

## **Реконструкция палеоэкологических и палеоклиматических условий голоцен на юге Таймыра по результатам анализа озерных донных отложений**

Л. С. СЫРЫХ<sup>1,5</sup>, Л. Б. НАЗАРОВА<sup>3,4,5</sup>, У. ХЕРЦШУ<sup>3,4</sup>, Д. А. СУБЕТТО<sup>1,2,5</sup>, И. М. ГРЕКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена  
191186, Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48  
E-mail: lyudmilalsd@gmail.com

<sup>2</sup> Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН  
185030, Петрозаводск, просп. Александра Невского, 50

<sup>3</sup> Потсдамский университет, Институт Земли и экологических наук  
14476, Потсдам-Гольм, ул. Карла Либкнехта, 24-25

<sup>4</sup> Институт им. Альфреда Вегенера, Гельмгольц центр полярных и морских исследований  
14473, Потсдам, Телеграфенберг, A43

<sup>5</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет  
420008, Казань, ул. Кремлевская, 18

Статья поступила 12.10.2016

Принята к печати 25.01.2017

### **АННОТАЦИЯ**

Проведено исследование керна донных отложений оз. Хатанга-12 (п-ов Таймыр, Красноярский край). Керн длиной 131,5 см, охватывает период осадконакопления с 7100 лет назад. В рамках данного исследования выполнен хирономидный анализ и проведена качественная палеоэкологическая реконструкция развития региона и количественная реконструкция вариаций среднеилюльской температуры воздуха и глубины воды озера с применением российских региональных статистических хирономидных моделей [Nazarova et al., 2008, 2011, 2015]. Озеро Хатанга-12 образовалось в период среднеголоценового потепления в результате развития термокарстовых процессов. На формирование экосистемы озера в разные этапы его развития оказывали влияние климатические и криолитогенные факторы. Среднеголоценовое потепление около 7100–6500 калиброванных л. н. (кал. л. н.) вызвало активизацию термокарстовых процессов, в результате которых сформировалась его котловина. Позже, 6500–4500 кал. л. н., по данным хирономидного анализа, наступил период похолодания. Донные отложения озера формируются за счет сноса и обрушения берегов. После 2500 кал. л. н. реконструируемые условия близки к современным.

**Ключевые слова:** Chironomidae, палеолимнология, голоцен, реконструкции климата, Российская Арктика, Хатанга.

© Сырых Л. С., Назарова Л. Б., Херцшу У., Субетто Д. А., Греков И. М., 2017

Развитие полярных экосистем в условиях меняющегося климата остается актуальной темой палеоклиматических и палеоэкологических исследований [Hubberten et al., 2004; Frolova et al., 2013, 2014]. Несмотря на то, что реконструкция развития природной среды в прошлом проводится практически во всем северном полушарии [Mayewski et al., 2004; Sundqvist et al., 2014], палеоэкологические и палеоклиматические данные из Сибирского сектора Арктики по-прежнему малочисленны [Schirrmeister et al., 2011; Nazarova et al., 2013a, b].

В качестве лучших биологических индикаторов для количественной оценки прошлых изменений температуры воздуха используются водные организмы, в частности Chironomidae (Insecta: Diptera) [Solovieva et al., 2005, 2008; Nazarova et al., 2015], распространение и развитие популяций которых в значительной мере определяется температурой [Walker et al., 2001; Self et al., 2011]. Хитинизированные структуры хирономид хорошо сохраняются в донных отложениях озер и легко определимы [Биологические индикаторы..., 2013], методы выполнения качественных и количественных реконструкций детально разработаны [Brooks, 2006; Nazarova et al., 2015] и широко применяют-

ся в палеоклиматических и палеоэкологических исследованиях в мире [Larocque et al., 2001; Smol et al., 2005; Barley et al., 2006].

В 2011–2013 гг. в рамках российско-германского сотрудничества проведены экспедиции в район р. Хатанга (юго-восток п-ова Таймыр, Красноярский край), отобраны поверхность пробы и керны озерных отложений и проведены литостратиграфический, гранулометрический, геохимический и спорово-пыльцевой анализы, а также получены радиоуглеродные датировки [Klemm et al., 2015].

Цель исследования – реконструкция природно-климатических условий голоцен юго-восточной части п-ова Таймыр на основе микропалеонтологического анализа озерных донных отложений с применением статистических хирономидных моделей для реконструкции среднеиюльской температуры воздуха и глубины воды в озерах.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Озеро Хатанга-12 (официального названия нет, 72,50° с. ш., 102,29° в. д.; 60 м над ур. м.) расположено на правом берегу р. Хатанга в среднем ее течении (рис. 1). Озеро неболь-

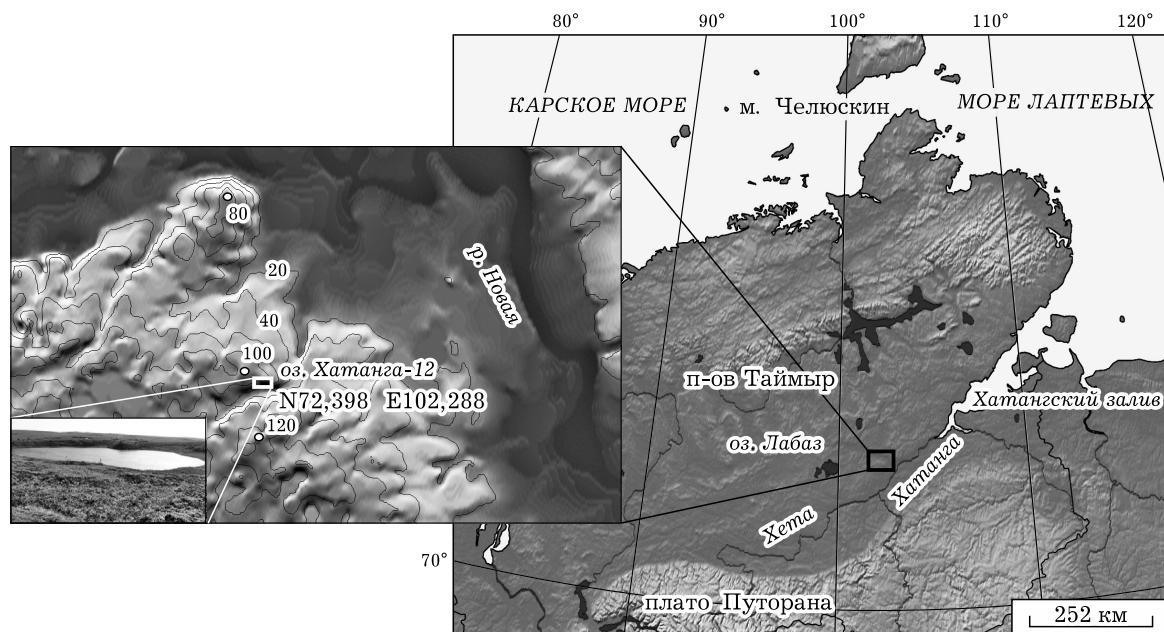


Рис. 1. Местоположение исследуемого оз. Хатанга-12, п-ов Таймыр

шое: длина 200 м, ширина – 150 м, максимальная глубина – 14,3 м; площадь – 2,4 га. Основной тип питания – атмосферное. Котловина озера образовалась в результате развития термокарстовых процессов, действие которых наблюдается и в настоящее время (разрушение берегов). Постоянных притоков не имеет, на западном берегу из него берет начало ручей, впадающий в один из притоков р. Хатанга – р. Новая. Озеро олиготрофное [Klemm et al., 2015]. Долина р. Хатанга расположена в южной части п-ова Таймыр, на Северо-Сибирской низменности (см. рис. 1). Климат исследуемого района субарктический, характеризуется коротким прохладным летом (средняя температура июля 13,0 °C) и продолжительной зимой (средняя температура января –31,5 °C); годовое количество осадков 250 мм, основная часть которых выпадает летом [New et al., 2002]. Растительность преимущественно тундровая. Почти на всей территории полуострова распространена многолетняя мерзлота.

**Отбор и обработка проб.** Исследуемый керн донных отложений длиной 131,5 см, отобран с глубины 14,3 м гравитационным буром фирмы UWITEC. 15 образцов седиментов керна датированы радиоуглеродным методом в Радиоуглеродной лаборатории г. Познань, Польша. На основе результатов датирования построена возрастная модель с помощью пакета Bacon 2.2 [Blaauw, 2011] в программе R [R Development Core Team, 2013], калибровка радиоуглеродных дат проводилась с использованием калибровочной кривой IntCal13. Проанализированный керн охватывает период времени с 7100 лет [Klemm et al., 2015]. Более подробно возрастная модель рассматривается в работе [Klemm et al., 2015].

Исследовано 28 проб, в двух пробах обнаружены единичные головные капсулы, поэтому они не учитывались при составлении реконструкции, но рассматривались при характеристике стратиграфических зон. Обработка проб донных осадков на хирономидный анализ выполнена по стандартной методике [Brooks et al., 2007]. Из каждой пробы отобрано от 45 до 67 головных капсул. Их постоянные препараты фиксировали в гидроматриксе под покровными стеклами диаметром 6 мм. Определение проводили по совре-

менным специализированным определителям [Wiederholm, 1983; Brooks et al., 2007] и коллекции хирономид Института полярных и морских исследований (AWI), г. Потсдам (Л. Б. Назарова). Ввиду известных сложностей с определением головных капсул фоссилизированных хирономид оно проводилось до уровня рода или принятого на сегодня названия морфотипа (например, *Psectrocladius psilopterus*-type, *P. sordidellus*-type, *P. barbitanensis*-type), именуемых в дальнейшем “таксон” [Brooks et al., 2007].

Стратиграфическая диаграмма построена в программе C2 версия 1.5 [Juggins, 2007]. Для исследования общих тенденций изменений видового состава использован метод главных компонент (Principal component analysis – PCA) [ter Braak, Prentice, 1988]. Статистически значимые зоны выделены с помощью программ BSTICK и ZONE [Lotter, Juggins, 1991; Bennett, 1996] и осей 1 и 2 PCA. Биоразнообразие и выравненность хирономидных сообществ оценены с помощью индексов Шеннона (*H*) [Shannon, Weaver, 1963] и Пиелу (*I*) [Pielou, 1966]. Качественная реконструкция основана на калибровочных базах данных озер Восточной Сибири и Дальнего Востока [Nazarova et al., 2008, 2011, 2015]. Реконструкция среднеиюльской температуры воздуха ( $T_{июля}$ ) и глубины (WD) выполнена по российским хирономидным моделям [Nazarova et al., 2011, 2015].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Донные отложения представлены в основном алевритовыми глинами, в нижней части они более плотные, содержат включения мхов и растительных остатков. Массовая доля органического углерода варьирует от 0,7 до 17,8 %. Скорость осадконакопления составляет ~0,025 см/год, с уменьшением до ~0,01 см/год в интервале 5400 и 2600 калиброванных лет назад (кал. л. н.), что соответствует горизонту 67–81 см (рис. 2). Перерывов в осадконакоплении не выявлено [Klemm et al., 2015].

Всего в исследованных пробах найдено и определено 1208 головных капсул хирономид, которые относятся к четырем подсемействам: Chironominae, Orthocladiinae, Tanypodinae,

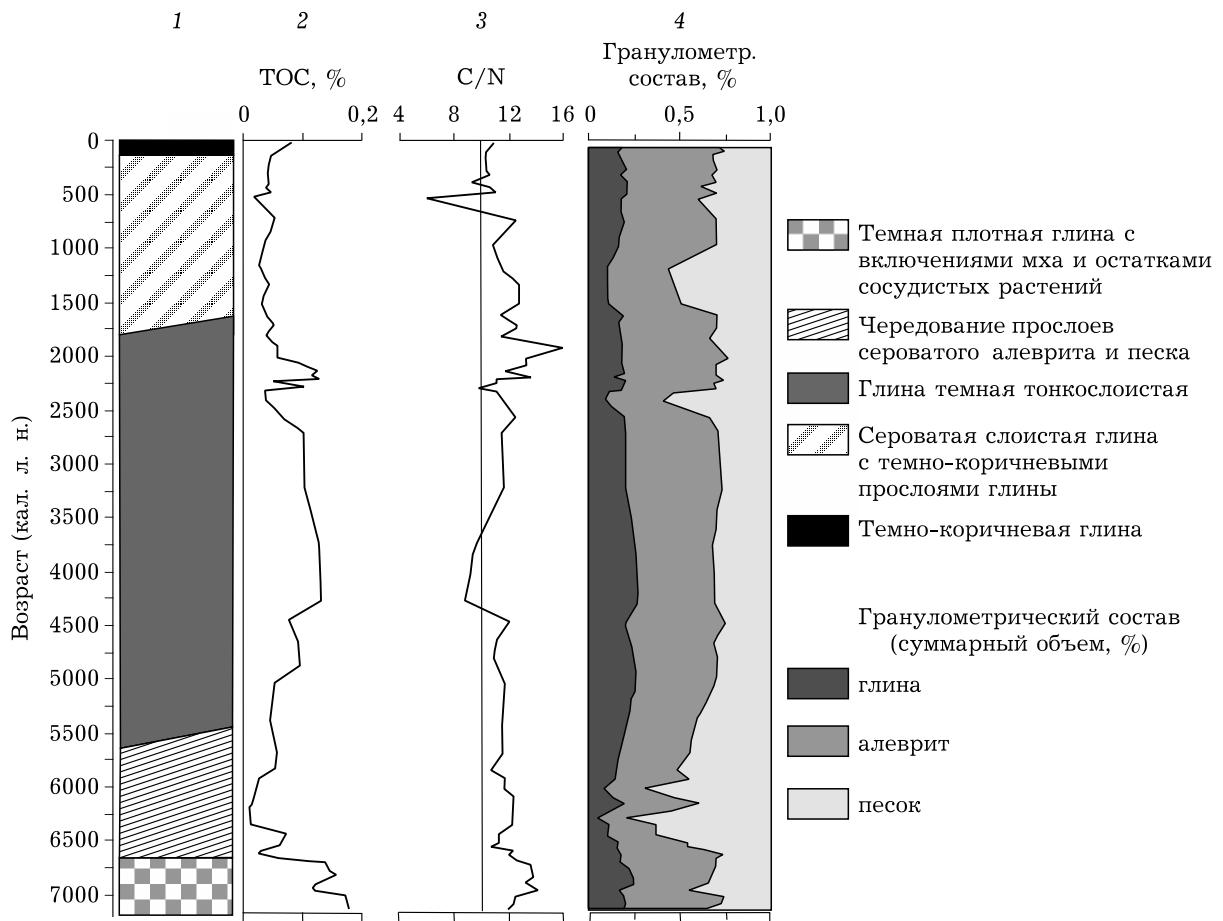


Рис. 2. Результаты литологического, гранулометрического и геохимического анализов керна донных отложений оз. Хатанга-12: 1 – литостратиграфия керна донных отложений; 2 – ТОС, % – общий органический углерод, %; 3 – С/Н – соотношение процентного содержания органического углерода и азота в донных отложениях; 4 – гранулометрический состав донных отложений

Diamesinae. Доминирующие таксоны принадлежат к двум подсемействам: Chironominae триба Chironomini (*Sergentia coracina*-type) и Tanytarsini (*Micropsectra insignilobus*-type) и Orthocladiinae (*Zalutshia* type B, *Heterotrissocladius grimshawi*-type, *Heterotrissocladius marcidus*-type). Ни один вид не встречается во всех пробах. Наиболее распространены *Zalutshia* type B, *Sergentia coracina*-type, *Tanitarsus mendax*-type, которые встречаются во всех зонах. Выравненность хирономидных сообществ (индекс Пиелоу) высока практически на протяжении всего исследованного периода, однако некоторое понижение отмечается в период с 4000 по 2000 кал. л. н., что, вероятно, связано со сменой условий: в этот период отмечается замедление седиментации, реконструированные условия отличаются некоторым возрастанием закисления водоема.

В исследуемой колонке донных отложений выделено четыре статистически значимые зоны (рис. 3).

Ch I (7100–6250 кал. л. н.) Донные отложения представлены алевритистыми глинами с примесью песка и прослоями темноцветных более плотных органогенных глин с включениями мхов и макроостатков (см. рис. 2). Соотношение углерода и азота (С/Н) в них не превышает 15 (см. рис. 2), а Rb/Sr колеблется в пределах 0,2–0,5 [Klemm et al., 2015]. В пределах зоны наблюдаются вариации численности доминирующих таксонов хирономид *Sergentia coracina*-type и *Zalutshia zalutshicola* (см. рис. 3). Также в составе хирономидных сообществ присутствуют таксоны, ассоциирующиеся с макрофитами: *Psectrocladius sordidellus*-type, *Cricotopus intersectus*-type, *Cricotopus cylindraceus*-type, *Cricotopus lari-*

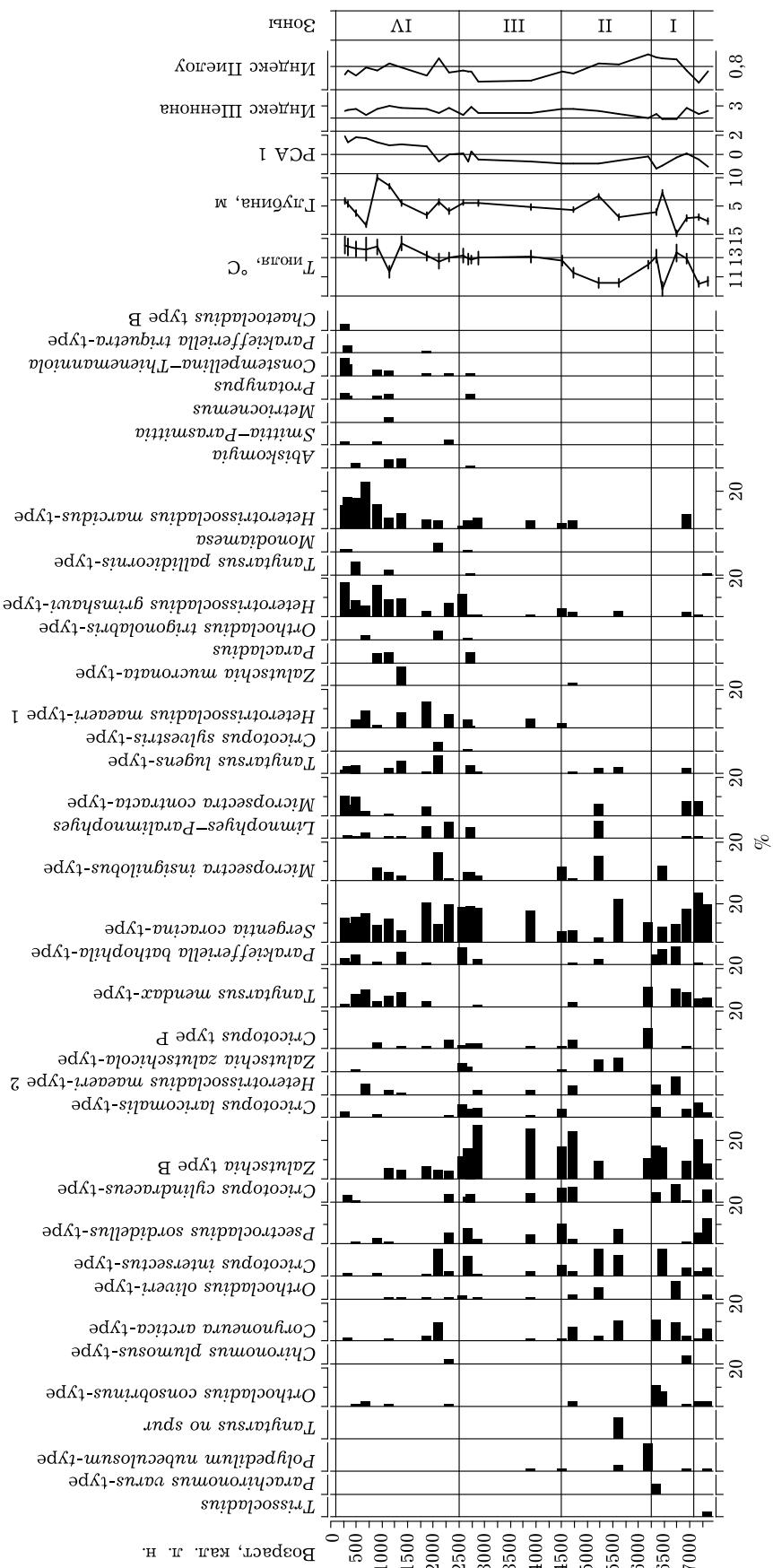


Рис. 3. Стратиграфическое распространение таксонов хирономид в донных отложениях оз. Хатанга-12, реконструированные средние температуры июля ( $T$ , °C) и глубина воды, значение РСА 1

*comalis*-type. Значения индекса Шеннона (биоразнообразие хирономидных сообществ) меняется в диапазоне от 1,98 до 2,80, выравненность сообществ (индекс Пиелоу) 0,59–0,90. Реконструированные температуры изменяются от 10,5 до 13,0 °С. Реконструированные глубины  $\geq 2$  м.

Ch II (6250–4500 кал. л. н.). С начала периода до 5500 кал. л. н. наблюдается увеличение скорости седиментации, в гранулометрическом составе отмечается преобладание алевритов. В структуре донных отложений озера происходит снижение содержания органического углерода (TOC). Одновременно (около 5500 кал. л. н.) в литологии донных отложений фиксируется смена крупнозернистой песчаной фракции, на мелкодисперсную фракцию (см. рис. 2). В составе хирономидных сообществ увеличивается численность фитофильных таксонов *Cricotopus* и *Zalutschia*. В целом, преобладают холодноводные стенотермные таксоны, такие как *Sergentia coracina*-type, *Zalutschia* type B и *Micropsectra insignilobus*-type и др. (см. рис. 3). Биоразнообразие в сообществах хирономид изменяется от 1,98 до 2,50, выравненность сообществ (индекс Пиелоу) 0,83–0,96. Реконструированные температуры изменяются от 9,7 до 13,11 °С. Реконструированные глубины составляют 3–7 м.

Ch III (4500–2500 кал. л. н.). Отмечается увеличение содержания органического вещества (TOC) в донных отложениях, при этом соотношение C/N практически не изменяется, и даже несколько уменьшается около 4500–3750 кал. л. н. Доминируют виды холодных и умеренных условий, предпочитающие обилие макрофитов (*Zalutschia* type B, *Limpophyes* – *Paralimpophyes*, *Cricotopus intersectus*-type) (см. рис. 3). Биоразнообразие сообществ остается высоким ( $H = 2,41$ – $2,74$ ); выравненность понижается ( $I = 0,59$ – $0,74$ ). Реконструированные температуры варьируют от 11,4 до 12,9. Реконструированные глубины составляют 4–5 м.

Ch IV (с 2500 кал. л. н. до настоящего времени). В составе донных отложений отмечается два периода смены седиментации (см. рис. 2): 2500–2250 и между 1500 и 1000 кал. л. н. – здесь отмечается увеличение песчаной фракции в составе донных отложений и резкое уменьшение органической составляющей. Око-

ло 1500 кал. л. н. темно-бурая мелкодисперсная глина сменяется сероватой алевритовой с темно-бурыми прослойками. В составе хирономидных сообществ значительно снижается роль *Sergentia coracina*-type и *Zalutschia* type B, доминирующими таксонами становятся профундальные и толерантные к закислению *Heterotrissocladius marcidus*-type, *Heterotrissocladius grimshawi*-type, *Heterotrissocladius maeaeri*-type 1 (см. рис. 3). Биоразнообразие и выравненность сообществ повышаются (индекс Шеннона 2,60–3,01; индекс Пиелоу 0,70–0,90). Реконструированные температуры изменяются от 12,8 до 14,3 °С. Средняя глубина около 5 м, в течение данного периода реконструированы сильные колебания глубины от 3 до 9 м.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Период с 7100 по 6250 кал. л. н. – начальная стадия развития озера. Соотношение углерода и азота (C/N) в донных отложениях указывает на большую долю аллохтонной составляющей в осадках (значения до 15), а колебания соотношения Rb/Sr отражают углубление водоема в результате термокарстовых процессов [Klemm et al., 2015]. Доминирующие в это время таксоны хирономид (*Sergentia coracina*-type и *Zalutschia zalutschicola*) являются относительно глубоководными и реагируют на динамику уровня воды – их количество уменьшается при обмелении водоема. Присутствие фитофильных таксонов свидетельствует о наличии заболоченных и заросших участков по берегам водоема.

До 6750 кал. л. н. реконструируемые среднеилюльские температуры воздуха ниже современных, а после этого времени становятся выше современного уровня. Данный период соответствует заключительной стадии среднеголоценового потепления. Около 6250 кал. л. н. реконструированные температуры фиксируют кратковременное похолодание. Одновременно, по данным анализа хирономидных сообществ, наблюдается кратковременное увеличение глубины озера, вероятно, вызванное усилением термокарстовых процессов и, как следствие, углублением котловины. Смена седиментации фиксиру-

ется в литостратиграфии донных отложений: преобладает крупнозернистый песчаный материал, принесенный с водосбора, вероятно, в результате разрушения берегов. В растительных сообществах также регистрируется реакция на кратковременное похолодание – в пыльцевых спектрах отмечается увеличение содержания пыльцы *Betula pana* и травянистых растений и уменьшение пыльцы *Larix* и *Alnus viridis*. На процесс заболачивания указывает увеличение *Menyanthes trifoliata* и содержания пыльцы осоковых [Klemm et al., 2015].

Во время среднеголоценового потепления на территории севера Сибири установились теплые, влажные условия, что способствовало активному развитию термокарстовых процессов, в результате которых и сформировалась котловина оз. Хатанга-12.

Период 6250–4500 кал. л. н. Наблюданное увеличение скорости седиментации, преобладание алевритов, а также снижение содержания органического углерода (ТОС) при смене в литологической структуре донных отложений крупнозернистой песчаной фракции, на мелкодисперсную (около 5500 кал. л. н.) является, по всей видимости, следствием углубления водоема и снижения скорости осадконакопления (см. рис. 2). Увеличение численности фитофильных и холодноводных степнотермных таксонов указывает на продолжающееся развитие процессов зарастания прибрежной зоны, что подтверждается также данными палинологии – в палиноспектрах отмечается постепенное увеличение доли осоковых [Klemm et al., 2015]. В этот период по данным хирономидного анализа реконструируется похолодание климата, которое находит отражение в состоянии экосистемы озера.

Данный период соответствует неогляциальному похолоданию, которое отмечалось в разных регионах Евразии и Северной Америки [Gribbin, Lem, 1980; Grove, 2004; Nazarova et al., 2013a; Hoff et al., 2015; Meyer et al., 2015]. Климат прохладный и влажный. Период с 7500 по 5300 лет назад являлся теплым, однако в некоторых регионах, например, в Гренландии, Альпах, горах Колорадо, тропиках Латинской Америки ледники наступали в период 6600–6000 кал. л. н. На-

чало нового этапа наступления ледников в глобальном масштабе (“неогляциал”), приходится на вторую половину голоцена. Оно совпадает с отступлением к югу северной границы леса и похолоданием арктических вод [MacDonald et al., 2000].

Период с 4500 до 2500 кал. л. н. Увеличение содержания органического вещества (ТОС), при стабильном соотношении C/N в этот период свидетельствует о преобладании автохтонной седиментации вследствие повышения биопродукции водоема (см. рис. 2). Глубина воды в озере довольно стабильна. Видовое разнообразие хирономид выше, чем в предыдущих периодах. Доминируют виды холодных и умеренных условий, предпочитающие обилие макрофитов (*Zalutschia* type B, *Limnophyes* – *Paralimnophyes*, *Cricotopus intersectus*-type) (см. рис. 3).

По данным спорово-пыльцевого анализа в растительных сообществах в данный период наблюдается постепенное уменьшение доли древесных растений и формирование тундровой растительности: снижается содержание пыльцы древесных растений, увеличивается содержание пыльцы карликовой бересклета и травянистых растений. Наблюдается смена лиственничной тайги на лесотундре (около 3500 кал. л. н.) [Klemm et al., 2015].

С 2500 кал. л. н. фиксируются колебания климатических условий и нестабильность развития природных обстановок. Значительные изменения отмечаются в растительных сообществах: около 2250 кал. л. н. наблюдается переход от лесотундры к кустарничковой тундре, постепенно уменьшается распространение лиственницы [Klemm et al., 2015].

Повышение роли профундальных и толерантных к закислению таксонов в хирономидных сообществах данного периода (*Heterotrissocladus marcidus*-type, *Heterotrissocladus grimshawi*-type, *Heterotrissocladus taeaeri*-type 1) скорее всего связано с увеличением глубины озера и увеличением поступления гуминовых кислот с поверхностным стоком [Ellenberg et al., 1992; Laing et al., 1999], что, в свою очередь, свидетельствует о развитии почвенно-растительного покрова на водосборе.

Реконструированные климатические условия близки к современным. С 2000 до

1200 кал. л. н. реконструировано увеличение температуры воздуха, а позже, 1200–900 кал. л. н., отмечается кратковременное похолодание климата.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования разреза донных отложений оз. Хатанга-12 позволили получить новую информацию о развитии палеоэкологических условий сектора Российской Арктики, с применением первой в России статистической температурной хирономидной модели. Получена качественная и количественная реконструкция климатических условий голоцен юго-восточной части п-ова Таймыр, а также выявлена периодизация в развитии экосистемы типичного для региона термокарстового водоема и связь этапов его развития с изменениями климата. На формирование экосистемы оз. Хатанга-12 в разные этапы его развития оказывали влияние климатические и криолитогенные факторы.

7100–6250 кал. л. н. – начальный этап образования озера. На формирование озерной экосистемы большое влияние оказывают термокарстовые процессы, связанные с высокой влажностью и достаточно теплыми климатическими условиями. В этот период фауна в основном реагирует на нестабильность лимнологических условий.

6500–4500 кал. л. н. – период похолодания, видовой состав отличается присутствием холодноводных стенотермных таксонов. Замедляются процессы автохтонной седиментации, донные отложения формируются за счет сноса и обрушения берегов. Глубина водоема возрастает.

4500–2500 кал. л. н. В начале периода наблюдается повышение средних июльских температур воздуха. В озере стабилизируется уровень воды, развиваются процессы эвтрофикации.

С 2500 кал. л. н. в донных отложениях отмечается увеличение доли органического вещества (ТОС) и уменьшение доли грубообломочного материала вследствие замедления термокарстовых процессов. Трофность водоема увеличивается. Реконструируемые условия близки к современным.

Работа выполнена в рамках и при финансовой поддержке гранта РНФ 16-17-10118. Часть лабораторных работ выполнена при поддержке программы DAAD “Михаил Ломоносов”, РГО-РФФИ № 13-05-41457 РГО, а также за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров. Авторы благодарят всех участников экспедиций в регион исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

- Биологические индикаторы в палеобиологических исследованиях: атлас. Казань: Казан. ун-т, 2013. 148 с.
- Barley E. M., Walker I. R., Kurek J. et al. A northwest North American training set: distribution of freshwater midges in relation to air temperature and lake depth // *J. Paleolimnol.* 2006. Vol. 36. P. 295–314.
- Bennett K. D. Determination of the number of zones in a biostratigraphical sequence // *New Phytologist*. 1996. N 132. P. 155–170.
- Blaauw M., Christen J. A. Flexible paleoclimate age – depth models using an autoregressive gamma process // *Bayesian Analysis*. 2011. N 6. P. 457–474.
- Brooks S. J. Fossil midges (Diptera: Chironomidae) as paleoclimatic indicator for the Eurasian region // *Quat. Sci. Rev.* 2006. N 25. P. 1894–1910.
- Brooks S. J., Langdon P. G., Heiri O. Using and identifying chironomid larvae in palaeoecology // QRA Technical Guide N 10. London: Quaternary Research Association, 2007. 276 p.
- Ellenberg H., Weber H. E., Düll R., Wirth V., Werner W., Paulissen D. Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa // *Scripta Geobotanica*. 1992. Bd. 18. P. 1–258.
- Frolova L. A., Nazarova L., Pestryakova L., Herzschuh U. 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*. 2013. N 6 (1). P. 1–11.
- Frolova L., Nazarova L., Pestryakova L., Herzschuh U. Subfossil cladoceran from sediment in thermokarst lakes in northeastern Siberia, Russia and their relationship to limnological and climatic variables // *J. Paleolimnol.* 2014. N 52 (1). P. 107–119.
- Gribbin J., Lem G. The Fluctuations of Climate during the Historical Period. Climatic Fluctuations. L.: Hydrometeoizdat, 1980. P. 102–121.
- Grove J. M. Little Ice Ages: Ancient and Modern. London: Routledge, 2004. (2 vol.). 718 p.
- Hoff U., Biskaborn B. K., Dirksen V., Dirksen O., Kuhn G., Meyer H., Nazarova L., Roth F., Diekmann B. Holocene Environment of Central Kamchatka, Russia: Implications from a multi-proxy record of Two-Yurts

- Lake // Global and Planetary Change. 2015. Vol. 134. P. 101–117.
- Hubberten H.-W., Andreev A., Astakhov V. I., Demidov I., Dowdeswell J. A., Henriksen M., Hjort C., Houmark-Nielsen M., Jakobsson M., Kuzmina S., Larsen E., Lunkka J. P., Lysa A., Mangerud J., Moller P., Saarnisto M., Schirrmeyer L., Sher A. V., Siegert C., Siegert M. J., Svendsen J. I. The periglacial climate and environment in northern Eurasia during the Last Glaciation // Quaternary Sci. Rev. 2004. N 23. P. 1333–1357.
- Juggins S. C2 Version 1.5 User guide. Software for ecological and palaeoecological data analysis and visualisation. Newcastle University, Newcastle upon Tyne, UK. 2007.
- Klemm J., Herzschuh U., Pestryakova L. A. Vegetation, climate and lake changes over the last 7000 years at the boreal treeline in northcentral Siberia // Quaternary Sci. Rev. 2015. Vol. 47. P. 422–434.
- Laing T. E., Rühland K. M., Smol J. P. Past environmental and climatic changes related to tree-line shifts inferred from fossil diatoms from a lake near the Lena River Delta, Siberia // Holocene. 1999. N 9. P. 547–557.
- Larocque I., Hall R. I., Grahn E. Chironomids as indicators of climatic and environmental change: A 100-lake training set from a subarctic region of northern Sweden (Lapland) // J. Paleolimnol. 2001. Vol. 26. P. 307–322.
- Lotter A. F., Juggins S. POLPROF, TRAN and ZONE: programs for plotting, editing and zoning pollen and diatom data. Inqua-Subcommission for the study of the Holocene // Working Group on Data-Handling Methods, Newsletter 6, 1991. P. 4–6.
- MacDonald D. D., Ingersoll C. G., Berger T. A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 2000. N 39 (1). P. 20–31.
- Mayewski P. A., Rohling E. E., Stager J. C., Karle'n W., Maasch K. A., Meeker L. D., Meyerson E. A., Gasse F., van Kreveld S., Holmgren K., Lee-Thorp J., Rosqvist G., Rack F., Staubwasser M., Schneider R. R., Steig E. J. Holocene climate variability // Quaternary Res. 2004. N 62. P. 243–255.
- Meyer H., Chaplgin B., Hoff U., Nazarova L., Diekmann B. Oxygen isotope composition of diatoms as Late Holocene climate proxy at Two-Yurts-Lake, Central Kamchatka, Russia // Global and Planetary Change. 2015. Vol. 134. P. 118–128.
- Nazarova L. B., Pestryakova L. A., Ushnitskaya L. A., Hubberten H.-W. Chironomids (Diptera: Chironomidae) in lakes of Central Yakutia and their indicative potential for paleoclimatic research // Contemporary Problems of Ecology. 2008. N 1. P. 335–345.
- Nazarova L., Herzschuh U., Wetterich S., Kumke T., Pestjakova L. Chironomid-based inference models for estimating mean July air temperature and water depth from lakes in Yakutia, northeastern Russia // J. Paleolimnol. 2011. N 45. P. 57–71.
- Nazarova L., de Hoog V., Hoff U., Diekmann B. Late Holocene climate and environmental changes in Kamchatka inferred from subfossil chironomid record // Quaternary Sci. Rev. 2013a. N 67. P. 81–92.
- Nazarova L., Lüpfert H., Subetto D., Pestryakova L., Diekmann B. Holocene climate conditions in Central Yakutia (North-Eastern Siberia) inferred from sediment composition and fossil chironomids of Lake Temje // Quaternary Int. 2013b. P. 264–274.
- Nazarova L., Self A., Brooks S. J., van Hardenbroek M., Herzschuh U., Diekmann B. Northern Russian chironomid-based modern summer temperature data set and inference models // Global and Planetary Change. 2015. N 134. P. 10–25.
- New M., Lister D., Hulme M., Makin I. A high-resolution data set of surface climate over global land areas // Climate Res. 2002. N 21. P. 1–25.
- Pielou E. C. The measurement of diversity in different types of biological collections // Theor. Biol. 1966. Vol. 13, Iss. 57. P. 131–144.
- R Development Core Team, R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical, 2013.
- Schirrmeyer L., Grosse G., Wetterich S., Overduin P. P., Strauss J., Schuur E. A. G., Hubberten H.-W. Fossil organic matter characteristics in permafrost deposits of the northeast Siberian Arctic // J. Geophys. Res. 2011. Vol. 116, G00M02. P. 1–16.
- Self A. E., Brooks S. J., Birks H. J. B. et al. The distribution and abundance of chironomids in high-latitude Eurasian lakes with respect to temperature and continentality: development and application of new chironomid-based climate-inference models in northern Russia // Quaternary Sci. Rev. 2011. Vol. 30. P. 1122–1141.
- Shannon C., Weaver W. The mathematical theory of communication. Illinois: Univ. Illinois 58. Press, 1963. 117 p.
- Smol J. P., Wolfe A. P., Birks H. J. B. et al. Climate-driven regime shifts in the biological communities of Arctic lakes // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2005. Vol. 102. P. 4397–4402.
- Solovieva N., Jones V. J., Nazarova L., Stephen J., Brooks S. V. Birks H. J. B., Grytnes J.-A., Appleby P. G., Kauppila T., Kondratenok B., Renberg I., Ponomarev V. Palaeolimnological evidence for recent climatic change in lakes from the northern Urals, arctic Russia // J. Palaeolimnol. 2005. Vol. 33. P. 463–482.
- Solovieva N., Jones V. J., Birks H. J. B., Appleby P. G., Nazarova L. Diatom responses to 20th century climate warming in lakes from the Northern Urals, Russia // Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol. 2008. N 259. P. 96–106.
- Sundqvist H. S., Kaufman D. S., McKay N. P., Balascio N. L., Briner J. P., Cwynar L. C., Sejrup H. P., Sepä H., Subetto D. A., Andrews J. T., Axford Y., Bakke J., Birks H. J. B., Brooks S. J., de Vernal A., Jennings A. E., Ljungqvist F. C., Rühland K. M., Saenger C., Smol J. P., Viau A. E. Arctic Holocene proxy climate database – new approaches to assessing geochronological accuracy and encoding climate variables // Clim. Past. 2014. N 10. P. 1605–1631.
- ter Braak C. J. F., Prentice I. C. A theory of gradient analysis // Advan in Ecol. Res. 1988. Vol. 18. P. 271–317.

Walker I. R. Tracking environmental change using lake sediments, Vol. 4: Zoological Indicators. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. P. 43–66.

Wiederholm T. Chironomidae of the Holarctic region. Keys and diagnoses. Part 1. Larvae // Entomologica Scandinavica. 1983. Suppl. 19. P. 1–457.

## **Reconstruction of Palaeoecological and Palaeoclimatic Conditions of the Holocene in the South of Taimyr Peninsula According to the Analysis of Lake Sediments**

L. S. SYRYKH<sup>1,5</sup>, L. B. NAZAROVA<sup>3,4,5</sup>, U. HERZSCHUH<sup>3,4</sup>, D. A. SUBETTO<sup>1,2,5</sup>, I. M. GREKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Herzen State Pedagogical University of Russia  
191186, Saint-Petersburg, emb. Moika, 48  
E-mail: lyudmilalsd@gmail.com

<sup>2</sup> Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre RAS  
185003, Petrozavodsk, Alexander Nevsky ave., 50

<sup>3</sup> University of Potsdam, Institute of Earth and Environmental Sciences  
14476, Potsdam-Golm, Karl-Liebknecht str. 24-25

<sup>4</sup> Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research  
14473, Potsdam, Telegrafenberg, A43

<sup>5</sup> Kazan (Volga) Federal University  
420000, Kazan, Kremlevskaya str., 18

We studied a sediment core from the lake Khatanga-12 (Taimyr Peninsula, Krasnoyarsk region). The core is 131.5 cm long and covers ca of 7100 years of sedimentation. In this study we performed a chironomid analysis, made a qualitative reconstruction of the paleoenvironment in the region and quantitative reconstructions of mean-July air temperature and lake water depth using Russian regional statistical chironomid-based models [Nazarova et al., 2008, 2011, 2015]. The lake was formed during the mid-Holocene warming as a result of thermokarst processes. Development of the ecosystem of the lake Khatanga-12 was influenced by climatic factors and cryolithogenic processes. Mid-Holocene warming around 7100–6500 cal. yrs BP activated thermokarst processes and resulted in formation of the lake basin. Cooling was reconstructed between 6500 and 4500 cal. yrs BP. The sediments of the lake during this period have been formed by erosion processes of the lake banks. After 2500 cal. yrs BP reconstructed conditions are close to modern.

**Key words:** Chironomidae, palaeolimnology, Holocene, climate reconstruction, Russian Arctic, Khatanga.