

ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ПЛАТО ПУТОРАНА ЗА ПОСЛЕДНИЕ 4000 ЛЕТ

Е.Ю. Новенко¹, Н.Г. Мазей², Д.А. Куприянов³, О.В. Руденко⁴, В.А. Баталова⁵, Е.Г. Нагорная⁶

^{1–3, 6} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения

¹ Институт географии РАН, отдел палеогеографии четвертичного периода, ст. науч. сотр.

⁴ Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, институт естественных наук и биотехнологии, кафедра географии, экологии и общей биологии

⁵ Геттингенский университет, кафедра палинологии и динамики климата

¹ Вед. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: lenanov@mail.ru

² Канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: natashamazei@mail.ru

³ Вед. инженер; e-mail: dmitriyкуприянов1994@yandex.ru

⁴ Доц., канд. геогр. наук; e-mail: olrudenko2011@yandex.ru

⁵ Аспирант; e-mail: vlada1996batalova@mail.ru

⁶ Вед. инженер; e-mail: nagornaya@geogr.msu.ru

В работе представлена детальная реконструкция растительности и условий окружающей среды на западе плато Путорана за последние 4000 лет. Получены новые палеоботанические данные и результаты анализа концентрации макрочастиц угля в кернах донных отложений двух озер, расположенных в лесном и гольцовом поясах гор. Хронологическая привязка результатов исследований основана на детальном радиоуглеродном AMS-датировании, возраст верхних горизонтов донных осадков установлен при помощи анализа изотопов $^{137}\text{Cs}/^{210}\text{Pb}$. Согласно полученным данным, природные условия на западе плато Путорана были близки к современным на протяжении прошедших 4000 лет. Однако в период между 3,1 и 2,5 тыс. кал. л. н. (тысяч календарных лет назад) установлено увеличение в нижних поясах плато пространств, занятых лесами и редколесьями из лиственницы, ели и березы, видимо в ответ на потепление климата. Для этого же периода выявлено возрастание числа и интенсивности пожаров в районе исследований. Наступившее затем похолодание привело к постепенной деградации лесной растительности и почти полному исчезновению из состава лесных сообществ ели и расширению площади тундровых группировок. Данные подсчетов макрочастиц угля в донных отложениях отражают низкую пожарную активность после 2,5 тыс. кал. л. н. вплоть до последних 200 лет. Во временном интервале 1,1–0,55 тыс. кал. л. н. поступление макрочастиц угля в озера не зафиксировано. В верхних горизонтах донных отложений озер, накопившихся в течение последних 200 лет, выявлен резкий рост концентрации макрочастиц угля до максимальных значений за весь изученный период, что отражает не имеющее аналогов за последние 4000 лет усиление пожарной активности.

Ключевые слова: растительность, спорово-пыльцевые спектры, пожары, озера, донные отложения

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних десятилетий исследованию Арктики уделяется повышенное внимание в связи с возрастающим интересом научного сообщества к глобальным климатическим изменениям и наблюдаемому потеплению климата, особо сильно проявляющемуся в высоких широтах [IPCC, 2019]. Один из важнейших инструментов реконструкции природной среды – палеолимнологические исследования [Суббето и др., 2017]. Поскольку озера являются уникальным природным архивом и содержат информацию об изменениях растительности, климата и окружающей среды, их изучению в приполярных областях Северной Евразии посвящено большое количество работ [Палеоклимат..., 2019].

Территория Сибири изучена значительно меньше, чем европейская часть России и арктические

регионы зарубежной Европы и Северной Америки, хотя потребность в детальной палеоэкологической информации велика. Исследования динамики растительности, климата и озерных экосистем приполярных областей в голоцене проводились на Таймыре [Антропоген Таймыра, 1982; Удачин и др., 2013; Большианов и др., 2013; Andreev et al., 2003, 2004a], в дельте р. Лены [Andreev, Klimanov, 2000; Andreev et al., 2004b, Biskaborn et al., 2013, 2016; Herzschuh et al., 2013], в Якутии [Пестрякова, 2008; Ушницкая и др., 2014; Pestryakova et al., 2012; Klemm et al., 2013, 2016; Müller et al., 2009; Nazarova et al., 2013] и на северо-востоке Сибири [Lozhkin, Anderson, 2013, 2020; Murton et al., 2017].

Подробная пыльцевая летопись и климатические реконструкции получены А.А. Андреевым с соавторами [Andreev et al., 2004a] по данным изучения

озера Лама на северо-западе плато Путорана. Детально изучены озера южной части полуострова Таймыр [Исследование..., 2006; Сырых и др., 2017]. Озера на севере плато исследовались сотрудниками Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ) [Палеоклимат..., 2019]. Западная часть плато Путорана до настоящего времени оставалась практически неизученной.

В данной работе представлены результаты, которые посвящены исследованию изменений природной среды в западной части плато Путорана в позднем голоцене. Особое внимание в наших исследованиях уделено реконструкции истории пожаров в регионе по данным изучения макроскопических частиц угля в озерных отложениях. Пожары оказывают большое воздействие на многолетнюю мерзлоту, лесные и тундровые экосистемы, а также существенное влияние на хозяйственную деятельность человека. Исследования палеопожаров в приполярных районах сосредоточены, в основном, на севере Канады, на Аляске [Vachula et al., 2020; Gajewski, 2021] и на севере европейской части России [Barhoumi et al., 2019; Barhoumi et al., 2020]. Этой теме в криолитозоне Сибири посвящено очень мало работ [Heim et al., 2019], а для плато Путорана представленные исследования – это первая подобная работа.

Цель нашей работы – детальная реконструкция динамики растительности и условий окружающей среды на западе плато Путорана за последние 4000 лет по данным изучения озерных отложений, выявление взаимосвязей между климатическими изменениями и пожарными режимами региона.

Район исследований. Горы Путорана – это крупное сильно-расчлененное плато высотой до 900–1200 м над уровнем моря на северо-западе Среднесибирского плоскогорья. Территория сложена палеозойскими толщами осадочных и вулканических пород. Наиболее важной составляющей геологического строения района исследований являются базальты трапповой формации горных пород триасового возраста [Исаченко, 1985]. Своеобразие рельефа территории образует сочетание уплощенных вершин, ступенчатых склонов и глубоко врезанных долин рек и озерных котловин [Янченко и др., 2010].

Плато Путорана лежит севернее Полярного круга в пределах крайней западной части Восточно-Сибирской субарктической климатической области и испытывает воздействие как Сибирского антициклона, так и атлантических воздушных масс. Это положение делает природу плато Путорана (особенно его северо-западной части, где сосредоточены наши исследования) чувствительной к климатическим изменениям. По наблюдениям на метеостанции Дудинка (1970–2012), среднегодовая температура составляет -9°C , средняя температура января и июля -34 и

$+12^{\circ}\text{C}$ соответственно, осадков выпадает 540 мм/год. Территория находится в пределах области сплошного распространения многолетней мерзлоты.

В растительности плато Путорана выделяют четыре высотных пояса: лесной, подгольцовый (субальпийский), гольцовый (альпийский) и пояс холодных каменистых пустынь. Верхняя граница леса на западе плато расположена на высоте 400–600 м. Лесной пояс плато Путорана относится к подзоне северной редкостойной тайги. Преобладающая древесная порода – лиственница даурская *Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen. В районе исследований широко распространены также смешанные редколесья из *Larix gmelinii*, лиственницы сибирской *L. sibirica* Ledeb., ели сибирской *Picea obovata* Ledeb. и березы пушистой *Betula pubescens* var. *pumila* (L.) Govaerts [Флора Путорана, 1976]. В низких сырых участках развиты лиственничные редины с березой карликовой *Betula nana* L. и ивой сизой *Salix glauca* L. в кустарниковом ярусе, встречаются небольшие участки со сфагновыми ельниками (*Picea obovata*). В подгольцовом поясе в хорошо дренированных местообитаниях преобладают кустарниковые заросли из ольхи кустарниковой *Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa* (Rupr.) Raus, можжевельника карликового *Juniperus communis* var. *saxatilis* Pall., *Betula nana* L. и горно-тундровые сообщества (кассиопеи четырехгранной *Cassiope tetragona* (L.) D. Don, дриады восьмилепестной *Dryas octopetala* L., водяники почти-голарктической *Empetrum nigrum* subsp. *subholarcticum* (V.N. Vassil.) Kuvaev. Вдоль русел рек развиты ивняки (ива лохматая *Salix lanata* L.). Гольцовый пояс занят тундровой растительностью. На вершинах гор выше 800 м встречаются разреженные растительные группировки из ивы полярной *Salix polaris* Wahlenb., новосиверсии ледяной *Geum glaciale* Adams ex Fisch., незабудки альпийской *Myosotis alpestris* var. *albicans* (Riedl) Y.J. Nasir, минуэртии крупноплодной *Minuartia macrocarpa* (Pursh) Ostenf., *Dryas octopetala* [Янченко, 2008].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Реконструкция изменения растительности и частоты лесных пожаров в позднем голоцене основана на результатах исследований кернов донных отложений двух озер, расположенных в разных высотных поясах в западной части плато Путорана. Полевые работы, бурение и отбор образцов в этих озерах были выполнены группой исследователей из Университетского колледжа в Лондоне в 2006 г. в рамках проекта, посвященного изучению экологии сообществ хирономид и созданию калибровочной модели для реконструкции палеоклимата [Self et al., 2015]. Для озерных колонок были получены радиоуглеродные датировки

и для верхних горизонтов проведено определение абсолютного возраста на основе содержания изотопа ^{210}Pb в отложениях. Однако после окончания проекта образцы озерных отложений оказались долгое время не востребованными и в 2019 г. были переданы для изучения на географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. Результаты этих исследований представлены в настоящей работе.

Изученные озера расположены в бассейне р. Хантайки (рис. 1). Первое из них – озеро Глухое – имеет площадь 230 га и расположено в широкой заболоченной долине в нижнем поясе гор ($68^{\circ}09'54''$ с. ш., $92^{\circ}10'23''$ в. д., 569 м над уровнем

моря). Второе озеро – это небольшой водоем без названия (в представленной работе мы обозначили его как озеро Безымянное), находится в 5 км к северу от Глухого ($68^{\circ}12'12''$ с. ш., $92^{\circ}10'44''$ в. д.) и занимает котловину размером 6,8 га на высоте 805 м над уровнем моря в гольцовом поясе гор. Озеро Глухое окружено лиственным редколесьем, в подлеске которого обильны *Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa* и *Betula nana* [Self et al., 2015]. Растительный покров вокруг озера Безымянного образован преимущественно лишайниками, в наиболее защищенных местообитаниях отмечены куртины ив.

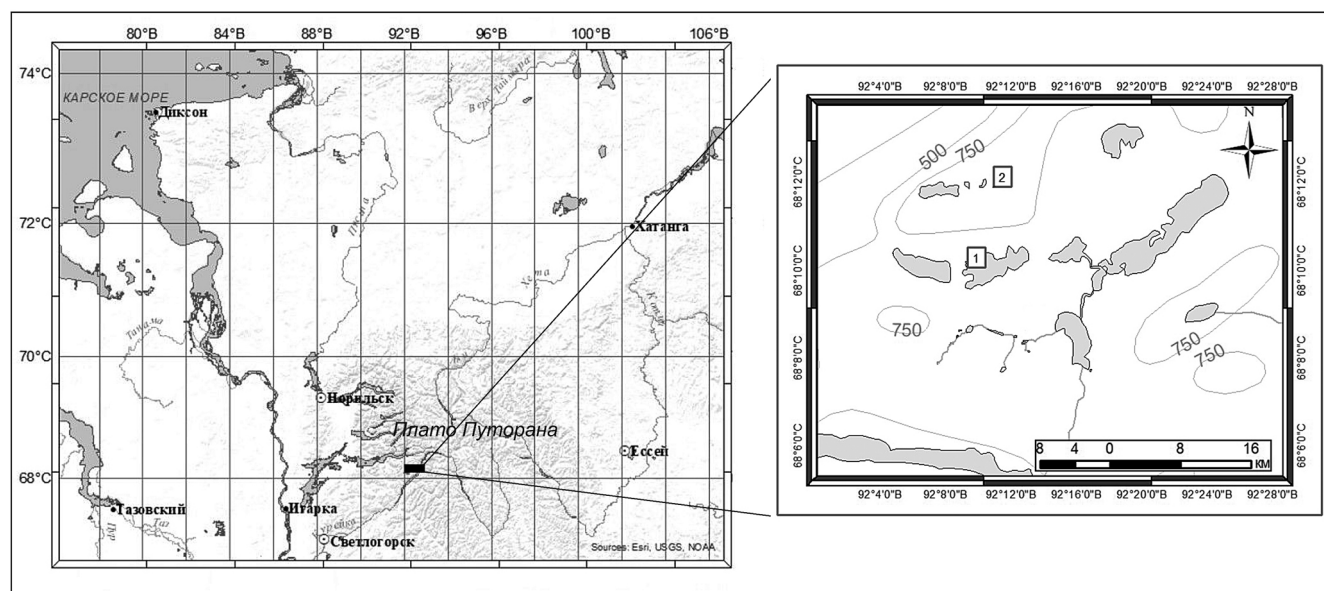


Рис. 1. Географическое положение района исследований. Цифрами обозначены изученные озера: 1 – Глухое; 2 – Безымянное

Fig. 1. Location of the study area. Numbers indicate studied lakes: 1 – the Glukhoe Lake; 2 – the Bezymyannoe Lake

Отбор образцов проводился в летний период 2006 г. в наиболее глубоких точках озер. Колонки донных отложений были отобраны при помощи бура HON-Kajak [Renberg, 1991] диаметром 70 мм. Исследованы приповерхностные донные отложения. В озере Глухом глубина скважины составила 32 см, в озере Безымянном – 34 см. В обоих озерах отложения представлены слабо консолидированной темно-серой гиттией.

Для колонок донных отложений изученных озер в лаборатории радиоуглеродного датирования NERC Radiocarbon Facility and SUERC AMS Laboratory (allocation number 1746.1013) были получены по три AMS-датировки (табл.). Дополнительно один образец из основания колонки донных отложений озера Глухого (глубина 31,75–32,00 см) был проанализирован в лаборатории Beta-Analytical, США [Self et al., 2015]. Датирование верхних 4–8 см осадка в обоих озерах было проведено при

помощи анализа изотопов $^{137}\text{Cs}/^{210}\text{Pb}$. Расчеты скорости седиментации в озерах были выполнены на основе возрастной модели отложений (рис. 2) при помощи программы Bacon [Blaauw, Christen, 2011] в программной среде R.

Образцы для спорово-пыльцевого анализа были подготовлены по стандартной методике [Moore et al., 1991]. При анализе помимо пыльцы и спор был проведен подсчет микрочастиц угля (линейные размеры <40 мкм). За 100% принята сумма пыльцы древесных пород (AP) и травянистых растений (NAP). В каждом образце подсчитано более 500 пыльцевых зерен и спор. Интервал отбора образцов для палинологического анализа составлял 3 см.

Реконструкция частоты пожаров проведена на основе анализа содержания макроскопических (размер >125 мкм) частиц угля в озерных отложениях [Conedera et al., 2009]. Методика выделения микрочастиц угля [Mooney, Tinner, 2011] включала

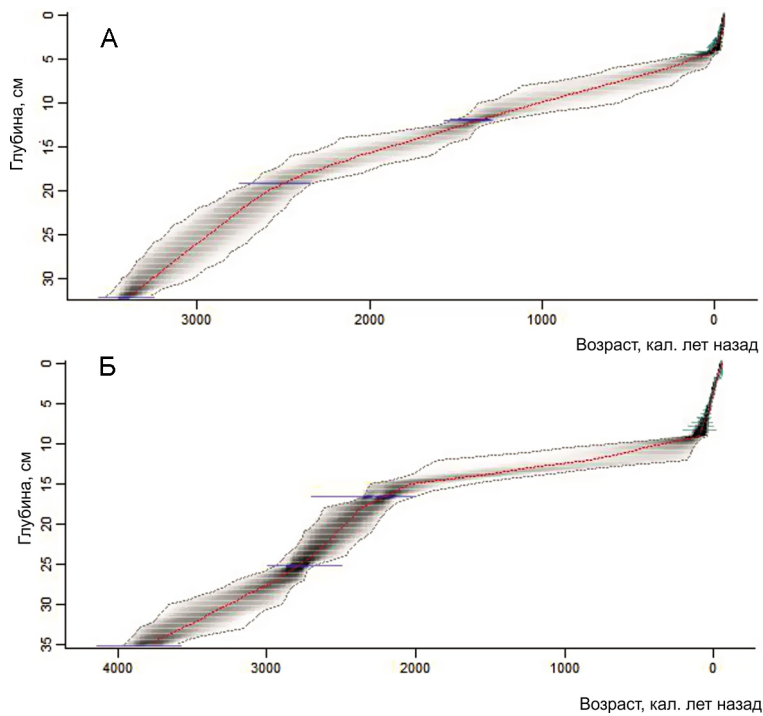


Рис. 2. Возрастные модели для донных отложений:
А – озеро Глухое; Б – озеро Безымянное

Fig. 2. Ade-depth model for bottom sediments in studied lakes:
А – the Glukhoe Lake; Б – the Bezemyannoe Lake

обработку образца объемом 1 см³ 10%-м водным раствором NaOCl в течение не менее 24 часов при комнатной температуре, промывание дистиллированной водой через сито с диаметром ячеек 125 мкм

и затем подсчет всех выделенных частиц угля под стереоскопическим микроскопом при 40-кратном увеличении. Отбор образцов осуществлялся непрерывно с шагом 1 см.

Для выявления регионального сигнала динамики лесных пожаров, определяемых фоновыми скоростями накопления частиц угля в отложениях, а также выявления локальных пожарных эпизодов (пожаров или их серий, происходивших в окрестностях озера [Conedera et al., 2009]) использовался программный пакет CharAnalysis [Higuera et al., 2007]. Программа позволяет производить расчет скорости накопления частиц угля (Charcoal accumulation rate, CHAR-индекс), а также определять фоновые и пороговые значения CHAR для отделения локального и регионального сигналов динамики лесных пожаров. При расчете фоновых и пороговых значений скоростей накопления частиц угля в отложениях, а также для выявления локальных пожарных эпизодов как метод сглаживания с периодом сглаживания 300 лет применялась LOWESS (локально взвешенная линейная регрессия). Период интерполяции данных составлял 25 лет.

Латинские названия растений даны по [The Plant List..., 2013], водорослей по [AlgaeBase, 2020].

Таблица

Результаты радиоуглеродного датирования отложений озер Глухое и Безымянное

Лабораторный номер образца	Глубина отбора образца, см	Радиоуглеродный возраст ¹⁴ C, л. н. (1σ)	Интервал калиброванного возраста 2σ, кал. л. н. (вероятность калибровки)
<i>Озеро Глухое</i>			
SUERC-51090	11,75–12,00	1527±35	1316–1322 (0,012) 1345–1478 (0,859) 1481–1517 (0,129)
SUERC-51091	19,00–19,25	2488±35	377–2380 (0,003) 2426–2724 (0,997)
SUERC-51092	26,25–26,50	2311±35	2157–2244 (0,254) 2300–2366 (0,734) 2392–2405 (0,012)
Beta-312807	31,75–32,00	3210±30	3371–3466 (0,991) 3475–3479 (0,009)
<i>Озеро Безымянное</i>			
SUERC-51098	16,50–16,75	2293±40	2155–2262 (0,464) 2298–2357 (0,536)
SUERC-51099	25,00–25,50	2663±40	2737–2851 (1,000)
SUERC-51100	33,00–33,50	3556±40	3701–3704 (0,072) 3716–3803 (0,296) 3812–3932 (0,631)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно полученным радиоуглеродным датировкам (см. табл.), отложения, вскрытые скважинами в озерах Безымянное и Глухое, начали накапливаться около 3,9 и 3,0 тыс. кал. л. н. соответственно.

Результаты спорово-пыльцевого анализа. Несмотря на положение озер в различных высотных поясах гор, состав и соотношение основных компонентов спорово-пыльцевых спектров на спорово-пыльцевых диаграммах обоих озер обладают высокой степенью сходства (рис. 3, 4).

Доля пыльцы деревьев и кустарников в спектрах изученных озер составляет 70–80% (см. рис. 3, 4). Такое высокое содержание пыльцы древесных растений в отложениях озера Безымянного указывает на ее возможный перенос горно-долинными ветрами из нижних поясов гор в верхние. Согласно определению возраста при помощи анализа изотопов $^{137}\text{Cs}/^{210}\text{Pb}$ в керне донных отложений озера Безымянного, его верхние 7 см накапливались в течение последних 140 лет, когда условия были близки к современным. Доля пыльцы деревьев и кустарников в этих отложениях достигает 80%, хотя это озеро находится в гольцовом поясе гор и окружено лишайниками и редкими куртинами высших растений.

В группе пыльцы древесных и кустарниковых растений преобладает пыльца кустарников *Betula nana* и *Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa* (40–60%), в небольшом количестве отмечена пыльца *Juniperus communis* var. *saxatilis* и *Salix*. Участие пыльцы деревьев (*Picea*, *Larix*, *Betula* sect. *Betula*, *Alnus* sp., *Abies* и *Pinus*) не превышает 10–20%. В спектрах из разрезов озера Глухого пыльца лиственницы отмечена в количестве 0,2–1,5%, а в спектрах озера Безымянного ее доля не превышает 1%, что близко к процентным соотношениям пыльцы *Larix* в поверхностных пробах севера Восточной Сибири, отобранных в лиственничных редколесьях и тундрах [Niemeyer et al., 2015]. Пыльца лиственницы очень плохо сохраняется в отложениях [Непомелуева, Дурягина, 1990], а пыльца *Larix gmelinii*, преобладающей древесной породы в районе исследований, может полностью разрушаться при фоссилизации (устное сообщение Болиховской Н.С.). Доля пыльцы древесных форм березы и ели составляет 10–20 и 3–5% соответственно, что адекватно отражает их участие в древостоях в нижнем поясе гор. В отложениях обнаружена также пыльца *Alnus* sp., *Abies*, *Pinus* subgen. *Diploxylon* и *P.* subgen. *Haploxydon*. В настоящее время в районе исследований эти древесные породы отсутствуют [Флора Путорана, 1976], но, возможно, они произрастали на западе плато Путорана ранее.

В группе пыльцы трав и кустарничков, доля которой варьирует от 15 до 25%, преобладает пыльца Cyperaceae, Poaceae и *Thalictrum* (7–10%), в небольшом количестве отмечена пыльца *Artemisia*, Apiaceae, Asteraceae, Rosaceae, Fabaceae, Onagraceae, Ranunculaceae, Ericales. Постоянные компоненты группы спор – *Selaginella selaginoides* (L.) P. Beauv. ex Mart. & Schrank, *Huperzia selago* (L.) Bernh. ex Schrank & Mart. и *Equisetum*, определены также споры *Lycopodium annotinum* L., *L. clavatum* L., Polypodiaceae и *Sphagnum*. В спектрах озер Безымянного и Глухого обильны зеленые водоросли, представленные *Pediastrum duplex* Meyen, *P. kawraiskii* Schmidle, *P. boryanum* (Turpin) Meneghini, *P. simplex* Meyen, *Botryococcus braunii* Kützinger и Zygnemataceae.

Несмотря на общую монотонность спорово-пыльцевых спектров и отсутствие резких изменений в соотношении их основных доминантов, спорово-пыльцевые диаграммы были разделены на зоны на основе кластерного анализа с помощью модуля CONISS в программе TILIA [Grimm, 1987]. В разрезах отложений изученных озер характеристики выделенных зон и их возрастные границы оказались очень близки, поэтому мы приняли общие для обоих озер обозначения и нумерацию пыльцевых зон Put-1–5.

Пыльцевая зона Put-1 представлена только в отложениях озера Безымянного (34–28 см, 3,9–3,1 тыс. кал. л. н.). Спектры этой зоны отличаются высоким содержанием пыльцы гипоарктических кустарников (*Betula nana*, *Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa*). В большом количестве отмечены водоросли, обильны микрочастицы угля.

Спорово-пыльцевые спектры зоны Put-2 (озеро Безымянное: 28–21 см, озеро Глухое: 20–26 см; 3,1–2,5 тыс. кал. л. н.) характеризуются относительно высокой долей пыльцы деревьев. В группе пыльцы травянистых растений и кустарничков рассматриваемой пыльцевой зоны отмечено увеличение содержания пыльцы Cyperaceae. В спектрах из отложений озера Безымянного заметно сократилось количество микрочастиц угля.

Участие пыльцы *Picea* и *Pinus* в спектрах донных осадков озер достигает 5–7%, пыльца древесной березы (*Betula* sect. *Betula* в диаграмме *Betula alba*-type) присутствует в количестве около 10%. Ель произрастает в районе исследований на северо-восточной границе своего ареала и в виде небольшой примеси участвует в лиственничных лесах в нижнем поясе гор [Флора Путорана, 1976]. Мы не располагаем данными по поверхностным спорово-пыльцевым спектрам западной части плато Путорана, поскольку такие исследования не проводились. Но исходя из закономерностей соотношения компонентов спектров в поверхностных пробах севера

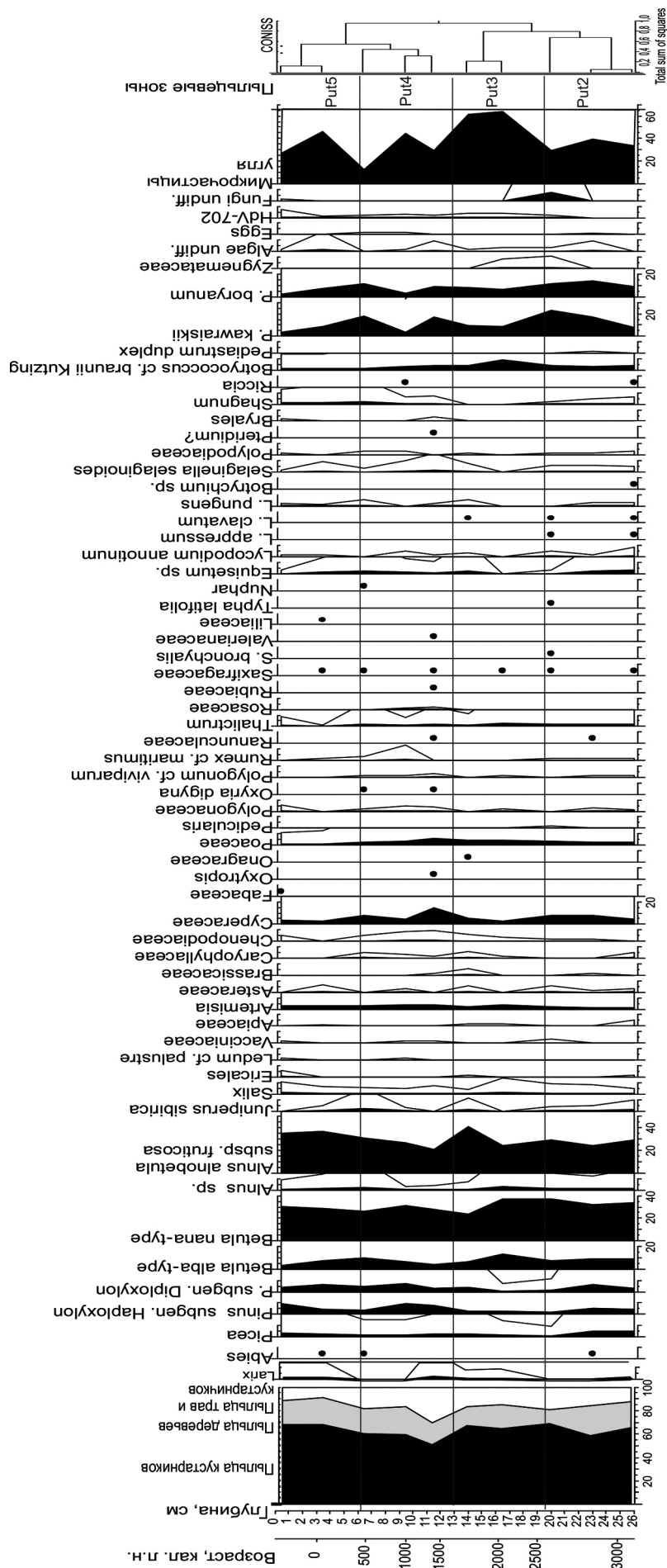


Рис. 3. Спорно-пыльцевая диаграмма разреза отложений озера Глухого

Fig. 3. Pollen diagram of the sediment core from the Glukhoe Lake

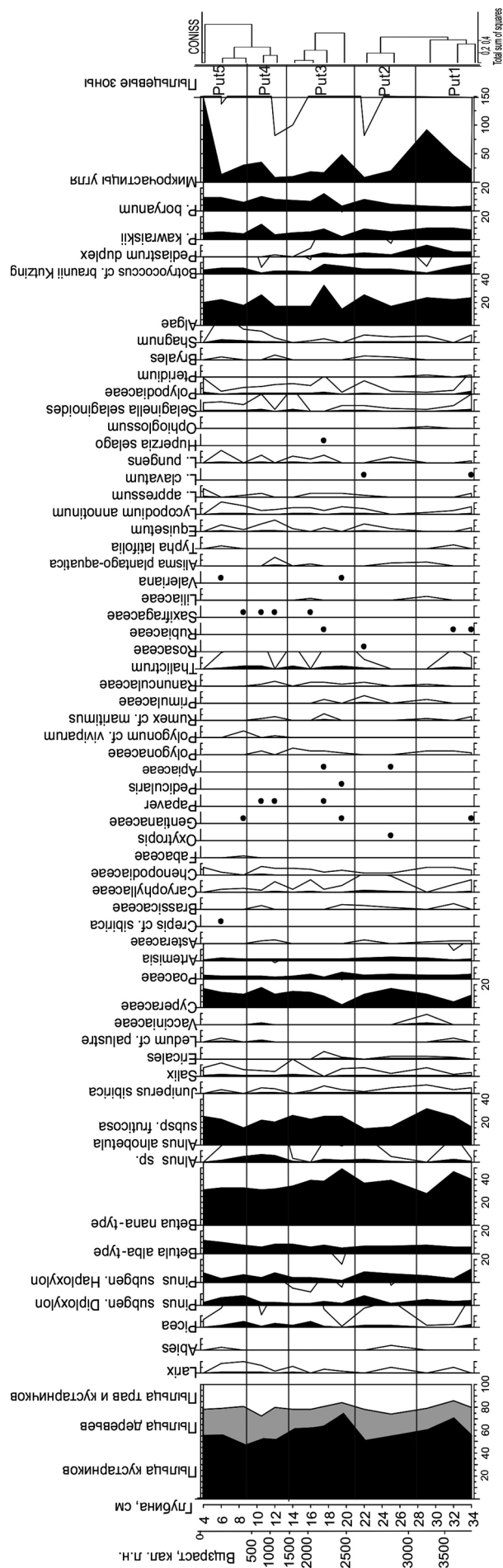


Рис. 4. Спорово-пыльцевая диаграмма разреза отложений озера Безымянного

Fig. 4. Pollen diagram of the sediment core from the Bezymannoe Lake

Восточной Сибири [Niemeyer et al., 2015] можно предположить, что увеличение доли пыльцы ели может служить индикатором ее большего участия в локальных растительных сообществах. В спектрах присутствует пыльца *Abies*, *Pinus* subgen. *Diploxylon* и *P.* subgen. *Haploxylon*, сейчас произрастающих в регионах, расположенных к юго-западу от района исследований. Возможно, рост их участия в спорово-пыльцевых спектрах отражает расширение их ареала на северо-запад. Но достоверных свидетельств их существования в окрестностях изученных озер пока нет. Здесь необходимы дальнейшие исследования макроостатков, устьиц хвой.

Пыльцевая зона Put-3 (озеро Безымянное: 21–14 см; озеро Глухое: 20–13 см; 2,5–1,5 тыс. кал. л. н.) характеризуется снижением доли пыльцы деревьев и одновременным увеличением обилия пыльцы кустарников (*Betula nana*, *Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa*), что, возможно, свидетельствует о частичной деградации лесной растительности и расширении площади тундровых группировок.

Пыльцевая зона Put-4 (озеро Безымянное: 14–9 см; озеро Глухое: 13–7 см; 1,5–0,2 тыс. кал. л. н.). Возраст верхней границы этой зоны, установленный по результатам датирования озерных отложений озера Глухого по короткоживущим изотопам ^{137}Cs и ^{210}Pb , определен как 1880 г. н. э. с погрешностью около 10 лет. Спорово-пыльцевые спектры отличаются возрастом доли пыльцы *Pinus* и большим разнообразием пыльцы травянистых растений. В спектрах из озера Глухого возрастает процентное соотношение спор *Selaginella selaginoides*.

Пыльцевая зона Put-5 (озеро Безымянное: 9–0 см; озеро Глухое: 7–0 см; 1880 г. н. э. – настоящее время) характеризует верхние горизонты донных отложений озер. В спектрах этой зоны заметно возрастает содержание пыльцы *Larix*, *Pinus*, *Betula* и *Picea*. Пыльца кустарников формирует отчетливый пик. В керне из озера Глухого доля пыльцы *Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa* достигает 50 и 30% от AP+NAP соответственно. Первые флористические исследования на западе плато Путорана были проведены Ф. Шмидтом в 1866 г. [Флора Путорана, 1976]. Эти исследования не выявили присутствия видов сосен во флоре района исследований, следовательно, мы можем заключить, что пыльца *Pinus* в этой зоне является заносной. В течение последнего столетия увеличивается концентрация микрочастиц угля. В отложениях озера Безымянного доля частиц угля достигает 150% от суммы пыльцы и спор.

Результаты изучения макроскопических частиц угля в озерных отложениях. Распределение скоростей накопления частиц угля в отложениях озера Глухого (рис. 5) показывает, что скорость аккумуляции частиц угля колеблется в интер-

ле от 0 до 0,22 частицы/(см²·год). В нижней части толщи отложений, соответствующей датировкам 3,0–2,5 тыс. кал. л. н., фоновая скорость аккумуляции частиц угля варьирует в интервале от 0,02 до 0,05 частицы/(см²·год) с максимальными значениями интерполированных значений около 0,07 частицы/(см²·год). Для данного временного интервала выделены три локальных пожарных эпизода. В период 2,5–0,25 тыс. кал. л. н. фоновая и интерполированная скорости аккумуляции частиц угля колеблются от 0 до 0,25 частицы/(см²·год), при этом для относительно незначительных всплесков скоростей накопления угля до 0,25 частицы/(см²·год) (1,7–1,9; 1,0–1,35 и 0,50–0,25 тыс. кал. л. н.) идентифицировано по одному локальному пожарному эпизоду. Последние 250 лет характеризуются резким ростом скоростей аккумуляции угля до значений 0,22 (фоновая скорость) и 0,31 частицы/(см²·год) (интерполированная скорость), что является максимальным значением для всей колонки озерных отложений. Для данного интервала выделен один локальный пожарный эпизод.

В колонке донных отложений озера Безымянного (рис. 5) распределение фоновых скоростей аккумуляции частиц угля отмечается в диапазоне 0 до 0,09 частицы/(см²·год). В нижней части анализируемой колонки озерных отложений, датированной от 3,9 до 3,0 тыс. кал. л. н., отмечаются фоновые скорости

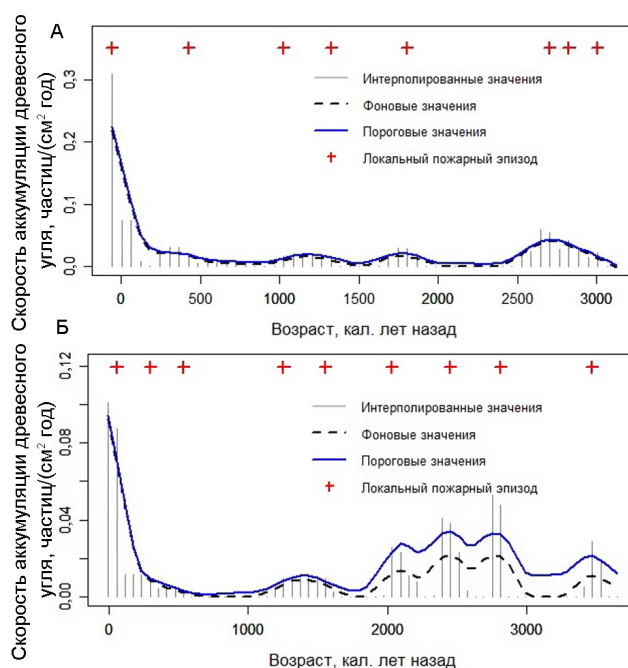


Рис. 5. Скорость накопления макроскопических частиц угля в отложениях: А – озера Глухого; Б – озера Безымянного

Fig. 5. Macroscopic charcoal accumulation rate in sediments of: A – the Glukhoe Lake; Б – the Bezemyannoe Lake

накопления частиц угля в диапазоне 0,01–0,02 частицы/(см²·год), при кратковременном всплеске интерполированных значений скорости аккумуляции угля в интервале 3,4–3,6 тыс. кал. л. н., которому соответствует один локальный пожар. В интервале 3,0–2,0 тыс. кал. л. н. назад скорости аккумуляции частиц угля возрастают и достигают значений 0,04 для фоновых скоростей и 0,05 частицы/(см²·год) для интерполированных. В этом интервале отмечаются три ярко выраженных периода увеличения скоростей накопления около 2,8; 2,4 и 2,05 тыс. кал. л. н., каждому из которых соответствует локальный пожарный эпизод. В период 2,0–1,1 тыс. кал. л. н. скорости аккумуляции частиц угля снижаются до значений 0–0,01 частицы/(см²·год) со слабо выраженным пиком 1,55–1,3 тыс. кал. л. н., которому соответствуют два локальных пожарных эпизода. В интервале 1,1–0,55 тыс. кал. л. н. скорости аккумуляции частиц угля практически равны нулю. Начиная примерно с 550 лет назад, отмечается постепенное увеличение фоновых и интерполированных скоростей аккумуляции частиц угля до 0,01 частицы/(см²·год) с двумя локальными пожарными эпизодами. В последние 170 лет скорости резко возрастают до 0,1 частицы/(см²·год), что также является максимальными значениями для всей анализируемой колонки.

Полученные результаты палинологических исследований по двум разрезам озерных отложений показали, что растительность западной части плато Путорана на протяжении последних 4000 лет была близка к современной, хотя климатические изменения позднего голоцена оказывали влияние на соотношение лесных и тундровых сообществ. Выявленные закономерности хорошо согласуются с реконструкциями растительности и климата, выполненными на основе детальных палинологических данных озера Лама, расположенного на северо-западе плато Путорана примерно в 130 км от района исследований [Andreev et al., 2004a]. Согласно этим данным, охватывающим позднеледниковье и весь голоцен, лесные сообщества в нижнем поясе гор достигали максимального развития в период между 7,2 и 5,2 тыс. кал. л. н., а затем началось постепенное сокращение площадей, занятых лесными ценозами. Большую роль стали играть кустарниковые сообщества и открытые пространства и уже к 2,5 тыс. кал. л. н. растительность приобрела современный облик. Климатические реконструкции также не выявили значительных колебаний температур и осадков, которые могли бы приводить к глубоким перестройкам условий окружающей среды [Andreev et al., 2004a; Self et al., 2015]. Согласно обобщению палеоклиматических данных в циркумполярной Арктике, выполненному по десяткам раз-

резов, в том числе на Таймыре и Восточной Сибири в рамках крупного международного проекта CAPE и сотрудниками ААНИИ, амплитуды колебаний температур в Сибирской арктической провинции были максимальны в раннем голоцене и постепенно сокращались от раннего голоцена к позднему [CAPE..., 2001; Палеоклимат..., 2019].

Несмотря на относительно однообразный состав спорово-пыльцевых спектров изученных озер, детальный анализ полученных данных и изучение концентрации макроскопических частиц угля позволили установить влияние климатических изменений на растительность и пожары в районе исследований. Как показали методические исследования в различных регионах, основная часть макроскопических частиц угля (с линейным размером >125 мкм) осаждается на расстоянии от нескольких сотен метров до 20 км в зависимости от типа, площади и интенсивности пожара [Higuera et al., 2007; Conedera et al., 2009]. И таким образом, полученные нами данные позволяют описать пожары, происходившие на территории, прилегающей к изученным озерам.

В период между 3,1 и 2,5 тыс. кал. л. н. изменение спорово-пыльцевых спектров и соотношение основных пыльцевых таксонов в озерных отложениях (зона Put-2), очевидно, отражают потепление климата и увеличение территории, занятой лесами и редколесьями в лесном и подгольцовом поясах плато. Результаты изучения макроскопических частиц угля показали увеличение их концентрации во временном интервале 3,0–2,5 тыс. кал. л. н. в озере Глухом и в интервале 3,0–2,0 тыс. кал. л. н. в озере Безымянном. Возрастание летних температур, вероятно, послужило причиной увеличения частоты возникновения пожароопасных погодных условий, что могло привести к усилению пожарной активности.

Похолодание климата около 2,5 тыс. кал. л. н., отчетливо прослеженное в реконструкции палеотемператур по данным анализа сообществ хирономид из изучаемых озер [Self et al., 2015], привело к частичной деградации лесной растительности и увеличению площади тундровых группировок (пыльцевая зона Put-3). Количество пожаров и концентрация макроскопических частиц угля в озерах понизились. Похолодание в этот период прослеживается и по палинологическим данным озер Таймыра [Палеоклимат..., 2019]. Реконструкции летних температур на основе древесно-кольцевых хронологий [Hantemirov, Shiyatov, 2002] и исследования патологических нарушений древесины лиственницы сибирской на Ямале [Хантемиров и др., 2011] также указывают на существенное похолодание в Арктике 2,7–2,5 тыс. кал. л. н.

В течение довольно длительного периода, начиная с 2,5 тыс. кал. л. н. и до последних 150 лет растительный покров развивался в направлении постепенного сокращения участия лесных сообществ в растительном покрове и усиления роли гипоарктических кустарников (*Betula nana*, *Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa*, *Salix*), тундровых кустарничков и трав. Показательно возрастание в спектрах из озера Глухого количества спор гипоарктомонтанного вида *Selaginella selaginoides*, что в сочетании с другими характеристиками спорово-пыльцевых спектров отражает увеличение безлесных сообществ (лугов, зарослей кустарников). По данным изучения озера Лама, похолодание климата Малого ледникового периода определено временным интервалом 520–90 лет назад [Палеоклимат..., 2019]. Полученные нами данные изучения озерных отложений не выявили существенных колебаний окружающей среды в течение последнего тысячелетия. Результаты спорово-пыльцевого анализа и подсчетов макрочастиц угля в целом отражают прохладные климатические условия и небольшое количество пожаров. В некоторые временные интервалы (например, 1,1–0,55 тыс. кал. л. н.) поступление макрочастиц угля в озерные отложения вообще не происходило. Согласно результатам дендрохронологических исследований и реконструкциям пожарных режимов по пожарным подсушинам на стволах деревьев, Малый ледниковый период характеризовался существенным сокращением числа пожаров в лиственных лесах криолитозоны Средней Сибири [Kharuk et al., 2011].

Концентрация макрочастиц угля в верхних горизонтах донных отложений озер Глухого и Безымянного, накопившихся в течение последних 200 лет, возросла до максимальных значений за весь поздний голоцен. В спорово-пыльцевых спектрах

из озера Безымянного зафиксирован также наиболее высокий пик содержания микрочастиц угля по сравнению с остальным временем накопления отложений изученного разреза, что отражает поступление угольных частиц не только на локальном, но на региональном уровне. Эти данные указывают на увеличение частоты и площадей пожаров в регионе на современном этапе. Однако причины и масштабы возрастания пожарной активности требуют дальнейших детальных исследований.

ВЫВОДЫ

На основе полученных палинологических данных и изучения вариаций концентрации макроскопических частиц угля в донных отложениях двух озер в западной части плато Путорана были сделаны следующие выводы.

Природные условия на западе плато Путорана были близки к современным на протяжении последних 4000 лет. Однако, в период между 3,1 и 2,5 тыс. кал. л. н. установлено увеличение доли лесной растительности в нижнем поясе гор и возрастание числа и интенсивности пожаров, что является откликом экосистемы на потепление климата. Наступившее затем направленное похолодание климата обусловило постепенную деградацию лесной растительности и расширение площади тундровых группировок, а также снижение пожарной активности вплоть до последних 200 лет. Заметные изменения природной среды отмечены в течение последнего столетия.

Концентрация макрочастиц угля в верхних горизонтах донных отложений озер, накопившихся в течение последних 200 лет, характеризуется максимальными значениями за весь изученный период, что отражает не имеющее аналогов за последние 4000 лет усиление пожарной активности.

Благодарности. Исследования выполнены при поддержке проекта РНФ № 20-17-00043.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антропоген Таймыра. М.: Наука, 1982. 184 с.
- Большаинов Д.Ю., Савельева Л.А., Пестрякова Л.А., Вахрамеева П.С., Баранская А.В. Методика извлечения палеогеографической информации из донных отложений арктического озера Севастьян-Кюеле // Известия Русского географического общества. 2013. Т. 145. № 2. С. 49–65.
- Исаченко А.Г. Ландшафты СССР. Л.: Издательство Ленинградского университета, 1985. 320 с.
- Исследование природы Таймыра. Вып. 5. Четвертичная история, климат, почвы, флора и растительность, животный мир / под ред. Зиганшина Р.А., Поспеловой Е.Б. Красноярск: Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2006. 190 с.
- Непомилуева Н.И., Дурагина Д.А. К истории лиственных лесов среднего Тимана в голоцене (Коми АССР) // Ботанический журнал. 1990. № 3. С. 326–335.
- Палеоклимат полярных областей Земли в голоцене / под ред. Большаинова Д.Ю., Веркулича С.Р. СПб.: ААНИИ, 2019. 204 с.
- Пестрякова Л.А. Диатомовые комплексы озер Якутии. Якутск: ГОУ ВПО «Якутский гос. ун-т им. М. К. Аммосова», 2008. 178 с.

- Субетто Д.А., Назарова Л.Б., Пестрякова Л.А., Сырых Л.С., Андроников А.В., Бискаборн Б., Дикманн Б., Кузнецов Д.Д., Сапелко Т.В., Греков И.М. Палеолимнологические исследования в российской части Северной Евразии: обзор // Сибирский экологический журнал. 2017. Т. 24. № 4. С. 369–380.
- Сырых Л.С., Назарова Л.Б., Херциу У., Субетто Д.А., Греков И.М. Реконструкция палеоэкологических и палеоклиматических условий голоцена на юге Таймыра по результатам анализа озерных донных отложений // Сибирский экологический журнал. 2017. № 4. С. 417–426.
- Удачин В.Н., Большинов Д.Ю., Вотяков С.Л., Киселева Д.В., Хворов П.В., Аминов П.Г., Иванов Ю.К. Первые данные о геохимии микроэлементов в донных отложениях арктического озера Кентэтурку (полуостров Таймыр) // Труды Института геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого. 2013. № 160. С. 356–359.
- Ушницкая Л.А., Пестрякова Л.А., Субетто Д.А., Троева Е.И. Морфометрическая характеристика озер Лено-Амгинского междуречья // Наука и Образование. 2014. № 4(76). С. 71–76.
- Флора Путорана: материалы к познанию особенностей состава и генезиса горных субаркт. флор Сибири / под ред. Малышева Л.И. Новосибирск: Наука, 1976. 245 с.
- Хантемиров Р.М., Горланова Л.А., Сурков А.Ю., Шиятов С.Г. Экстремальные климатические события на Ямале за последние 4100 лет по дендрохронологическим данным // Известия РАН. Сер. географическая. 2011. № 2. С. 89–102.
- Янченко З.А. Анализ локальной флоры окрестностей оз. Лама (Северо-Запад плато Путорана) // Вестник КрасГАУ. 2008. № 6. С. 97–102.
- Янченко З.А., Романов А.А., Герасименко В.Я. Геодинамические процессы, морфология, ландшафт и особенности высотной поясности гор Путорана // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 6. С. 355–365.
- Andreev A.A., Klimanov V.A. Quantitative Holocene climatic reconstruction from Arctic Russia, *Journal of Paleolimnology*, 2000, vol. 24, p. 81–91.
- Andreev A.A., Tarasov P.E., Klimanov V.A., Melles M., Lisitsyna O.M., Hubberten H.-W. Vegetation and climate changes around the Lama Lake, Taymyr Peninsula, Russia during the Late Pleistocene and Holocene, *Quaternary International*, 2004a, vol. 122, p. 69–84, DOI: 10.1016/j.quaint.2004.01.032.
- Andreev A., Tarasov P., Schwamborn G., Ilyashuk B., Ilyashuk E., Bobrov A., Klimanov V., Rachold V., Hubberten H.W. Holocene paleoenvironmental records from Nikolay Lake, Lena River Delta, Arctic Russia, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 2004b, vol. 209, p. 197–217.
- Andreev A.A., Tarasov P.E., Siegert C., Ebel T., Klimanov V.A., Melles M., Bobrov A.A., Dereviagin A.Yu., Lubinski D.J., Hubberten H.-W. Late Pleistocene and Holocene vegetation and climate on the northern Taymyr Peninsula, Arctic Russia, *Boreas*, 2003, vol. 32, p. 484–505, DOI: 10.1080/03009480310003388.
- Barhoumi C., Peyron O., Joannin S., Subetto D., Kryshen A., Drobyshev I., Girardin M.P., Brossier B., Paradis L., Pastor T., Alleaume S., Ali A.A. Gradually increasing forest fire activity during the Holocene in the northern Ural region (Komi Republic, Russia), *The Holocene*, 2019, vol. 29(12), p. 1906–1920, DOI: 10.1177/0959683619865593.
- Barhoumi C., Ali A.A., Peyron O., Dugerdil L., Borisova O., Golubeva Yu., Subetto D., Kryshen A., Drobyshev I., Ryzhkova N., Joannin S. Did long-term fire control the coniferous boreal forest composition of the northern Ural region (Komi Republic, Russia)? *J. Biogeogr.*, 2020, vol. 47, p. 2426–2441, DOI: 10.1111/jbi.13922.
- Biskaborn B.K., Herzschuh U., Zibulski R., Diekmann B., Bolshiyarov D., Savelieva L. Late Holocene thermokarst variability inferred from diatoms in a lake sediment record from the Lena delta, Siberian Arctic, *Journal of Paleolimnology*, 2013, vol. 49(2), p. 155–170.
- Biskaborn B.K., Subetto D.A., Savelieva L.A., Vakhrameeva P.S., Hansche A., Herzschuh U., Klemm J., Heinecke L., Pestryakova L.A., Meyer H., Kuhn G., Diekmann B. Late Quaternary vegetation and lake system dynamics in north-eastern Siberia: Implications for seasonal climate variability, *Quaternary Science Reviews*, 2016, vol. 147, p. 406–421, DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.08.014.
- Blaauw M., Christen J.A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process, *Bayesian Analysis*, 2011, vol. 6(3), p. 457–474.
- CAPE project members Holocene paleoclimate data from the Arctic: testing models of global climate change, *Quaternary Sci. Rev.*, 2001, vol. 20, p. 1275–1287.
- Conedera M., Tinner W., Neff C., Meurer M., Dickens A.F., Krebs P. Reconstructing past fire regimes: Methods, applications, and relevance to fire management and conservation, *Quaternary Science Reviews*, 2009, vol. 28, no. 5–6, p. 555–576.
- Gajewski K. Climate, fire and vegetation history at treeline east of Hudson Bay, northern Quebec, *Quaternary Science Reviews*, 2021, vol. 254, 106794, DOI: 10.1016/j.quascirev.2021.106794.
- Grimm E. CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares, *Computers, Geosciences*, 1987, vol. 13, p. 13–35, DOI: 10.1016/0098-3004(87)90022-7.
- Hantemirov R., Shiyatov S.G. A continuous multimillennial ring-width chronology in Yamal, northwestern Siberia, *The Holocene*, 2002, vol. 12(6), p. 717–727.
- Heim R.J., Bucharova A., Brodt L., Kamp J., Rieker D., Soromotin A.V., Yurtaev A., Hölzel N. Post-fire vegetation succession in the Siberian subarctic tundra over 45 years, *Science of The Total Environment*, 2021, vol. 760, 143425, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143425.
- Herzschuh U., Pestryakova L.A., Savelieva L.A., Heinecke L., Böhmer T., Biskaborn B.K., Andreev A., Ramisch A., Shinneman A.L.C., Birks H.J.B. Siberian larch forests and the ion content of thaw lakes form a geochemically functional entity, *Nature Communications*, 2013, vol. 4, p. 2408, DOI: 10.1038/ncomms3408.
- Higuera P.E., Peters M.E., Brubaker L.B., Gavin D.G. Understanding the origin and analysis of sediment-charcoal records with a simulation model, *Quaternary Science Reviews*, 2007, vol. 26, no. 13–14, p. 1790–1809.
- Kharuk V.I., Ranson K.J., Dvinskaya M.L., Im S.T. Wildfires in northern Siberian larch dominated communities, *Environmental Research Letters*, 2011, vol. 6, p. 045208, DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045208.
- Klemm J., Herzschuh U., Pestryakova L.A. Vegetation, climate and lake changes over the last 7000 years at the bo-

- real treeline in north-central Siberia, *Quaternary Science Reviews*, 2016, vol. 147, p. 422–434, DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.08.015.
- Klemm J., Herzschuh U., Pisaric M.F.J., Telford R.J., Heim B., Pestryakova L.A. A pollen-climate transfer function from the tundra and taiga vegetation in Arctic Siberia and its applicability to a Holocene record, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, vol. 386, p. 702–713, DOI: 10.1016/j.palaeo.2013.06.033.
- Lozhkin A., Anderson P. Late quaternary lake records from the Anadyr lowland, Central Chukotka (Russia), *Quaternary Science Reviews*, 2013, vol. 68, p. 1–16.
- Lozhkin A.V., Anderson P.M. Features of the formation of lakes in the cryogenic regions of the upper Kolyma, Northeast Siberia, *The Bulletin of the North-East Scientific Center*, 2020, vol. 5, p. 13–23.
- Müller S., Tarasov P.E., Andreev A.A., Diekmann B. Late Glacial to Holocene environments in the present-day coldest region of the Northern Hemisphere inferred from a pollen record of Lake Billyakh, Verkhoyansk Mts, NE Siberia, *Climate of the Past Discussions*, 2009, vol. 5, p. 73–84.
- Mooney S., Tinner W. The analysis of charcoal in peat and organic sediments, *Mires and Peat*, 2011, vol. 7, p. 1–18.
- Moore P.D., Webb J.A., Collinson M.E. Pollen Analysis. Blackwell, Oxford, 1991. 216 p.
- Murton J.B., Edwards M.E., Lozhkin A.V., Korzun J.A., Tsygankova V.I., Anderson P.M., Savvinov G.N., Danilov P.P., Boeskorov V., Bakulina N., Bondarenko O.V., Cherepanova M.V., Goslar T., Grigoriev S., Gubin S.V., Lupachev A.V., Zanina O.G., Tikhonov A., Vasilieva G.V. Preliminary paleoenvironmental analysis of permafrost deposits at Batagaika megaslump, Yana uplands, North-east Siberia, *Quaternary Research*, 2017, vol. 87, no. 2, p. 314–330.
- Nazarova L., Lüpfer H., Subetto D., Pestryakova L., Diekmann B. Holocene climate conditions in central Yakutia (Eastern Siberia) inferred from sediment composition and fossil chironomids of Lake Temje, *Quaternary International*, 2013, vol. 290–291, p. 264–274, DOI: 10.1016/j.quaint.2012.11.006.
- Niemeyer B., Klemm J., Pestryakova L.A., Herzschuh U. Relative pollen productivity estimates for common taxa of the northern Siberian Arctic, *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2015, vol. 221, p. 71–82, DOI: 10.1016/j.revpalbo.2015.06.008.
- Pestryakova L.A., Herzschuh U., Wetterich S., Ulrich M. Presentday variability and Holocene dynamics of permafrost-affected lakes in central Yakutia (Eastern Siberia) inferred from diatom records, *Quaternary Science Reviews*, 2012, vol. 51, p. 56–70.
- Renberg I. The HON-Kajak sediment corer, *Journal of Paleolimnology*, 1991, vol. 6, p. 167–170.
- Self A.E., Jones V.J., Brooks S.J. Late Holocene environmental change in arctic western Siberia, *The Holocene*, 2015, vol. 25, p. 150–165, DOI: 10.1177/0959683614556387.
- Vachula R.S., Sae-Lim J., Russell J.M. Sedimentary charcoal proxy records of fire in Alaskan tundra ecosystems, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, vol. 541, 109564, DOI: 10.1016/j.palaeo.2019.109564.
- Электронные ресурсы
 IPCC, 2019: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, URL: <https://www.ipcc.ch/srocc/cite-report/> (дата обращения 28.02.2021).
 The Plant List. Version 1.1, 2013, URL: <http://www.theplantlist.org/> (дата обращения 03.03.2021).
 AlgaeBase. National University of Ireland, Galway, 2020, URL: <https://www.algaebase.org> (дата обращения 03.03.2021).

Поступила в редакцию 21.03.2021

После доработки 03.06.2021

Принята к публикации 20.07.2021

ENVIRONMENTAL CHANGES IN THE WESTERN PART OF THE PUTORANA PLATEAU OVER THE PAST 4,000 YEARS

E.Yu. Novenko¹, N.G. Mazei², D.A. Kupriyanov³, O.V. Rudenko⁴, V.A. Batalova⁵, E.G. Nagornaya⁶

^{1–3, 6} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science

¹ Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Department of Quaternary Research, Senior Scientific Researcher

⁴ Orel State University named after I. S. Turgenyev, Institute of Earth Sciences and Bioengineering,
 Department of Geography, Ecology and General Biology

⁵ Georg-August-University Göttingen, Department of Palynology and Climate Dynamics

¹ Leading Scientific Researcher; D.Sc. in Geography; e-mail: lenanov@mail.ru

² Senior Scientific Researcher; Ph.D. in Biology; e-mail: natashamazei@mail.ru

³ Leading Engineer; e-mail: dmitriykupriyanov1994@yandex.ru

⁴ Associate Professor; Ph.D. in Geography; e-mail: olrudenko2011@yandex.ru

⁵ Ph.D. Student; e-mail: vlada1996batalova@mail.ru

⁶ Leading Engineer; e-mail: nagornaya@geogr.msu.ru

The paper presents a detailed reconstruction of vegetation and environmental conditions in the western part of the Putorana Plateau over the past 4,000 years. New paleobotanical data were obtained, as well as the results of the analysis of macroscopic charcoal particles in two cores of bottom sediments from the lakes located in forest and tundra belts of the plateau. Cores chronology is based on detailed AMS radiocarbon dating, and the uppermost layers of cores are dated by $^{137}\text{Cs}/^{210}\text{Pb}$ analysis. According to the data obtained, vegetation pattern in the study area was close to modern one over the past four millennia. However, between 3.1 and 2.5 ka BP (thousands of calendar years ago) an increase of the area of larch, spruce and birch forests and woodlands was recorded in the lower belts of the plateau, apparently in response to the climate warming.

During the same period the number and intensity of fires in the study area also increased. The subsequent cooling led to the gradual degradation of woodlands, almost complete disappearance of spruce from the forest communities, and the expansion of tundra communities. Macroscopic charcoal data for the bottom sediments indicate rather low fire activity since 2.5 ka BP up until recent 200 years. No input of macroscopic charcoal particles to the lakes was recorded for the time interval of 1.1–0.55 ka BP. A sharp increase of concentration of macroscopic charcoal particles in the upper horizons of bottom sediments that have accumulated over the recent 200 years up to the maximum values for the entire studied period reflects a growing fire activity that has no analogues over the past four thousand years.

Keywords: vegetation, spore-pollen spectra, fires, lakes, bottom sediments

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 20-17-00043).

REFERENCES

- Andreev A., Tarasov P., Schwamborn G., Ilyashuk B., Ilyashuk E., Bobrov A., Klimanov V., Rachold V., Hubberten H.W. Holocene paleoenvironmental records from Nikolay Lake, Lena River Delta, Arctic Russia, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 2004b, vol. 209, p. 197–217.
- Andreev A.A., Klimanov V.A. Quantitative Holocene climatic reconstruction from Arctic Russia, *Journal of Paleolimnology*, 2000, vol. 24, p. 81–91.
- Andreev A.A., Tarasov P.E., Klimanov V.A., Melles M., Lisitsyna O.M., Hubberten H.-W. Vegetation and climate changes around the Lama Lake, Taymyr Peninsula, Russia during the Late Pleistocene and Holocene, *Quaternary International*, 2004a, vol. 122, p. 69–84, DOI: 10.1016/j.quaint.2004.01.032.
- Andreev A.A., Tarasov P.E., Siegert C., Ebel T., Klimanov V.A., Melles M., Bobrov A.A., Dereviagin A.Yu., Lubinski D.J., Hubberten H.-W. Late Pleistocene and Holocene vegetation and climate on the northern Taymyr Peninsula, Arctic Russia, *Boreas*, 2003, vol. 32, p. 484–505, DOI: 10.1080/03009480310003388.
- Antropogen Tajmyra* [Anthropogen of the Taymyr Peninsula]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 184 p. (In Russian)
- Barhoumi C., Ali A.A., Peyron O., Dugerdil L., Borisova O., Golubeva Yu., Subetto D., Kryshen A., Drobyshev I., Ryzhkova N., Joannin S. Did long-term fire control the coniferous boreal forest composition of the northern Ural region (Komi Republic, Russia)? *J. Biogeogr.*, 2020, vol. 47, p. 2426–2441, DOI: 10.1111/jbi.13922.
- Barhoumi C., Peyron O., Joannin S., Subetto D., Kryshen A., Drobyshev I., Girardin M.P., Brossier B., Paradis L., Pastor T., Alleaume S., Ali A.A. Gradually increasing forest fire activity during the Holocene in the northern Ural region (Komi Republic, Russia), *The Holocene*, 2019, vol. 29(12), p. 1906–1920, DOI: 10.1177/0959683619865593.
- Biskaborn B.K., Herzschuh U., Zibulski R., Diekmann B., Bolshiyarov D., Savelieva L. Late Holocene thermokarst variability inferred from diatoms in a lake sediment record from the Lena delta, Siberian Arctic, *Journal of Paleolimnology*, 2013, vol. 49(2), p. 155–170.
- Biskaborn B.K., Subetto D.A., Savelieva L.A., Vakhrameeva P.S., Hansche A., Herzschuh U., Klemm J., Heinicke L., Pestryakova L.A., Meyer H., Kuhn G., Diekmann B. Late Quaternary vegetation and lake system dynamics in north-eastern Siberia: Implications for seasonal climate variability, *Quaternary Science Reviews*, 2016, vol. 147, p. 406–421, DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.08.014.
- Blaauw M., Christen J.A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process, *Bayesian Analysis*, 2011, vol. 6(3), p. 457–474.
- Bol'shiyarov D.Yu., Savel'eva L.A., Pestryakova L.A., Vakhrameeva P.S., Baranskaya A.V. Metodika izvlecheniya paleogeograficheskoy informacii iz donnyh otlozhenij arkticheskogo ozera Sevast'yan-Kyuele [Methods of extracting paleogeographic information from the bottom sediments of the arctic Sevastian-Kuele Lake], *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 2013, no. 145(2), p. 49–65. (In Russian)
- CAPE project members Holocene paleoclimate data from the Arctic: testing models of global climate change, *Quaternary Sci. Rev.*, 2001, vol. 20, p. 1275–1287.
- Conedera M., Tinner W., Neff C., Meurer M., Dickens A.F., Krebs P. Reconstructing past fire regimes: Methods, applications, and relevance to fire management and conservation, *Quaternary Science Reviews*, 2009, vol. 28, no. 5–6, p. 555–576.
- Flora Putorana: materialy k poznaniyu osobennostej sostava i genezisa gornyh subarkt. flor Sibiri* [Flora of the Putorana Plateau: materials for understanding the composition and genesis of mountain subarctic floras of Siberia], Malysheva L.I. (ed.), Novosibirsk, Nauka Publ., 1976, 245 p. (In Russian)
- Gajewski K. Climate, fire and vegetation history at treeline east of Hudson Bay, northern Quebec, *Quaternary Science Reviews*, 2021, vol. 254, 106794, DOI: 10.1016/j.quascirev.2021.106794.
- Grimm E. CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares, *Computers, Geosciences*, 1987,

- vol. 13, p. 13–35, DOI: 10.1016/0098-3004(87)90022-7.
- Hantemirov R., Shiyatov S.G. A continuous multimillennial ring-width chronology in Yamal, northwestern Siberia, *The Holocene*, 2002, vol. 12(6), p. 717–727.
- Hantemirov R.M., Gorlanova L.A., Surkov A.Yu., Shiyatov S.G. Ekstremal'nye klimaticheskie sobytiya na Yamale za poslednie 4100 let po dendrokhronologicheskim dannym [Extreme climatic events in the Yamal Peninsula over the last 4100 years according to dendrochronological data], *Izvestiya RAN. Ser. geograficheskaya*, 2011, no. 2, p. 89–102. (In Russian)
- Heim R.J., Bucharova A., Brodt L., Kamp J., Rieker D., Soromotin A.V., Yurtaev A., Hölzel N. Post-fire vegetation succession in the Siberian subarctic tundra over 45 years, *Science of The Total Environment*, 2021, vol. 760, 143425, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143425.
- Herzschuh U., Pestryakova L.A., Savelieva L.A., Heinecke L., Böhmer T., Biskaborn B.K., Andreev A., Ramisch A., Shinneman A.L.C., Birks H.J.B. Siberian larch forests and the ion content of thaw lakes form a geochemically functional entity, *Nature Communications*, 2013, vol. 4, p. 2408, DOI: 10.1038/ncomms3408.
- Higuera P.E., Peters M.E., Brubaker L.B., Gavin D.G. Understanding the origin and analysis of sediment-charcoal records with a simulation model, *Quaternary Science Reviews*, 2007, vol. 26, no. 13–14, p. 1790–1809.
- Isachenko A.G. *Landshafty SSSR* [Landscapes of the USSR], Leningrad, Leningrad University Press, 1985, 320 p. (In Russian)
- Issledovanie prirody Tajmyra. Vypusk 5. Chetvertichnaya istoriya, klimat, pochvy, flora i rastitel'nost', zhivotnyy mir* [Study of the nature of Taimyr. Issue 5. Quaternary history, climate, soils, flora and vegetation, wildlife], R.A. Ziganshina, E.B. Pospelovoj (eds.), Krasnoyarsk, Sukachev Institute of Forest SB RAN, 2006, 190 p. (In Russian)
- Kharuk V.I., Ranson K.J., Dvinskaya M.L., Im S.T. Wildfires in northern Siberian larch dominated communities, *Environmental Research Letters*, 2011, vol. 6, p. 045208, DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045208.
- Klemm J., Herzschuh U., Pestryakova L.A. Vegetation, climate and lake changes over the last 7000 years at the boreal treeline in north-central Siberia, *Quaternary Science Reviews*, 2016, vol. 147, p. 422–434, DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.08.015.
- Klemm J., Herzschuh U., Pisaric M.F.J., Telford R.J., Heim B., Pestryakova L.A. A pollen-climate transfer function from the tundra and taiga vegetation in Arctic Siberia and its applicability to a Holocene record, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, vol. 386, p. 702–713, DOI: 10.1016/j.palaeo.2013.06.033.
- Lozhkin A., Anderson P. Late quaternary lake records from the Anadyr lowland, Central Chukotka (Russia), *Quaternary Science Reviews*, 2013, vol. 68, p. 1–16.
- Lozhkin A.V., Anderson P.M. Features of the formation of lakes in the cryogenic regions of the upper Kolyma, Northeast Siberia, *The Bulletin of the North-East Scientific Center*, 2020, vol. 5, p. 13–23.
- Mooney S., Tinner W. The analysis of charcoal in peat and organic sediments, *Mires and Peat*, 2011, vol. 7, p. 1–18.
- Moore P.D., Webb J.A., Collinson M.E. Pollen Analysis. Blackwell, Oxford, 1991, 216 p.
- Müller S., Tarasov P.E., Andreev A.A., Diekmann B. Late Glacial to Holocene environments in the present-day coldest region of the Northern Hemisphere inferred from a pollen record of Lake Billyakh, Verkhoyansk Mts, NE Siberia, *Climate of the Past Discussions*, 2009, vol. 5, p. 73–84.
- Murton J.B., Edwards M.E., Lozhkin A.V., Korzun J.A., Tsygankova V.I., Anderson P.M., Savvinov G.N., Danilov P.P., Boeskorov V., Bakulina N., Bondarenko O.V., Cherepanova M.V., Goslar T., Grigoriev S., Gubin S.V., Lupachev A.V., Zanina O.G., Tikhonov A., Vasilieva G.V. Preliminary paleoenvironmental analysis of permafrost deposits at Batagaika megaslump, Yana uplands, Northeast Siberia, *Quaternary Research*, 2017, vol. 87, no. 2, p. 314–330.
- Nazarova L., Lüpfer H., Subetto D., Pestryakova L., Diekmann B. Holocene climate conditions in central Yakutia (Eastern Siberia) inferred from sediment composition and fossil chironomids of Lake Temje, *Quaternary International*, 2013, vol. 290–291, p. 264–274, DOI: 10.1016/j.quaint.2012.11.006.
- Nepomilueva N.I., Duryagina D.A. K istorii listvennichnikov srednego Timana v golocene (Komi ASSR) [On the Holocene history of larch forests in the Middle Timan (Komi ASSR)], *Botanicheskij zhurnal*, 1990, no. 3, p. 326–335. (In Russian)
- Niemeyer B., Klemm J., Pestryakova L.A., Herzschuh U. Relative pollen productivity estimates for common taxa of the northern Siberian Arctic, *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2015, vol. 221, p. 71–82, DOI: 10.1016/j.revpalbo.2015.06.008.
- Paleoklimat polyarnykh oblastej Zemli v golocene* [The Holocene paleoclimate of the Earth's polar regions], D.Yu. Bol'shiyanova, S.R. Verkulicha (eds.), St. Petersburg, AANII, 2019, 204 p. (In Russian)
- Pestryakova L.A. *Diatomovye komplekсы ozer Yakutii* [Diatom complexes of lakes in Yakutia], Yakutsk, Yakutsk State University by M.K. Ammosova Publ., 2008, 178 p. (In Russian)
- Pestryakova L.A., Herzschuh U., Wetterich S., Ulrich M. Presentday variability and Holocene dynamics of permafrost-affected lakes in Central Yakutia (Eastern Siberia) inferred from diatom records. *Quaternary Science Reviews*, 2012, vol. 51, p. 56–70.
- Renberg I. The HON-Kajak sediment corer, *Journal of Paleolimnology*, 1991, vol. 6, p. 167–170.
- Self A.E., Jones V.J., Brooks S.J. Late Holocene environmental change in arctic western Siberia, *The Holocene*, 2015, vol. 25, p. 150–165, DOI: 10.1177/0959683614556387.
- Subetto D.A., Nazarova L.B., Pestryakova L.A., Syryh L.S., Andronikov A.V., Biskaborn B., Diekmann B., Kuznetsov D.D., Sapelko T.V., Grekov I.M. Paleolimnologicheskie issledovaniya v rossijskoj chasti Severnoj Evrazii: obzor [Paleolimnological studies in the Russian part of Northern Eurasia: review], *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 2017, no. 4, p. 369–380. (In Russian)
- Syrykh L.S., Nazarova L.B., Hercshu U., Subetto D.A., Grekov I.M. Rekonstrukciya paleoekologicheskikh i paleoklimaticheskikh uslovij golocena na yuge Tajmyra po rezul'tatam analiza ozernykh donnykh otlozhenij [Reconstruction of paleoecological and paleoclimatic conditions of the Holocene in the southern Taimyr Peninsula according to the results of the analysis of lake bottom sediments], *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 2017, no. 4, p. 417–426. (In Russian)
- Udachin V.N., Bol'shiyanov D.Yu., Votyakov S.L., Kiseleva D.V., Hvorov P.V., Aminov P.G., Ivanov Yu.K. Pervye

- dannye o geohimii mikroelementov v donnyh otlozheniyah arkticheskogo ozera Kenteturku (poluostrov Tajmyr) [The first data on the geochemistry of trace elements in the bottom sediments of the arctic Kenteturku Lake (the Taimyr Peninsula)], *Trudy Instituta geologii i geohimii im. akademika A.N. Zavarickogo*, 2013, no. 160, p. 356–359. (In Russian)
- Ushnickaja L.A., Pestrjakova L.A., Subetto D.A., Troeva E.I. Morfometricheskaja harakteristika ozer Leno-Amginskogo mezhdurech'ja [Morphometric characteristics of lakes within the Lena-Amga interfluvium], *Nauka i Obrazovanie*, 2014, no. 4(76), p. 71–76. (In Russian)
- Vachula R.S., Sae-Lim J., Russell J.M. Sedimentary charcoal proxy records of fire in Alaskan tundra ecosystems, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, vol. 541, 109564, DOI: 10.1016/j.palaeo.2019.109564.
- Yanchenko Z.A. Analiz lokal'noj flory okrestnostej oz. Lama (Severo-Zapad plato Putorana) [Analysis of the local flora of the Lama Lake surroundings (North-West of the Putorana Plateau)], *Vestnik KrasGAU*, 2008, no. 6, p. 97–102. (In Russian)
- Yanchenko Z.A., Romanov A.A., Gerasimenko V.Ya. Geodinamicheskie processy, morfologiya, landshaft i osobennosti vysotnoj pojasnosti gor Putorana [Geodynamic processes, morphology, landscape and specific features of the altitudinal zonality of the Putorana Mountains], *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*, 2010, no. 6, p. 355–365. (In Russian)
- Web sources*
- AlgaeBase. National University of Ireland, Galway, 2020, URL: <https://www.algaebase.org> (access date 03.03.2021).
- IPCC, 2019: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, URL: <https://www.ipcc.ch/srocc/cite-report/> (access date 28.02.2021).
- The Plant List. Version 1.1, 2013, URL: <http://www.theplantlist.org/> (access date 03.03.2021).

Received 21.03.2021

Revised 03.06.2021

Accepted 20.07.2021