars, 1862), *Alona werestschagini* (Sinev, 1999). Из них *C. fennicus* — редкий палеарктический таксон, отмеченный ранее в России на севере Европейской части России и в Центральной Якутии (Коровчинский и др., 2021). Находки *O. tenuicaudis* известны в Западной Сибири, на юге Восточной Сибири, на Дальнем Востоке. *A. werestschagini* — арктомонтанный вид, встречающийся в высокогорных водоемах, ранее отмеченный на Кольском п-ове, в Коми, на о-вах Врангеля и Беринга (Коровчинский и др., 2021).

Из пелагических обитателей наиболее часто встречающимся и многочисленным был таксон *Bosmina (Eubosmina) longispina* (относительная частота встречаемости 87.5%, средняя относительная численность 40.7%). Из литоральных ветвистоусых ракообразных доминировал *Chydorus cf. sphaericus*, единственный из таксонов, отмеченный во всех образцах (100% и 12.8%, соответственно). Частота встречаемости составила >50% также для таксонов *Daphnia longispina* gr., *Coronatella rectangula/Alona guttata* (Sars, 1862), *Acroperus harpae* (Baird, 1834). Видовое богатство характеризовалось невысокими показателями и значительно варьировало (min=3, max=13).

На основе кластерного анализа CONISS в кладоцерной диаграмме колонки донных отложе-

ний озера 11-СН-12 выделено пять статистически значимых зон (рис. 2). CZ I (7100–6650 кал. л. н.) В нижней части зоны 7100–6900 кал. л. н. в кладоцерном палеосообществе в значительных количествах представлены литоральные мелководные таксоны, часто ассоциированные с прибрежной растительностью — *Eurycercus* sp., *Biapertura affinis*, *Alona intermedia*, *Ch. cf. sphaericus* и др. Редкие таксоны *O. tenuicaudis* и *C. fennicus* отмечены только в этот период и после 6900 кал. л. н. в палеосообществе не отмечались. Фитофильные виды *A. harpae*, *C. fennicus* также присутствуют исключительно в нижней части зоны. К верхней части зоны увеличивается значение пелагического таксона *B. (E.) longispina*, который достигает максимума относительной численности в 74% на глубине 121 см (~6650 кал. л. н.). *B. affinis* и *D. longispina* gr. достигают максимума в средней части зоны и начинают снижаться впоследствии. Для данного временного интервала характерна максимальная концентрация остатков Cladocera (71–297 экз./г, m=151 экз./г, табл. 2). Показатели альфа-разнообразия высокие (средние значения N0=9.7; N1=5.0, табл. 2), при этом выравненность сообщества существенно варьирует (E=0.2–0.5). Показатель бета-разнообразия достигает высоких значений (SD=1.1–1.5, рис. 3), отражая существенные изменения таксономического состава палеосообщества.

CZ II (6650–5300 кал. л. н.). В нижней части зоны на глубине 115 см (6450 кал. л. н.) произошли изменения в составе кладоцерных сообществ. Доля пелагического таксона *B. (E.) longispina* значительно снижается с 74% в предыдущей зоне до 25%, в то время как численность *D. longispina* gr. отчетливо увеличивается, и таксон становится доминантным (max=85%). Большинство хидорид — *Eurycercus* sp., *A. intermedia*, *B. affinis*, *C. rectangula/A. guttata*, *Camptocercus rectirostris* и *Ch. cf. sphaericus* — снижают свое присутствие. Пелагические таксоны наиболее многочисленны в CZ II по сравнению с другими зонами и доминируют на протяжении всего временного интервала. Только в данной зоне (5300 кал. л. н.) отмечено несколько находок массовой формы пелагического планктона *Holopedium gibberum*. Концентрация остатков кладоцер относительно высокая (m=142 экз./г, табл. 2). Видовое богатство значительно варьирует (N0=3–9, табл. 2), индексы Хилла низкие (m N1=2.6; N2=2.2, табл. 2). Показатель бета-разнообразия снижается по сравнению с предыдущей зоной, отражая стабилизацию условий (m SD=0.94, рис. 3).

CZ III (5300–2300 кал. л. н.). В пределах зоны отмечена смена доминантов. Значение наиболее многочисленного в предыдущей зоне таксона *D. longispina* gr. резко снижается до минималь-

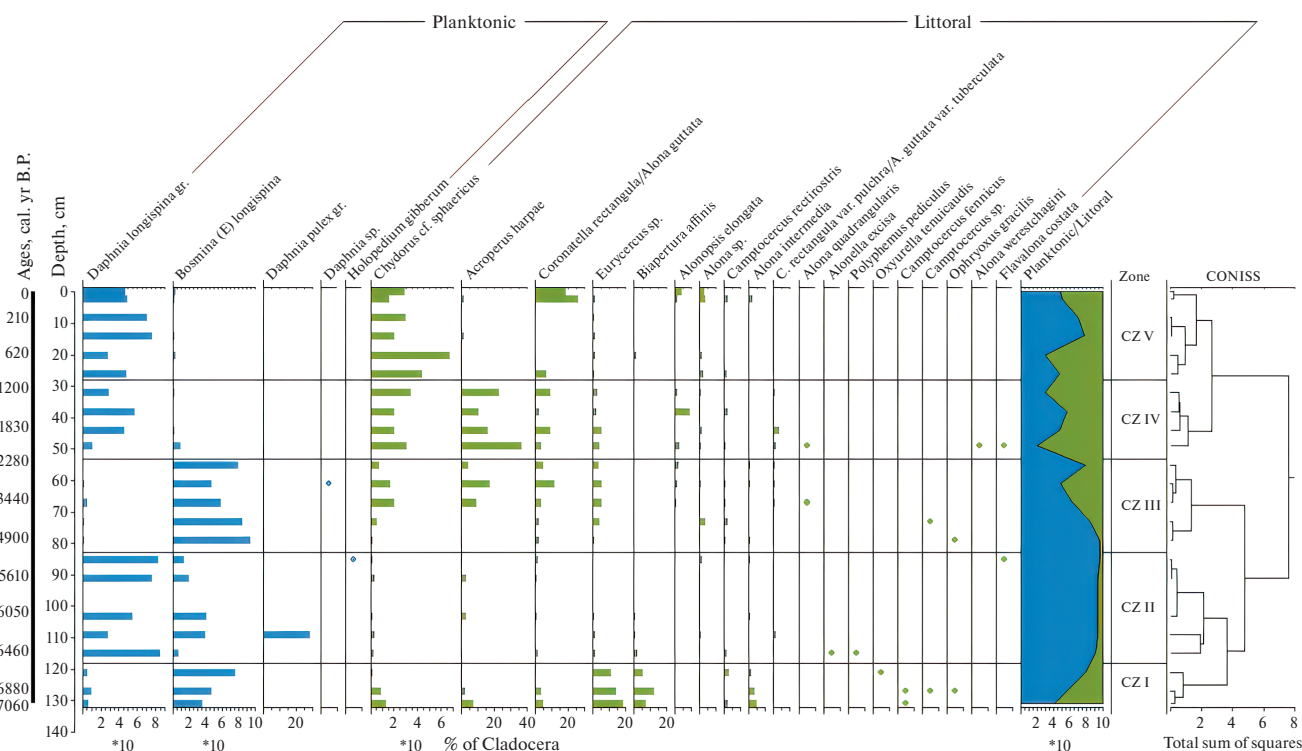


Рис. 2. Распределение таксонов Кладосера в колонке донных отложений озера 11-CH-12 в бассейне р. Хатанга (п-ов Таймыр) (таксоны со средней встречаемостью <0.1% отмечены на диаграмме точкой).

Fig. 2. Distribution of Cladoceran taxa in the bottom sediment core of Lake 11-CH-12 in the Khatanga River basin (Taymyr Peninsula) (taxa with a mean occurrence of <0.1% are marked with a dot in the diagram).

ных значений (2%), в то время как другой планктонный таксон *B. (E.) longispina* увеличивает свое присутствие с 23 до 72%. Доля литорального эврибионтного *Ch. cf. sphaericus* увеличивается до максимума (19%) 3450 кал. л. н. и вновь снижается до 7% в самой верхней части зоны. Другой представитель семейства хидорид, ассоциированный с макрофитами *Eurycercus* sp., присутствует в зоне постоянно в небольших количествах (1–3%). *A. harpae* достигает максимума (17%) 2600 кал. л. н. и вновь снижает свое присутствие в верхнем образце зоны. В средней части зоны впервые появляется литоральный таксон *Alonopsis elongata*. В целом, в верхней части CZ III значения литоральных таксонов хидорид увеличиваются и несколько снижаются только в верхнем образце. Концентрация субфоссильных остатков *Cladocera* снижается ($m=119$ экз./г). Число таксонов в пробах варьирует от 8 до 12 ($m N_0=9.6$, табл. 2). Выравненность сообществ и индекс Хилла N_2 уменьшаются ($m N_2=2.0$; $E=0.2$). Показатель бета-разнообразия несколько снижается ($m SD=0.78$, рис. 3).

CLZ IV (2300–850 кал. л. н.). В нижней части зоны происходят существенные изменения в палеосообществе субфоссильных кладоцер. Доминант-

ный в предыдущей зоне таксон *B. (E.) longispina* снижает свое значение до менее 2% в верхних образцах, синхронно другой планктонный таксон *D. longispina* gr. увеличивает численность до 39–57%. Значение литоральных хидорид *Ch. cf. sphaericus*, *A. harpae*, *C. rectangula/A. guttata*,

A. elongata достоверно возрастает по сравнению с предыдущей зоной. Именно в этой зоне отмечена находка холодноводного арктоальпийского таксона со слабо изученной биологией *A. werestschagini*. Концентрация *Cladocera* в донных отложениях снижается в отдельных образцах до 21 экз./г ($m=43$ экз./г). Число таксонов в отдельных пробах колеблется от 8 до 13 ($m N_0=9.2$, табл. 2), значения других индексов Хилла возрастает ($m N_1=4.2$; $N_2=3.2$, табл. 2), значения бета-разнообразия минимальны для всего периода осадконакопления колонки ($m SD=0.2$).

CZ V (850 кал. л. н. – 2011 г. н. э.). Доминант зоны остается прежним, *D. longispina* gr. В нижней части зоны, в период 850–600 кал. л. н., существенно возрастает значение *Ch. cf. sphaericus* (43–67% от общего количества *Cladocera*). Относительная численность таксона *A. harpae* в данной зоне снижается, численность *B. (E.) longispina*, *Eurycercus* sp.

Таблица 2. Индексы альфа разнообразия и концентрация остатков Cladocera отдельных зон кладоцерного сообщества озера 11-CH-12

Table 2. Alpha diversity indices and concentration calculated based on the composition of the cladoceran community in Lake 11-CH-12

Показатель	Зоны				
	I	II	III	IV	V
N0 taxa	9.7	5.0	3.6	0.4	9.7
N1	6.6	2.6	2.2	0.4	6.6
N2	9.6	2.8	2.0	0.2	9.6
E (Выравненность)	9.2	4.2	3.2	0.4	9.2
Концентрация Cladocera (экз./г)	151.4	142.0	118.9	43.2	30.8

уменьшается, но не столь значительно по сравнению с предыдущей зоной. В верхней половине зоны увеличивается значение литоральных таксонов *C. rectangula*/*A. guttata*. Видовое богатство в зоне минимально и колеблется от 3 до 10 видов (в среднем 6). Средняя концентрация субфоссильных остатков Cladocera в этой зоне составляет 31 экз./г, значение видового богатства снижается синхронно с уменьшением концентрации и индексов Хилла N1/N2 (табл. 2). Величины бета-разнообразия варьируют, сохраняя невысокие значения ($SD_{0.14-0.44}$, $m=0.24$).

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно ранее опубликованным результатам радиоизотопного датирования и литостратиграфического анализа (Klemm et al., 2015), а также нашим результатам, вероятно, исследуемое озеро 11-CH-12 возникло около 7100 кал. л. н. во время заключительной региональной стадии климатического оптимума, имевшей место с 9000 по 6800 кал. л. н. (Andreev et al., 2011).

В кладоцерном палеосообществе в период 7100–6550 кал. л. н. представлены пионерные, эвритопные, высокоадаптивные таксоны, такие как комплекс видов *Ch. cf. sphaericus*, *B. affinis* и таксоны, часто приуроченные к зарослям прибрежной водной растительности (*Eurycercus* sp., *C. fennicus*, *A. intermedia*, *O. tenuicaudis*) (Bledzki, Rybak, 2016). Последние, являющиеся редкими таксонами, могут служить маркерами паллюдификации, например, *A. intermedia* — типичный обитатель кислых слабоминерализованных вод, вид *O. tenuicaudis*

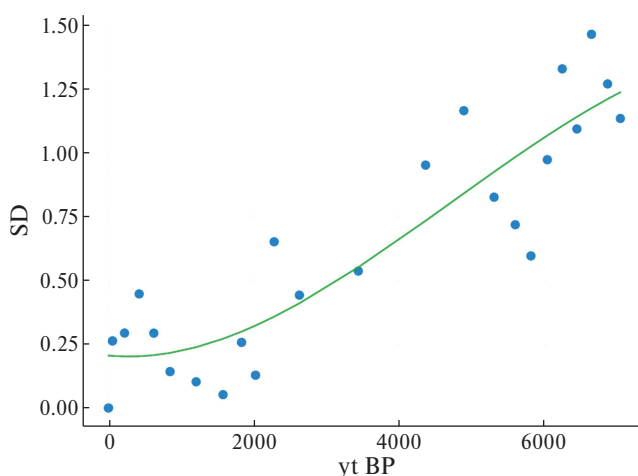


Рис. 3. Бета-разнообразие субфоссильных кладоцерных сообществ Cladocera в колонке донных отложений озера 11-CH-12 в бассейне р. Хатанга (п-ов Таймыр).

Fig. 3. Beta diversity of subfossil cladoceran assemblages in Lake 11-CH-12, Khatanga River basin (Taymyr Peninsula).

характерен для заболоченных участков мелководных пресноводных водоемов или неглубоких болот (Flössner 2000; Bledzki, Rybak, 2016). Сообщество находится на стадии формирования, что отражено в существенных вариациях индексов Хилла и высоких значениях показателя бета-разнообразия ($SD_{1.2-1.5}$, табл. 2, рис. 3). Состав кладоцерных палеосообществ свидетельствует о существовании изначально мелководного водоема с растительной органикой, обширной заросшей мелководной зоной с богатой фауной литоральных хидорид. В споро-пыльцевом спектре в указанный период также фиксируется повышенное содержание пыльцы осоковых и увеличение присутствия типичного обитателя переувлажненных территорий, торфянистых и сфагновых болот — вахты трехлистной (*Menyanthes trifoliata*) (Klemm et al., 2016), отражающее процессы заболачивания. По данным хирономидного анализа отмечается присутствие таксонов *Psectrocladius sordidellus*-type, *Cricotopus intersectus*-type, *Cricotopus cylindraceus*-type, *Cricotopus laricomalis*-type часто ассоциированных с макрофитами и населяющих заболоченные, заросшие участки по берегам водоемов (Syrykh et al., 2017). Условия определяются как нестабильные, что отражается на составе кладоцерного сообщества. При относительно высоком видовом богатстве отмечены низкие значения выравненности и значительные изменения бета-разнообразия (табл. 2, рис. 3). Нестабильность условия в начальный период формирования водоема подтверждает

ся данными литостратиграфического и элементного анализов (Klemm et al., 2016).

Предполагается, что данный период являлся начальной стадией формирования озера. В это время относительно высокие температура воздуха и влажность в сочетании с плохим дренажем могли способствовать формированию небольшой водонаполненной депрессии на переувлажненной или заболоченной территории (Klemm et al., 2016). Для нижней части последовательности отложений озера 11-СН-12 фиксируется активация термокарстовых процессов, которые относятся к комплексу ландшафтных процессов, связанных с таянием богатых льдом многолетнемерзлых пород, и ведут к локальным преобразованиям рельефа (Kokelj, Jorgenson, 2013). Известно, что термокарстовые процессы более активны в периоды потепления, и, соответственно, сильная термокарстовая активность отмечалась для Сибири в раннем и среднем голоцене (Romanovskii et al., 2004; Grosse et al., 2006).

Около 6650 кал. л. н. в составе кладоцерных сообществ происходят существенные изменения, которые наиболее четко проявляются в увеличении значения планктонных таксонов *B. (E.) longispina* и *D. longispina* gr., а также в уменьшении предпочитающих мелководные местообитания литорально-бентосных таксонов (*Ch. cf. sphaericus*) и видов, преимущественно ассоциированных с растительностью (*A. intermedia*, *B. affinis*) (Nevalainen 2011; Bledzki, Rybak, 2016). Как известно, состав субфоссильных сообществ Cladocera частично регулируется глубиной водоема, поскольку развитие и степень представленности отдельных таксономических групп зависят от их приуроченности к пелагическим или литоральным местообитаниям и от относительных размеров этих местообитаний (Korhola, Rautio, 2001; Frolova et al., 2014). Предполагаем, что изменения в сообществе ископаемых Cladocera отражают процессы увеличения площадей открытых глубоководных участков по отношению к мелководным литоральным зонам, т. е. продолжается процесс увеличения глубины водоема. Седиментологические данные, в частности соотношение C/N, подтверждают продолжающиеся процессы формирования рельефа и углубления водоема (Klemm et al., 2016). По данным хирономидного анализа также регистрируется процесс увеличения глубины водоема в этот период (Syrykh et al., 2017). В дальнейшем, примерно до 5300 кал. л. н., соотношение планктонных и литоральных таксонов Cladocera оставалось неизменно высоким (рис. 2), предположительно, уровень воды озера был стабильно высоким и не испытывал значительных колебаний. В составе кладоцерного сообщества доминируют холодноводные планктонные таксоны *D. longispina* gr., *B. (E.) longispina*, составляя

до 82% от общей численности Cladocera. В зоне отмечены находки пелагического *H. gibberum* — плохо сохраняющегося и потому редко представленного в отложениях таксона, населяющего водоемы с низкой минерализацией и с низким содержанием кальция (обычно не более 25 мг/л) и фосфора (Коровчинский и др., 2021), еще раз подтверждая высокую степень представленности пелагических, глубоководных таксонов, связанных со значительными глубинами и открытыми участками воды. Индексы альфа-разнообразия существенно выше, чем до 6550 кал. л. н. (табл. 2), что информирует о том, что таксономический состав водоема сформировался и не претерпевает существенных изменений. Величины показателя бета-разнообразия в среднем не превышали 1, отражая незначительные изменения в таксономическом составе палеосообщества.

После 5300 кал. л. н. происходит смена доминирующих таксонов: *D. longispina* gr. замещается *B. (E.) longispina* также планктонным, но более мелким по размерам таксоном. Возможно, это связано с прессингом планктоноядных рыб, которые охотнее выедают крупноразмерный зоопланктон. В течение последних 3500 лет соотношение пелагических и литоральных таксонов вновь значительно варьирует, отражая флюктуации глубины озера и существенные изменения соотношений площадей открытых глубоководных и мелководных прибрежных литоральных участков (рис. 2). Значительные вариации глубины водоема в указанный временной период подтверждаются результатами хирономидного анализа (Syrykh et al., 2017).

Около 2300 кал. л. н. увеличение значения холодноводных литоральных хидорид (*A. harpae*, *C. rectangula*/*A. guttata*, *Ch. cf. sphaericus*) отражает ухудшение климатических условий. *A. harpae* является распространенным таксоном в донных отложениях постгляциального периода в Европе и признанным индикатором холодных периодов (Bledzki, Rybak, 2016). *Ch. cf. sphaericus* и *C. rectangula*/*A. guttata* распространены в широком диапазоне местообитаний, но при этом являются наиболее холодоустойчивыми таксонами из Cladocera и с высокой частотой встречаются в термокарстовых озерах в суровых условиях Сибирской Арктики (Frolova et al., 2014). Около 2000 кал. л. н. в составе кладоцерных палеосообществ отмечается присутствие редкого арктоальпийского таксона.

A. werestchagini — один из немногих холодолюбивых таксонов в составе группы Cladocera, ареал его распространения ограничен тундрой и высокогорными безлесными биотопами. Состав Cladocera исследуемого региона недостаточно изучен, но в составе современного зоопланктона 30 водоемов, расположенных приблизительно в 600 км

к юго-западу от озера 11-СН-12 на плато Путорана таксон *A. werestchagini* не был найден (Chertoprud et al., 2022), также, как и для 35 водоемов, расположенных в 400 км восточнее (Frolova et al., 2014). Присутствие данного таксона в составе кладоцерных сообществ можно расценивать как показатель более суровых климатических условий в исследованный временной интервал. По данным палинологического анализа около 2000 кал. л. н. также отмечено похолодание, реконструированная средне июльская температура воздуха ниже современной на 1.5°C (Klemm et al., 2016). Ухудшение климата вызвало смену растительных сообществ: представленность в биомах *Larix* существенно снижается, лесотундра сменяется на кустарничковую тундру с небольшими островками лиственницы, также отражая ухудшение климатических условий (Klemm et al., 2016). Этот наблюдаемый общий голоценовый тренд подтверждается результатами других исследований на севере Сибири с использованием пыльцы или макрофоссилий (Andreev et al., 2011) и на основе древесно-кольцевых хронологий (Hantemirov, Shiyatov, 2002), которые показывают, что климатические условия несколько ухудшились в позднем голоцене (около 2500 кал. л. н.).

В период 850–600 кал. л. н. кратковременно увеличивается доля литоральных таксонов, снижаются значения индексов Хилла, что отражает снижение альфа-разнообразия. Максимального значения в сообществе достигает комплекс видов *Ch. cf. sphaericus*. Увеличение количества данного таксона может быть обусловлено повышением трофического статуса водоема (Фролова, Ибрагимова, 2018; Нигматуллин, Фролова, 2023) или ухудшением климатических условий в виде понижения температур вегетационного сезона (Korhola, Rautio, 2001; Frolova et al., 2014). Мы связываем увеличение доли данного таксона с кратковременным ухудшением климатических условий в период Малого ледникового периода, который фиксируется по результатам палинологического анализа как для озера 11-СН-12 (Klemm et al., 2016), так и для озера Лабаз, расположенного в 80 км западнее (Andreev et al., 2002) около 900 л. н.

В последние 100 лет вновь отмечено увеличение индексов альфа-разнообразия, тогда как величины бета-разнообразия остаются невысокими ($m\ SD=0.24$), отражая отсутствие значимых изменений и существование устойчивого, сложившегося кладоцерного сообщества с относительно постоянной таксономической структурой.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были проанализированы субфоссильные Cladocera (Branchiopoda: Crustacea) из колон-

ки донных отложений небольшого безымянного тундрового озера на юге Таймыра, недалеко от границы леса. На основе кладоцерного анализа в сравнении с результатами геохимического, палинологического анализов создана качественная локальная палеоэкологическая реконструкция за последние ~7100 кал. л. В составе кладоцерных сообществ отмечено 24 таксона ветвистоусых ракообразных, из которых три таксона являются новыми для региона. Наиболее существенные изменения в составе кладоцерных сообществ происходили четырежды — на начальной стадии формирования водоема ~7100 кал. л. н., затем 6550 кал. л. н., 2300–2000 кал. л. н. и 850 кал. л. н. На инициальной стадии возникновения водоема ~7100 кал. л. н. в составе кладоцерного сообщества была высока доля литоральных таксонов, ассоциированных с хорошо развитой прибрежной растительностью, часто обитающих в богатом детритом мелководье, и отмечены максимальные изменения бета-разнообразия, таксономического состава палеосообщества. Около 6550 кал. л. н. реконструированы существенные изменения в сообществе, отмечены смена доминантных таксонов и увеличение значения пелагических обитателей, отражающих процессы изменения рельефа и увеличения глубины водоема. В период 2300–2000 кал. л. н. увеличивается значение пионерных холодноводных таксонов, в составе сообщества отмечен редкий таксон с ограниченным арктоальпийским ареалом распространения — *A. werestchagini*, реконструировано ухудшение климатических условий. Похолодание малого ледникового периода 850–600 кал. л. н. отражено в снижении видового богатства и других индексов альфа-разнообразия, отмечено значительное увеличение присутствия в сообществе эврибионтного, холодоустойчивого *Ch. cf. sphaericus*. В последние 100 лет наблюдается увеличение индексов альфа- и бета-разнообразия что отражает существование устойчивого, сложившегося кладоцерного сообщества с относительно постоянной таксономической структурой. Результаты кладоцерного анализа согласуются с результатами реконструкций по данным био- и геопрокси (Andreev et al., 2002; Klemm et al., 2016; Syrykh et al., 2017), дополняя и уточняя их, и соответствуют представлениям об основных региональных палеоклиматических изменениях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке гранта Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024).

Выражаем огромную признательность всем участникам российско-германских экспедиций.

Благодарим анонимных рецензентов за ценные замечания и предложения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ары-Мас. Природные условия, флора и растительность самого северного в мире лесного массива (1978) Под ред. Б.Н. Норина. Л.: Наука. 192 с.
- Атлас Арктики (1985) Под ред. А.Ф. Трешникова. М.: ГУГК. 204 с.
- Белорусова Ж.М., Украинцева В.В. (1980) Палеогеография позднего плейстоцена и голоцена бассейна реки Новой на Таймыре. *Ботанический журнал*. Т. 65. № 3. С. 368–379.
- Большаинов Д.Ю., Савельева Л.А., Пестрякова Л.А. и др. (2013) Методика извлечения палеогеографической информации из донных отложений арктического озера Севастьян-Кюеле. *Известия Русского географического общества*. Т. 145. № 2. С. 49–65.
- Геокриологическая карта СССР масштаба 1:2500000 (1991) Под ред. Э.Д. Ершова, К.А. Кондратьева, В.Ф. Логинова, И.К. Сычева. М.: МГУ. 16 л.
- Геологическая карта России и прилегающих акваторий. Масштаб 1:2500000 (2016) Под ред. О.В. Петрова, С.И. Стрельникова. СПб.: ФГБУ ВСЕГЕИ. 14 л.
- Геологическая карта России и прилегающих акваторий. Масштаб 1:2500000 (2008) Под ред. О.В. Петрова. СПб.: ФГБУ ВСЕГЕИ. 12 л.
- Коровчинский Н.М., Котов А.А., Синев А.Ю. и др. (2021) Ветвистоусые ракообразные (Crustacea: Cladocera) Северной Евразии. Т. I–II. М.: Товарищество научных изданий КМК. 544 с.
- Котов А.А., Синев 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.
- Мануйлова Е.Ф. (1964) Ветвистоусые рачки (Cladocera) фауны СССР. М. – Л.: Наука. 328 с.
- Нигматуллин Н.М., Фролова Л.А. (2023) Сообщества Cladocera 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>
- Новенко Е.Ю., Мазей Н.Г., Куприянов Д.А. и др. (2022) Изменения природных условий западной части плато Путорана за последние 4000 лет. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. № 1. С. 152–166.
- Палеоклимат полярных областей Земли в голоцене (2019) Под ред. Д.Ю. Большаинова, С.Р. Веркулича. СПб.: ААНИИ. 204 с.
- Романовский Н.Н. (1993) Основы криогенеза литосферы. М.: Изд-во Моск. ун-та. 334 с.
- Рудая Н.А. (2021) Изменения климата, растительности и фитообразия Алтайской горной страны в конце МИС 2 и голоцене. Дис... док. геогр. наук. М.: ИГ РАН. 98 с.
- Синев А.Ю. (2002) Ключ для определения ветвистоусых 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.
- Тюлина Л.Н. (1937) Лесная растительность Хатангского района у ее северного предела. *Труды Арктического института*. Т. 63. С. 83–180.
- Фролова Л.А., Ибрагимова А.Г. (2015) Карцинологический анализ донных отложений озер Километровое и Котово Харбейской системы (Большеземельская тундра). *Труды КарНЦ РАН. № 5. Серия Лимнология*. С. 5–17.
<https://doi.org/10.17076/lim34>
- Фролова Л.А., Ибрагимова А.Г., Субетто Д.А. и др. (2018) Палеоэкологические и палеоклиматические реконструкции карельского перешейка на основе изучения субфоссильных Cladocera озера Медведевское (Северо-запад России). *Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки*. Т. 160. Кн. 1. С. 93–110.
- Andreev A.A., Siegert C., Klimanov V.A. et al. (2002) Late Pleistocene and Holocene vegetation and climate changes in the Taymyr lowland, Northern Siberia reconstructed from pollen records. *Quat. Res.* Vol. 57. No. 1. P. 138–150.
<http://dx.doi.org/10.1006/qres.2001.2302>
- Andreev A.A., Schirrmeister L., Tarasov P.E. et al. (2011) Vegetation and climate history in the Laptev Sea region (Arctic Siberia) during late Quaternary inferred from pollen records. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 30. No. 17. P. 2182–2199.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.12.026>
- Andreev A.A., Nazarova L.B., Lenz M. et al. (2022) Late Quaternary paleoenvironmental reconstructions from sediments of Lake Emanda (Verkhoyansk Mountains, East Siberia). *J. of Quat. Sci.* Vol. 37. Iss. 5. P. 884–899.
<https://doi.org/10.1002/jqs.3419>
- Appleby P.G., Nolan P.J., Gifford D.W. et al. (1986) ²¹⁰Pb dating by low background gamma counting. *Hydrobiologia*. Vol. 141. P. 21–27.
<http://dx.doi.org/10.1007/bf00026640>
- Biskaborn B.K., Forster A., Pfalz G. et al. (2023) Diatom responses and geochemical feedbacks to environmental changes at Lake Rauchagytygn (Far East Russian Arctic). *Biogeosciences*. Vol. 20. P. 1691–1712.
<https://doi.org/10.5194/bg-20-1691-2023>
- Biskaborn B.K., Herzschuh U., Zibulski R. et al. (2013) Late Holocene thermokarst variability inferred from diatoms in a lake sediment record from the Lena delta, Siberian Arctic. *J. Paleolimnol.* Vol. 49. P. 155–170.
<https://doi.org/10.1007/s10933-012-9650-1>
- Biskaborn B.K., Nazarova L., Pestryakova L.A. et al. (2019) Spatial distribution of environmental indicators in surface sediments of Lake Bolshoe Toko, Yakutia, Russia. *Biogeo-*

- sciences*. Vol. 16. P. 4023–4049.
<https://doi.org/10.5194/bg-2019-146>
- Biskaborn B.K., Subetto D.A., Savelieva L.A. et al. (2016) Late Quaternary vegetation and lake system dynamics in north-eastern Siberia: Implications for seasonal climate variability. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 147. P. 406–421.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.08.014>
- Bjerring R., Nykänen M., Sarmaja-Korjonen K. et al. (2008) Description of the subfossil head shield of *Alona protzi* Hartwig 1900 (Anomopoda, Chydoridae) and the environmental characteristics of its finding sites. *Studia Quat.* Vol. 25. P. 47–53.
- Blaauw M., Christen J.A. (2011) Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*. Vol. 6. No. 3. P. 457–474.
<http://dx.doi.org/10.1214/ba/1339616472>
- Bledzki L.A., Rybak J.I. (2016) Freshwater crustacean zooplankton of Europe. Springer International Publishing Switzerland. 923 p.
- Chao A., Gotelli N.J., Hsieh T.C. et al. (2014) Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: a framework for sampling and estimation in species diversity studies. *Ecol. Monographs*. Vol. 84. No. 1. P. 45–67.
<https://doi.org/10.1890/13-0133.1>
- Chertoprud E.S., Novichkova A.A., Novikov A.A. et al. (2022) Assemblages of Meiobenthic and Planktonic Microcrustaceans (Cladocera and Copepoda) from Small Water Bodies of Mountain Subarctic (Putorana Plateau, Middle Siberia). *Diversity*. Vol. 14. Iss. 6. 492.
<https://doi.org/10.3390/d14060492>
- Davidson T.A., Sayer C.D., Langdon P.G. et al. (2010) Inferring past zooplanktivorous fish and macrophyte density in a shallow lake: application of a new regression tree model. *Freshwater Biol.* Vol. 55. Iss. 3. P. 584–599.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02391.x>
- Derevyagin A., Siegert C., Troshin E. et al. (1997) Permafrost landscapes and geomorphology of Cape Sabler. Russian–German cooperation: the expedition Taymyr/Severnaya Zemlya 1996. *Berichte zur Polarforschung*. No. 237. P. 89–97.
- Ehlers J., Gibbard P.L. (2007) The extent and chronology of Cenozoic global glaciation. *Quat. Int.* Vol. 164–165. P. 6–20.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2006.10.008>
- Felde V.A., Flantua S.G.A., Jenks C.R. et al. (2020) Compositional turnover and variation in Eemian pollen sequences in Europe. *Vegetation History and Archaeobotany*. Vol. 29. P. 101–109.
<https://doi.org/10.1007/s00334-019-00726-5>
- Flössner D. (2000) Die Haplopoda und Cladocera (ohne Bosminidae) Mitteleuropas. Leiden: Backhuys Publishers. 428 p.
- Frey D.G. (1986) Cladocera analysis. Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology. Great Britain: Wiley & Sons. (Publ.). P. 667–701.
- Frolova L. (2016) Subfossil Cladocera (Branchiopoda, Crustacea) in climatic and palaeoenvironmental investigations in Eastern Siberia (Russia). In: *16th Int. Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*. Vol. 2. Iss. 4. P. 601–606. 10.5593/SGEM2016/B42/S19.077
- Frolova L., Frolova A. (2017) Implication of ephippium analysis (Cladocera, Branchiopoda, Crustacea) for reconstruction of past environmental changes in Central Yakutia, Russia. In: *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*. Vol. 17. No. 41. P. 481–486.
<https://doi.org/10.5593/sgem2017/41/S19.061>
- Frolova L., Nazarova L., Pestryakova L. et al. (2014) Subfossil cladoceran from sediment in thermokarst lakes in northeastern Siberia, Russia and their relationship to limnological and climatic variables. *J. Paleolimnol.* Vol. 52. No. 1. P. 107–119.
<https://doi.org/10.1007/s10933-014-9781-7>
- 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). *Contemporary Problems of Ecology*. 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. *Contemporary Problems of Ecology*. Vol. 6. Iss. 1. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1134/S199542551301006X>
- Gadagkar R. (1989) An undersirable property of Hill's diversity index N2. *Ecologia*. Vol. 80. P. 140–141.
<https://doi.org/10.1007/BF00789944>
- Glückler R., Geng R., Grimm L. et al. (2022) Holocene wild-fire and vegetation dynamics in Central Yakutia, Siberia, reconstructed from lake-sediment proxies. *Frontiers in Ecology and Evolution*. Vol. 10. 962906.
<https://doi.org/10.3389/fevo.2022.962906>
- Grimm E. (1987) CONISS: a FORTRAN77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the methods of incremental sum of squares. *Comput. Geosci.* Vol. 13. Iss. 1. P. 13–15.
[https://doi.org/10.1016/0098-3004\(87\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0098-3004(87)90022-7)
- Grimm E. (1991) Tilia TILIA and TILIAGRAPH. Springfield: Illinois State Museum. 56 p.
- Grimm E. (1991) Tilia software 2.0.2. Illinois State Museum Research and Collection Center. Springfield.
- Grosse G., Schirrmeister L., Siegert, C. et al. (2006) Geological and geomorphological evolution of a sedimentary periglacial landscape in Northeast Siberia during the late Quaternary. *Geomorphology*. Vol. 86. Iss. 1–2. P. 25–51. 10.1016/j.geomorph.2006.08.005
- Hantemirov R., Shiyatov S.G. (2002) A continuous multi-millennial ring-width chronology in Yamal, northwestern Siberia. *The Holocene*. Vol. 12. Iss. 6. P. 717–727.
- Herzschuh U., Pestryakova L., Savelieva L. et al. (2013) Siberian larch forests and the ion content of thaw lakes form a geochemically functional entity. *Nat. Commun.* Vol. 4. 2408.
<https://doi.org/10.1038/ncomms3408>
- Hill M. (1973) Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences. *Ecology*. Vol. 54. P. 427–432.
<https://doi.org/10.2307/1934352>

- Inger S., Scott R.A., Golionko V.G. (1999) Tectonic evolution of the Taimyr Peninsula, northern Russia: implications for Arctic continental assembly. *J. Geol. Soc.* Vol. 156. Iss. 6. P. 1069–1072.
- Hofmann W. (2000) Response of the chydorid faunas to rapid climatic changes in four alpine lakes at different altitudes. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 159. P. 281–292.
- Kienel U., Siegert C. (1999) Late Quaternary palaeoenvironmental reconstructions from a permafrost sequence (North Siberian Lowland, SE Taymyr Peninsula) – A multidisciplinary case study. *Boreas*. Vol. 28. No. 1. P. 181–193. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00213.x>
- Klemm J., Herzschuh U., Pestryakova L.A. (2016) Vegetation, climate and lake changes over the last 7000 years at the boreal treeline in north-central Siberia. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 147. P. 422–434. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.08.015>
- Klemm J., Herzschuh U., Pisaric M.F.J. et al. (2013) A pollen-climate transfer function from the tundra and taiga vegetation in Arctic Siberia and its applicability to a Holocene record. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* Vol. 386. P. 702–713. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.06.033>
- Kokelj S.V., Jorgenson M.T. (2013) Advances in thermokarst research. *Permafrost and Periglacial Processes*. Vol. 24. Iss. 2. P. 108–119. <https://doi.org/10.1002/ppp.1779>
- Korhola A., Rautio M. (2001) Cladocera and other branchiopod crustaceans. In: *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments*. *Dev. Paleoenviron. Res.* Vol. 4. P. 125–165. https://doi.org/10.1007/0-306-47671-1_2
- Last W.M., Smol J.P. (Eds.). (2001) *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments*. Vol. 1: Basin Analysis, Coring, and Chronological Techniques. Kluwer Academic. 548 p.
- Legendre P., Legendre L. (2012) *Numerical Ecology*. Elsevier (Publ.). Vol. 24. 1006 p.
- Luoto T.P., Nevalainen L., Sarmaja-Korjonen K. (2008) Multiproxy evidence for the ‘Little Ice Age’ from Lake Hamtrask, Southern Finland. *J. Paleolimnol.* Vol. 40. Iss. 4. P. 1097–1113. <https://doi.org/10.1007/s10933-008-9216-4>
- Marquer L., Gaillard M.J., Sugita S. et al. (2014) Holocene changes in vegetation composition in northern Europe: why quantitative pollen-based vegetation reconstructions matter. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 90. P. 199–216. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.02.013>
- Möller P., Bolshiyarov D. Yu., Bergstein H. (1999) Weichselian geology and paleoenvironmental history of the central Taymyr Peninsula, Siberia, indicating no glaciation during the last global glacial maximum. *Boreas*. Vol. 28. No. 1. P. 92–114. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00208.x>
- Nazarova L.B., Frolova L.A., Palagushkina O.V. et al. (2021) Recent shift in biological communities: A case study from the Eastern European Russian Arctic (Bol’shezemelskaya Tundra). *Polar Biol.* Vol. 44. P. 1107–1125. <https://doi.org/10.1007/s00300-021-02876-7>
- Nevalainen L. (2011) Intra-Lake heterogeneity of sedimentary cladoceran (Crustacea) assemblages forced by local hydrology. *Hydrobiologia*. Vol. 676. P. 9–22. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0707-3>
- 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., Luoto T.P., Sarmaja-Korjonen K. (2008) Late Holocene water-level changes in Lake Iso Lehmälampi, southern Finland, reflected in subfossil cladocerans and chironomids. *Studia Quat.* Vol. 25. P. 33–42.
- 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>
- 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). In: *20th Int. 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). In: *19th Int. multidisciplinary scientific Geoconference SGEM*. Vol. 19. Iss. 5.1. P. 817–824. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/5.1/S20.101>
- Notz D., Stroeve J. (2016) Observed Arctic sea-ice loss directly follows anthropogenic CO₂ emission. *Science*. Vol. 354. No. 6313. P. 747–750. <https://doi.org/10.1126/science.aag2345>
- Nykänen M., Sarmaja-Korjonen (2007) Findings of *Alona protzi* Hartwig 1900 (Branchiopoda: Anomopoda, Chydoridae) in Finland. *Studia Quat.* Vol. 24. P. 73–77.
- Peregovich B., Hoops E., Rachold V. (1999) Sediment transport to the Laptev Sea (Siberian Arctic) during the Holocene evidenced from the heavy mineral composition of fluvial and marine sediments. *Boreas*. Vol. 28. No. 1. P. 205–214. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00215.x>
- Pestryakova L.A., Herzschuh U., Wetterich S. (2012) Present-day variability and Holocene dynamics of permafrost-affected lakes in central Yakutia (Eastern Siberia) inferred from diatom records. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 51. P. 56–70. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.06.020>
- Pörtner H.-O., Roberts D.C., Masson-Delmotte V. et al. (Eds.). (2019) *IPCC. Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Cambridge University Press. Cambridge, UK and New York, NY, USA. 755 p. <https://doi.org/10.1017/9781009157964>
- Reimer P., Bard E., Bayliss A. et al. (2013) IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves, 0–50 000 years cal BP. *Radiocarbon*. Vol. 55. No.4. P. 1869–1887. http://dx.doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16947

- Rogozin D.Y., Nazarova L.B., Rudaya N.A. et al. (2025) Tracking Late Holocene climate change and the 1908 Tunguska impact event from lake sediments in Central Siberia. *Quat. Res.* First View. P. 1–19. <https://doi.org/10.1017/qua.2024.35>
- Romanovskii N.N., Hubberten H.-W., Gavrillov A.V. et al. (2004) Permafrost of the east Siberian Arctic shelf and coastal lowlands. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 23. P. 1359–1369. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.12.014>
- 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/10.1191/095968301677071335>
- Subetto D.A., Nazarova L.B., Pestryakova, L.A. et al. (2017) Paleolimnological studies in Russian northern Eurasia: A review. *Contemporary Problems of Ecology*. Vol. 10. P. 327–335. <https://doi.org/10.1134/S1995425517040102>
- Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I. et al. (2004) Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 23. P. 1229–1271. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.12.008>
- Swann G.E. A., Leng M.J., Juschus O. et al. (2010) A combined oxygen and silicon diatom isotope record of Late Quaternary change in Lake El'gygytyn, North East Siberia. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 29. P. 774–786. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.11.024>
- Syrykh L.S., Nazarova L.B., Herzsuh U. et al. (2017) Reconstruction of palaeoecological and palaeoclimatic conditions of the Holocene in the south of the Taimyr according to an analysis of lake sediments. *Contemporary Problems of Ecology*. Vol. 10. P. 363–369. <https://doi.org/10.1134/S1995425517040114>
- Szeroczyńska K., Sarmaja-Korjonen K. (2007) Atlas of Subfossil Cladocera from Central and Northern Europe. Friends of the Lower Vistula Society. 84 p.
- Ter Braak C.J.F., Prentice I.C. (1988) A theory of gradient analysis. *Adv. Ecol. Res.* Vol. 18. P. 271–317. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60183-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60183-X)
- Ter Braak C.J.F., Šmilauer P. (2002) CANOCO 4.5, Reference Manual and CanoDraw for Windows, User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (ver. 4.5). Ithaca, NY: Microcomputer Power. 500 p.
- The Physical Geography of Northern Eurasia (2003) New York: Oxford University Press. 571 p.
- The R Project for Statistical Computing (2018) Vienna. URL: <https://www.r-project.org> (access date: 08.12.2024).
- R Core Team (2013) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/> (access date: 08.12.2024).
- Ulrich M., Wetterich S., Rudaya N. et al. (2017) Rapid thermokarst evolution during the mid-Holocene in Central Yakutia, Russia. *The Holocene*. Vol. 27. Iss. 12. P. 1899–1913. <https://doi.org/10.1177/0959683617708454>
- Van Damme K., Brancelj A., Dumont H.J. (2009) Adaptations to the hyporheic in Aloninae (Crustacea: Cladocera): allocation of *Alona protzi* Hartwig, 1900 and related species to *Phreatalona* gen. nov. *Hydrobiologia*. Vol. 618. P. 1–34. <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9607-6>
- Van Damme K., Elias-Gutiérrez M., Dumont H.J. (2011) Three rare European “*Alona*” taxa (Branchiopoda: Cladocera: Chydoridae), with notes on distribution and taxonomy. *Ann. Limnol. Int. J. Limnol.* Vol. 47. No.1. P. 45–63. <https://doi.org/10.1051/limn/201003>
- Van Damme K., Nevalainen L. (2019) The most latent cladoceran in the Holarctic revealed – sinking *Unapertura* Sarmaja-Korjonen, Hakojärvi & Korhola, 2000 into the genus *Rhynchotalona* Norman, 1903 (Branchiopoda: Cladocera: Chydoridae). *Zootaxa*. Vol. 4613. No. 3. P. 463–476. [10.11646/zootaxa.4613.3.3](https://doi.org/10.11646/zootaxa.4613.3.3)
- Vernikovskiy V.A., Dobretsov N.L., Metelkin D.V. et al. (2013) Concerning tectonics and the tectonic evolution of the Arctic. *Russian Geology and Geophysics*. Vol. 54. No. 8. P. 838–858. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2013.07.006>
- Wahsner M., Müller C., Stein R. et al. (1999). Clay-mineral distribution in surface sediments of the Eurasian Arctic Ocean and continental margin as indicator for source areas and transport pathways: a synthesis. *Boreas*. Vol. 28. No. 1. P. 215–233. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00216.x>
- Zawiska I., Słowiński M., Correa-Metrio A. et al. (2015) The response of a shallow lake and its catchment to Late Glacial climate changes – a case study from eastern Poland. *Catena*. Vol. 126. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.007>

CLADOCERAN PALAEOCOMMUNITIES AND BIODIVERSITY CHANGES OF A LAKE IN SOUTHERN TAIMYR (NORTHERN CENTRAL SIBERIA) OVER THE LAST 7100 YEARS¹

L. A. Frolova^{a, #}, N. M. Nigmatullin^b, Ya. T. Shneidman^c, N. A. Rudaya^{a, d}, and U. Herzsuh^{e, g}

^a*Institute of Archeology and Ethnography of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russia*

^b*Kazan Federal University, Kazan, Russia*

^c*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia*

^d*Institute of Geography RAS, Moscow, Russia*

^e*University of Potsdam, Potsdam, Germany*

^g*Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Potsdam, Germany*

[#]*E-mail: larissa.frolova@kpfu.ru*

The study investigates the development history of the cladoceran community and its biodiversity changes in a small tundra lake located at the forest boundary in the southern part of the Taimyr Peninsula. The analysis is based on a 131.5 cm-long sediment core. A total of 24 cladoceran taxa were identified within the cladoceran communities. The most significant shifts in the community composition occurred around 7100 cal. yr BP, 6550 cal. yr BP, 2300–2000 cal. yr BP, and 800 cal. yr BP. During the initial formation stage of the lake (~7100 cal. yr BP), unstable environmental conditions were reconstructed, reflected in the highest fluctuations in alpha and beta diversity values (SD1.2–1.5). During the first 400 years, the cladoceran community exhibited a high proportion of littoral taxa associated with well-developed macrophyte vegetation and often inhabiting detritus-rich, shallow, swampy areas. According to the cladoceran analysis, the early lake development stages were characterized by a shallow water body formed in a low-lying, swampy landscape. Around 6550 cal. yr BP, significant changes in the cladoceran community structure were marked by an increase in pelagic taxa, indicating a rise in lake depth and water level. Cladoceran data suggest that the water level remained consistently high until ~5300 cal. yr BP, without substantial fluctuations. Over the past 2500 years, lake depth fluctuations have been observed. Cold climatic episodes were reconstructed for 2300–2000 cal. yr BP, when the proportion of pioneer cold-water taxa increased, and the rare taxon *Alona werestchagini*, which has a restricted Arcto-Alpine distribution, appeared in the community. Another cold phase occurred between 850 and 600 cal. yr BP, characterized by a temporary increase in littoral taxa, a decline in Hill's diversity indices reflecting reduced alpha diversity, and the dominance of *Chydorus* cf. *sphaericus* in the community. The results of the cladoceran analysis complement paleoecological and paleoclimatic reconstructions based on biogeoproxy data and align well with major regional paleoclimatic trends.

Keywords: Arctic; Siberia; Taimyr Peninsula; Khatanga; Cladocera; thermokarst lake; Holocene; reconstruction

ACKNOWLEDGMENTS

The studies were supported by grant of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (agreement No. 075-15-2024-554 of 24.04.2024).

We are grateful to all participants of the Russian-German expedition. We thank the anonymous reviewers for their valuable comments and suggestions.

REFERENCES

Andreev A.A., Nazarova L.B., Lenz M. et al. (2022) Late Quaternary paleoenvironmental reconstructions from

¹ For citation: Frolova L.A., Nigmatullin N.M., Shneidman Ya.T., Rudaya N.A., and Herzsuh U. (2025) Cladoceran palaeocommunities and biodiversity changes of a lake in Southern Taimyr (Northern Central Siberia) over the last 7100 years. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 56. No. 4. P. 713–731 (in Russ). <https://doi.org/10.7868/S2949179725040097>

sediments of Lake Emanda (Verkhoyansk Mountains, East Siberia). *J. of Quat. Sci.* Vol. 37. Iss. 5. P. 884–899. <https://doi.org/10.1002/jqs.3419>

Andreev A.A., Schirrmeister L., Tarasov P.E. et al. (2011) Vegetation and climate history in the Laptev Sea region (Arctic Siberia) during late Quaternary inferred from pollen records. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 30. No. 17. P. 2182–2199. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.12.026>

Andreev A.A., Siegert C., Klimanov V.A. et al. (2002) Late Pleistocene and Holocene vegetation and climate changes in the Taymyr lowland, Northern Siberia reconstructed from pollen records. *Quat. Res.* Vol. 57. No. 1. P. 138–150. <http://dx.doi.org/10.1006/qres.2001.2302>

Appleby P.G., Nolan P.J., Gifford D.W. et al. (1986) 210Pb dating by low background gamma counting. *Hydrobiologia*. Vol. 141. P. 21–27. <http://dx.doi.org/10.1007/bf00026640>

Baisheva I., Pestryakova L., Levina S. et al. (2023) Permafrost-thaw Lake development in Central Yakutia: sedimentary ancient DNA and element analyses from a Holo-

- cene sediment record. *J. Paleolimnol.* Vol. 70. P. 95–112. <https://doi.org/10.1007/s10933-023-00285-w>
- Belorusova Zh.M., Ukraintseva V.V. (1980) Paleogeography of Novaya River (Taymyr Peninsula) during the late Pleistocene and Holocene. *Botanicheskii Zhurnal.* Vol. 65. No. 3. P. 368–379 (in Russ.).
- Birks H.J.B. (2007) Estimating the amount of compositional change in late-Quaternary pollen stratigraphical data. *Vegetation History and Archaeobotany.* Vol. 16. P. 197–202. <https://doi.org/10.1007/s00334-006-0079-1>
- Biskaborn B.K., Forster A., Pfalz G. et al. (2023) Diatom responses and geochemical feedbacks to environmental changes at Lake Rauchagytgyn (Far East Russian Arctic). *Biogeosciences.* Vol. 20. P. 1691–1712. <https://doi.org/10.5194/bg-20-1691-2023>
- Biskaborn B.K., Herzschuh U., Zibulski R. et al. (2013) Late Holocene thermo karst variability inferred from diatoms in a lake sediment record from the Lena delta, Siberian Arctic. *J. Paleolimnol.* Vol. 49. P. 155–170. <https://doi.org/10.1007/s10933-012-9650-1>
- Biskaborn B.K., Nazarova L., Pestryakova L.A. et al. (2019) Spatial distribution of environmental indicators in surface sediments of Lake Bolshoe Toko, Yakutia, Russia. *Biogeosciences.* Vol. 16. P. 4023–4049. <https://doi.org/10.5194/bg-2019-146>
- Biskaborn B.K., Subetto D.A., Savelieva L.A. et al. (2016) Late Quaternary vegetation and lake system dynamics in north-eastern Siberia: Implications for seasonal climate variability. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 147. P. 406–421. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.08.014>
- Bjerring R., Nykänen M., Sarmaja-Korjonen K. et al. (2008) Description of the subfossil head shield of Alona protzi Hartwig 1900 (Anomopoda, Chydoridae) and the environmental characteristics of its finding sites. *Studia Quat.* Vol. 25. P. 47–53.
- Blaauw M., Christen J.A. (2011) Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis.* Vol. 6. No. 3. P. 457–474. <http://dx.doi.org/10.1214/ba/1339616472>
- Bledzki L.A., Rybak J.I. (2016) Freshwater crustacean zooplankton of Europe. Springer International Publishing Switzerland. 923 p.
- Bol'shiyanov D. Yu., Savel'eva L.A., Pestryakova L.A. et al. (2013) Methodology for Extracting Paleogeographic Information from the Bottom Sediments of the Arctic Lake Sevastyan-Kyuele. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva.* Vol. 145. No. 2. P. 49–65 (in Russ.).
- Bol'shiyanov D. Yu., Verkulich S.R. (2019) Paleoklimat pol'yarny'x oblastei Zemli v golocene (Paleoclimate of the Earth's Polar Regions in the Holocene). Saint-Petersburg: AANII (Publ.). 204 p. (in Russ.).
- Chao A., Gotelli N.J., Hsieh T.C. et al. (2014) Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: a framework for sampling and estimation in species diversity studies. *Ecol. Monographs.* Vol. 84. No. 1. P. 45–67. <https://doi.org/10.1890/13-0133.1>
- Chertoprud E.S., Novichkova A.A., Novikov A.A. et al. (2022) Assemblages of Meiobenthic and Planktonic Microcrustaceans (Cladocera and Copepoda) from Small Water Bodies of Mountain Subarctic (Putorana Plateau, Middle Siberia). *Diversity.* Vol. 14. Iss. 6. 492. <https://doi.org/10.3390/d14060492>
- Davidson T.A., Sayer C.D., Langdon P.G. et al. (2010) Inferring past zooplanktivorous fish and macrophyte density in a shallow lake: application of a new regression tree model. *Freshwater Biol.* Vol. 55. Iss. 3. P. 584–599. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02391.x>
- Derevyagin A., Siegert C., Troshin E. et al. (1997) Permafrost landscapes and geomorphology of Cape Sabler, Russian–German cooperation: the expedition Taymyr/Severnaya Zemlya 1996. *Berichte zur Polarforschung.* No. 237. P. 89–97.
- Ehlers J., Gibbard P.L. (2007) The extent and chronology of Cenozoic global glaciation. *Quat. Int.* Vol. 164–165. P. 6–20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2006.10.008>
- Ershov E.D., Kondratyev K.A., Loginov V.F. et al. (Eds.). (1991) Geokriologicheskaya karta SSSR, Mashtab 1:2500000 (Geocryological Map of the USSR. Scale 1:2500000). Gidropetsgeologiya (Publ.). 16 p. (in Russ.).
- Felde V.A., Flantua S.G.A., Jenks C.R. et al. (2020) Compositional turnover and variation in Eemian pollen sequences in Europe. *Vegetation History and Archaeobotany.* Vol. 29. P. 101–109. <https://doi.org/10.1007/s00334-019-00726-5>
- Flössner D. (2000) Die Haplopoda und Cladocera (ohne Bosminidae) Mitteleuropas. Leiden: Backhuys Publishers. 428 p.
- Frey D.G. (1986) Cladocera analysis. Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology. Great Britain: Wiley & Sons. (Publ.). P. 667–701.
- Frolova L. (2016) Subfossil Cladocera (Branchiopoda, Crustacea) in climatic and palaeoenvironmental investigations in Eastern Siberia (Russia). In: *16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM.* Vol. 2. Iss. 4. P. 601–606. 10.5593/SGEM2016/B42/S19.077
- Frolova L., Frolova A. (2017) Implication of ephippium analysis (Cladocera, Branchiopoda, Crustacea) for reconstruction of past environmental changes in Central Yakutia, Russia. In: *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM.* Vol. 17. No. 41. P. 481–486. <https://doi.org/10.5593/sgem2017/41/S19.061>
- Frolova L.A., Ibragimova A.G. (2015) Carcinological Analysis of Bottom Sediments from Lakes Kilometrovo and Kotovo of the Kharbey System (Bolshezemelskaya Tundra). *Trudy' KarNCz RAN. No. 5. Seriya Limnologiya.* P. 5–17 (in Russ.). <https://doi.org/10.17076/lim34>
- Frolova L.A., Ibragimova A.G., Subetto D.A. et al. (2018) Paleocological and Paleoclimatic Reconstructions for the Karelian Isthmus Based on the Study of Subfossil Cladocerans from Lake Medvedevskoe (Northwest Russia). *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Estestvennye nauki.* Vol. 160. Iss. 1. P. 93–110 (in Russ.).
- 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). *Contemporary Problems*

- of Ecology. Vol. 10. Iss. 4. P. 423–430.
<https://doi.org/10.1134/S1995425517040023>
- Frolova L., Nazarova L., Pestryakova L. et al. (2014) Subfossil cladoceran from sediment in thermokarst lakes in northeastern Siberia, Russia and their relationship to limnological and climatic variables. *J. Paleolimnol.* Vol. 52. No. 1. P. 107–119.
<https://doi.org/10.1007/s10933-014-9781-7>
- 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. *Contemporary Problems of Ecology.* Vol. 6. Iss. 1. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1134/S199542551301006X>
- Frolova L.A., Nigamatzyanova G.R. (2019) Structural and functional characteristics of zooplankton communities in thermokarst lakes of Samoylov Island (Lena River delta, Republic of Sakha (Yakutia)). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki.* Vol. 161. No. 1. P. 158–171.
<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2019.1.158-171>
- Gadagkar R. (1989) An undersirable property of Hill's diversity index N2. *Ecologia.* Vol. 80. P. 140–141.
<https://doi.org/10.1007/BF00789944>
- Glückler R., Geng R., Grimm L. et al. (2022) Holocene wild-fire and vegetation dynamics in Central Yakutia, Siberia, reconstructed from lake-sediment proxies. *Frontiers in Ecology and Evolution.* Vol. 10. 962906.
<https://doi.org/10.3389/fevo.2022.962906>
- Grimm E. (1987) CONISS: a FORTRAN77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the methods of incremental sum of squares. *Comput. Geosci.* Vol. 13. Iss. 1. P. 13–15.
[https://doi.org/10.1016/0098-3004\(87\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0098-3004(87)90022-7)
- Grimm E. (1991) Tilia software 2.0.2. Illinois State Museum Research and Collection Center. Springfield.
- Grimm E. (1991) Tilia TILIA and TILIAGRAPH. Springfield: Illinois State Museum. 56 p.
- Grosse G., Schirmermeister L., Siegert, C. et.al. (2006) Geological and geomorphological evolution of a sedimentary periglacial landscape in Northeast Siberia during the late Quaternary. *Geomorphology.* Vol. 86. Iss. 1–2. P. 25–51.
[10.1016/j.geomorph.2006.08.005](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.08.005)
- Hantemirov R., Shiyatov S.G. (2002) A continuous multi-millennial ring-width chronology in Yamal, northwestern Siberia. *The Holocene.* Vol. 12. Iss. 6. P. 717–727.
- Herzschuh U., Pestryakova L., Savelieva L. et al. (2013) Siberian larch forests and the ion content of thaw lakes form a geochemically functional entity. *Nat. Commun.* Vol. 4. 2408.
<https://doi.org/10.1038/ncomms3408>
- Hill M. (1973) Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences. *Ecology.* Vol. 54. P. 427–432.
<https://doi.org/10.2307/1934352>
- Hofmann W. (2000) Response of the chydorid faunas to rapid climatic changes in four alpine lakes at different altitudes. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 159. P. 281–292.
- Inger S., Scott R.A., Golionko V.G. (1999) Tectonic evolution of the Taimyr Peninsula, northern Russia: implications for Arctic continental assembly. *J. Geol. Soc.* Vol. 156. Iss. 6. P. 1069–1072.
- Kienel U., Siegert C. (1999) Late Quaternary palaeoenvironmental reconstructions from a permafrost sequence (North Siberian Lowland, SE Taymyr Peninsula) – A multidisciplinary case study. *Boreas.* Vol. 28. No. 1. P. 181–193.
<https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00213.x>
- Klemm J., Herzschuh U., Pestryakova L.A. (2016) Vegetation, climate and lake changes over the last 7000 years at the boreal treeline in north-central Siberia. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 147. P. 422–434.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.08.015>
- Klemm J., Herzschuh U., Pisaric M.F.J. et al. (2013) A pollen-climate transfer function from the tundra and taiga vegetation in Arctic Siberia and its applicability to a Holocene record. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* Vol. 386. P. 702–713.
<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.06.033>
- Kokelj S.V., Jorgenson M.T. (2013) Advances in thermokarst research. *Permafrost and Periglacial Processes.* Vol. 24. Iss. 2. P. 108–119.
<https://doi.org/10.1002/ppp.1779>
- Korhola A., Rautio M. (2001) Cladocera and other branchiopod crustaceans. In: *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Dev. Paleoenviron. Res.* Vol. 4. P. 125–165.
https://doi.org/10.1007/0-306-47671-1_2
- Korovchinsky N.M., Kotov A.A., Sinev A. Yu. et al. (2021) Vetvistousye rakoobraznye (Crustacea: Cladocera) Severnoi Evrazii. T. I–II (Cladocera (Crustacea: Cladocera) of Northern Eurasia. Vol. I–II.). Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy 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. A guide to zooplankton and zoobenthos of fresh waters of European Russia.)*. Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK (Publ.). P. 151–276 (in Russ.).
- Last W.M., Smol J.P. (Eds.) (2001) *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Vol. 1: Basin Analysis, Coring, and Chronological Techniques.* Kluwer Academic. 548 p.
- Legendre P., Legendre L. (2012) *Numerical Ecology.* Elsevier (Publ.). Vol. 24. 1006 p.
- Luoto T.P., Nevalainen L., Sarmaja-Korjonen K. (2008) Multiproxy evidence for the 'Little Ice Age' from Lake Hamprask, Southern Finland. *J. Paleolimnol.* Vol. 40. Iss. 4. P. 1097–1113.
<https://doi.org/10.1007/s10933-008-9216-4>
- Manuilova E.F. (1964) Vetvistousye rachki (Cladocera) fauny SSSR (Cladocera of the fauna of the USSR). Moscow-Leningrad: Nauka (Publ.). 328 p. (in Russ.).
- Marquer L., Gaillard M.J., Sugita S. et.al. (2014) Holocene changes in vegetation composition in northern Europe: why quantitative pollen-based vegetation reconstructions matter. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 90. P. 199–216.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.02.013>

- Möller P., Bolshiyarov D. Yu., Bergstein H. (1999) Weichselian geology and paleoenvironmental history of the central Taymyr Peninsula, Siberia, indicating no glaciation during the last global glacial maximum. *Boreas*. Vol. 28. No. 1. P. 92–114.
<https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00208.x>
- Nazarova L.B., Frolova L.A., Palagushkina O.V. et al. (2021) Recent shift in biological communities: A case study from the Eastern European Russian Arctic (Bol'shezemelskaya Tundra). *Polar Biol.* Vol. 44. P. 1107–1125.
<https://doi.org/10.1007/s00300-021-02876-7>
- Nevalainen L. (2011) Intra-lake heterogeneity of sedimentary cladoceran (Crustacea) assemblages forced by local hydrology. *Hydrobiologia*. Vol. 676. P. 9–22.
<https://doi.org/10.1007/s10750-011-0707-3>
- 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., Luoto T.P., Sarmaja-Korjonen K. (2008) Late Holocene water-level changes in Lake Iso Lehmälampi, southern Finland, reflected in subfossil cladocerans and chironomids. *Studia Quat.* Vol. 25. P. 33–42.
- 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>
- 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). In: *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). In: *19th International multidisciplinary scientific Geoconference SGEM*. Vol. 19. Iss. 5.1. P. 817–824.
<https://doi.org/10.5593/sgem2019/5.1/S20.101>
- 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>
- Norin B.N. (Ed.). (1978) Ary-Mas. Prirodnye usloviya, flora i rastitel'nost' samogo severnogo v mire lesnogo massiva (Ary-Mas. Natural conditions, flora and vegetation of the world's northernmost forest massif.). Leningrad: Nauka (Publ.). 192 p. (in Russ.).
- Notz D., Stroeve J. (2016) Observed Arctic sea-ice loss directly follows anthropogenic CO₂ emission. *Science*. Vol. 354. No. 6313. P. 747–750.
<https://doi.org/10.1126/science.aag2345>
- Novenko E. Yu., Mazei N.G., Kupriyanov D.A. et al. (2022) Environmental changes in the western part of the Putorana Plateau over the past 4,000 years. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. No. 1. P. 152–166. (in Russ.).
- Nykänen M., Sarmaja-Korjonen (2007) Findings of Alona protzi Hartwig 1900 (Branchiopoda: Anomopoda, Chydoridae) in Finland. *Studia Quat.* Vol. 24. P. 73–77.
- Peregovich B., Hoops E., Rachold V. (1999) Sediment transport to the Laptev Sea (Siberian Arctic) during the Holocene evidenced from the heavy mineral composition of fluvial and marine sediments. *Boreas*. Vol. 28. No. 1. P. 205–214.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00215.x>
- Pestryakova L.A., Herzschuh U., Wetterich S. (2012) Present-day variability and Holocene dynamics of permafrost-affected lakes in central Yakutia (Eastern Siberia) inferred from diatom records. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 51. P. 56–70.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.06.020>
- Petrov O.V. (Ed.). (2008) Geologicheskaya karta Rossii i prilgayushchikh akvatorii. Masshtab 1:2500000 (Geological Map of Russia and Adjoining Water Areas, 1: 2500000). Sankt-Peterburg: VSEGEI (Publ.). 12 p. (in Russ.).
- Petrov O.V., Strelnikov S.I. (Eds.). (2016) Geologicheskaya karta Rossii i prilgayushchikh akvatorii. Masshtab 1:2500000 (Geological Map of Russia and Adjoining Water Areas, 1:2500000). Sankt-Peterburg: VSEGEI (Publ.). 14 p. (in Russ.).
- Pörtner H.-O., Roberts D.C., Masson-Delmotte V. et al. (Eds.). (2019) IPCC. Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Cambridge University Press. Cambridge, UK and New York, NY, USA. 755 p.
<https://doi.org/10.1017/9781009157964>
- R Core Team (2013) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <http://www.R-project.org/> (access date: 08.12.2024).
- Reimer P., Bard E., Bayliss A. et al. (2013) IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves, 0–50000 years cal BP. *Radiocarbon*. Vol. 55. No. 4. P. 1869–1887.
http://dx.doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16947
- Rogozin D.Y., Nazarova L.B., Rudaya N.A. et al. (2025) Tracking Late Holocene climate change and the 1908 Tunguska impact event from lake sediments in Central Siberia. *Quat. Res.* First View. P. 1–19.
<https://doi.org/10.1017/qua.2024.35>
- Romanovskii N.N. (1993) Osnovy kriogeneza litosfery (Fundamentals of Lithosphere Cryogenesis). Moscow: Moskovskii universitet (Publ.). 334 p. (in Russ.).
- Romanovskii N.N., Hubberten H.-W., Gavrillov A.V. et al. (2004) Permafrost of the east Siberian Arctic shelf and coastal lowlands. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 23. P. 1359–1369.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.12.014>
- Rudaya N.A. (2021) Izmeneniya klimata, rastitel'nosti i fitoraznoobraziya Altaiskoi gornoj strany v kontse MIS 2 i golotsene (Climate, Vegetation, and Phytodiversity Changes in the Altai Mountain Region at the End of MIS 2 and the Holocene). D. Sc. thesis. Moscow: IG RAN. 98 p. (in Russ.).
- 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

- el changes. *The Holocene*. Vol. 11. Iss. 1. P. 53–63.
<https://doi.org/10.1191/095968301677071335>
- 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. No. 8. P. 926–939. (in Russ.).
- Smirnov N.N. (1971) Fauna SSSR. Rakoobraznye. T. 1. Vyp. 2 (Fauna of the USSR. Crustaceans. Vol. 1. Iss. 2.). Leningrad: Nauka (Publ.). 533 p. (in Russ.).
- Smirnov N.N. (2010) Istoricheskaya ekologiya presnovodnykh zoosenozov (Historical Ecology of Freshwater Zoocenoses). Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK. 219 p. (in Russ.).
- Subetto D.A., Nazarova L.B., Pestryakova, L.A. et al. (2017) Paleolimnological studies in Russian northern Eurasia: A review. *Contemporary Problems of Ecology*. Vol. 10. P. 327–335.
<https://doi.org/10.1134/S1995425517040102>
- Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I. et al. (2004) Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 23. P. 1229–1271.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.12.008>
- Swann G.E. A., Leng M.J., Juschus O. et al. (2010) A combined oxygen and silicon diatom isotope record of Late Quaternary change in Lake El'gygytyn, North East Siberia. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 29. P. 774–786.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.11.024>
- Syrykh L.S., Nazarova L.B., Herzsuh U. et al. (2017) Reconstruction of palaeoecological and palaeoclimatic conditions of the Holocene in the south of the Taimyr according to an analysis of lake sediments. *Contemporary Problems of Ecology*. Vol. 10. P. 363–369
<https://doi.org/10.1134/S1995425517040114>
- Szeroczyńska K., Sarmaja-Korjonen K. (2007) Atlas of Subfossil Cladocera from Central and Northern Europe. *Friends of the Lower Vistula Society*. 84 p.
- Ter Braak C.J.F., Prentice I.C. (1988) A theory of gradient analysis. *Adv. Ecol. Res.* Vol. 18. P. 271–317.
[https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60183-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60183-X)
- Ter Braak C.J.F., Šmilauer P. (2002) CANOCO 4.5, Reference Manual and CanoDraw for Windows, User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (ver. 4.5). Ithaca, NY: Microcomputer Power. 500 p.
- The Physical Geography of Northern Eurasia (2003) New York: Oxford University Press. 571 p.
- The R Project for Statistical Computing (2018) Vienna. URL: <https://www.r-project.org> (access date: 08.12.2024).
- Treshnikov A.F.(Ed.) (1985) Atlas Arktiki (Atlas of the Arctic). Moskva: GUGK (Publ.). 204 p.
- Tyulina L.N. (1937) Forest Vegetation of the Khatanga Region at Its Northern Limit. *Trudy Arkticheskogo instituta*. Vol. 63. P. 83–180 (in Russ.).
- Ulrich M., Wetterich S., Rudaya N. et al. (2017) Rapid thermokarst evolution during the mid-Holocene in Central Yakutia, Russia. *The Holocene*. Vol. 27. Iss. 12. P. 1899–1913.
<https://doi.org/10.1177/0959683617708454>
- Van Damme K., Brancelj A., Dumont H.J. (2009) Adaptations to the hyporheic in Aloninae (Crustacea: Cladocera): allocation of *Alona protzi* Hartwig, 1900 and related species to *Phreatalona* gen. nov. *Hydrobiologia*. Vol. 618. P. 1–34.
<https://doi.org/10.1007/s10750-008-9607-6>
- Van Damme K., Elias-Gutiérrez M., Dumont H.J. (2011) Three rare European “*Alona*” taxa (Branchiopoda: Cladocera: Chydoridae), with notes on distribution and taxonomy. *Ann. Limnol. Int. J. Limnol.* Vol. 47. No. 1. P. 45–63.
<https://doi.org/10.1051/limn/201003>
- Van Damme K., Nevalainen L. (2019) The most latent cladoceran in the Holarctic revealed – sinking *Unapertura* Sarmaja-Korjonen, Hakojirvi & Korhola, 2000 into the genus *Rhynchotalona* Norman, 1903 (Branchiopoda: Cladocera: Chydoridae). *Zootaxa*. Vol. 4613. No. 3. P. 463–476. [10.11646/zootaxa.4613.3.3](https://doi.org/10.11646/zootaxa.4613.3.3)
- Vernikovsky V.A., Dobretsov N.L., Metelkin D.V. et al. (2013) Concerning tectonics and the tectonic evolution of the Arctic. *Russian Geology and Geophysics*. Vol. 54. No. 8. P. 838–858.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2013.07.006>
- Wahsner M., Müller C., Stein R. et al. (1999). Clay-mineral distribution in surface sediments of the Eurasian Arctic Ocean and continental margin as indicator for source areas and transport pathways: a synthesis. *Boreas*. Vol. 28. No. 1. P. 215–233.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00216.x>
- Zawiska I., Słowiński M., Correa-Metrio A. et al. (2015) The response of a shallow lake and its catchment to Late Glacial climate changes – a case study from eastern Poland. *Catena*. Vol. 126. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.007>