

ВЛИЯНИЕ ПОЖАРОВ НА ДИНАМИКУ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЭВЕНКИИ В ПОСЛЕДНИЕ 3500 ЛЕТ

Н.Г. Мазей¹, А.С. Прокушкин², Д.А. Куприянов³, Е.Ю. Новенко⁴

^{1,3,4} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения*

² *Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН»*

⁴ *Институт географии РАН, отдел палеогеографии четвертичного периода, ст. науч. с.*

¹ *Канд. биол. н., ст. науч. с.; e-mail: natashamazei@mail.ru*

² *Канд. биол. н., зав. лабораторией; e-mail: prokushkin@ksc.krasn.ru*

³ *Аспирант; e-mail: dmitriyкуприянов1994@yandex.ru*

⁴ *Докт. геогр. н., вед. науч. с.; e-mail: lenanov@mail.ru*

В статье представлены результаты реконструкций растительности и частоты пожаров за последние 3,5 тыс. лет в среднем течении р. Нижней Тунгуски (Центральная Эвенкия) на основе комплексного исследования разреза заболоченного лиственничника на территории Эвенкийского стационара Института леса имени В.Н. Сукачева СО РАН. Получены новые палеоботанические данные и результаты анализа концентрации макрочастиц угля в отложениях, выполнено детальное радиоуглеродное датирование разреза.

На примере изученной локальной экосистемы показано, что пожары – важный фактор эволюции лесных геосистем криолитозоны Средней Сибири, и в позднем голоцене они способствовали развитию процесса заболачивания. Выделено пять этапов изменения периодичности пожаров. В течение первого этапа (3600–2700 кал. л. н.) межпожарный интервал составлял 150 лет и затем увеличился на протяжении следующего этапа с 2700–1500 кал. л. н. до 300 лет. В интервале 1500–700 кал. л. н., включающем потепление климата средневекового климатического оптимума, межпожарный интервал сократился до 115 лет. Резкое и глубокое похолодание Малого ледникового периода 700–200 кал. л. н. привело к сокращению числа пожаров, межпожарный интервал составил 275 лет. Полученные данные показали, что за рассмотренный период (3,5 тыс. лет) максимальных значений частота лесных пожаров на изучаемой территории достигла в последние 200 лет. Межпожарный интервал составляет около 80 лет, что близко к его среднему значению, восстановленному по дендрохронологическим данным в районе исследований за тот же период. Согласно проведенным реконструкциям, частота пожаров была выше в теплые интервалы позднего голоцена и понижалась в холодные этапы. Сделано предположение, что в условиях более короткого и, возможно, более холодного лета в периоды похолоданий в результате снижения испарения происходило увеличение грунтовой влажности во многих местообитаниях, что неблагоприятно для возникновения и распространения лесных пожаров.

Ключевые слова: анализ макрочастиц угля, палеоботанические данные, заболачивание лесов

ВВЕДЕНИЕ

Пожары – один из важнейших экологических факторов преобразования лесных экосистем [Санников, Санникова, 2009]. За последние десятилетия накоплены многочисленные данные о значительном влиянии лесных пожаров на возрастную структуру и функционирование лесов Сибири, полученные на основе анализа архивных документов, результатов стационарных наблюдений и дендрохронологических исследований [Харук и др., 2005; Валендик и др., 2014; Kharuk et al., 2011; Klotte et al., 2019; Kirdeyanov et al., 2020]. В криолитозоне Средней Си-

бири, где господствующими типами леса являются лиственничники, пирогенная динамика геосистем приобретает ведущее значение в формировании их видовой и возрастной структуры, поскольку для лиственничных лесов характерна высокая природная пожарная опасность [Sofronov, Volokitina, 2010]. Большинство лиственничных лесов Средней Сибири представляет собой сообщества, находящиеся в разных стадиях восстановительных постпирогенных сукцессий [Кривобоков, Зверев, 2015]. По данным дендрохронологических исследований в северной тайге Средней Сибири межпожарный ин-

тервал колеблется примерно от 60 до 140 лет в зависимости от ландшафтной позиции территории и в последнее столетие имеет тенденцию к сокращению [Харук и др., 2005]. Согласно информации Министерства лесного хозяйства Красноярского края, за последние 10 лет около 5% территории Красноярского края были пройдены лесными пожарами, обусловленными как деятельностью человека, так и климатическими причинами. В этой связи реконструкция режимов естественных пожаров в голоцене на временном отрезке, лежащем за пределами возможностей дендрохронологического метода и исторических наблюдений, является актуальной задачей для понимания роли пожаров в формировании лесных сообществ и их эволюции.

К наиболее часто применяемым методам изучения частоты и интенсивности пожаров в голоцене, как в Евразии, так и в Северной Америке, относится изучение концентрации частиц угля различной размерности в отложениях озер и болот [Pitänen et al., 2001; Whitlock et al., 2010; Clear et al., 2014; Novenko et al., 2016; Feurdean et al., 2020], определение породного состава и радиоуглеродное датирование фрагментов древесных углей в почве [Kasin et al., 2013; Bobrovsky et al., 2019]. Часто эти методы применяются в сочетании с другими палеоэкологическими подходами при реконструкции изменений компонентов природной среды в прошлом. Исследования влияния пожаров на растительность и состояние многолетней мерзлоты в Якутии и на северо-востоке Сибири показали эффективность использования изменения концентрации частиц угля в отложениях как индикатора палеопожаров. Выявлена тенденция к повышению числа пожаров при потеплении климата. Изучение природных пожаров на глобальном уровне показало, что их частота возрастала в теплые и сухие периоды голоцена и существенно сокращалась при снижении температуры и увеличении влажности климата [Power et al., 2008; Molinari et al., 2013].

Исследования, результаты которых представлены в данной работе, проведены в среднем течении Нижней Тунгуски на территории Эвенкийского стационара Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. Растительный покров, пространственно-временная организация лесных экосистем, основные направления лесообразовательного процесса этого региона хорошо изучены [Прокушкин и др., 2008, 2010; Кривобоков, Зверев, 2015; Карпенко, 2013]. Большое внимание в исследованиях, проводимых на стационаре, уделено влиянию лесных пожаров на трансформацию и миграцию питательных веществ, на флористическое разнообразие лесных сообществ криолитозоны и их послепожарную динамику [Харук и др., 2005; Knorre et al., 2019]. Однако ретро-

спективный анализ истории лесных экосистем в голоцене и реконструкция периодичности лесных пожаров в течение тысячелетий при помощи палеоэкологических методов до настоящего времени не проводились. Представленная работа – это первый опыт изучения изменений растительности и частоты пожаров за последние 3,5 тыс. лет на основе комплексного исследования разреза заболоченного лиственничника на территории стационара. Получены новые палеоботанические данные и результаты анализа концентрации макрочастиц угля в отложениях, выполнено детальное радиоуглеродное датирование разреза.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследований расположен в центральной части Среднесибирского плоскогорья в среднем течении р. Нижней Тунгуски (правый приток р. Енисей), в окрестностях пос. Тура (рис. 1). Рельеф района исследований – низкогорный, эрозионно-денудационный. Абсолютные высоты местности составляют от 120 до 600 м над урезом моря. Климат изучаемой территории – умеренный, резко континентальный. По данным наблюдений метеостанции в пос. Тура (1936–2018) среднегодовая температура составляет $-8,8^{\circ}\text{C}$, температуры самого теплого и самого холодного месяцев определены как $+16,6^{\circ}\text{C}$ (июль) и $-35,7^{\circ}\text{C}$ (январь) соответственно [Climate Explorer, 2019]. Среднегодовое количество осадков составляет 370 мм в год, из которых около 65% приходится на период с мая по сентябрь включительно. Территория находится в пределах области сплошного распространения многолетней мерзлоты.

В растительном покрове преобладают североазиатские лиственничные леса (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.), находящиеся в разных стадиях восстановительных постпирогенных сукцессий [Кривобоков, Зверев, 2015]. Почвы – подбуры и криоземы, формирующиеся на суглинистом элювии и делювии.

Изученный разрез находится на первой надпойменной террасе р. Кочечум приблизительно в трех километрах от впадения в Нижнюю Тунгуску ($64^{\circ}17' \text{ с. ш.}, 100^{\circ}11' \text{ в. д.}$). Локальная растительность представляет собой лиственничную заболоченную редины (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr., сомкнутость крон 0,1). Немногочисленный подрост образован березой повислой (*Betula pendula* Roth.). Кустарниковый ярус представлен несколькими видами ив. Травяно-кустарничковый ярус имеет 30% покрытия и разнообразен в видовом отношении. В первом подъярусе (высотой 60–70 см) произрастают ивы (*Salix* sp.), карликовая береза (*Betula nana* L.), багульник болотный (*Ledum palustre* L.), у основания

моховых бугров встречается голубика обыкновенная (*Vaccinium uliginosum* L.) и различные травы. Второй ярус, высотой 7–10 см, образует хвощ луговой (*Equisetum pratense* Ehrh.), в подъярусе до 5 см изредко встречается брусника обыкновенная (*Vaccinium vitis-idaea* L.), а также представители родов клевер

(*Trifolium* sp.) и лютик (*Ranunculus* sp.). Мохово-лишайниковый ярус имеет 75% покрытия, на кочках преобладают *Polytrichum commune* Hedw., *P. strictum* Brid., *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., в межкочковых понижениях обилён *Tomentypnum nitens* (Hedw.) Loeske, встречаются разные виды печеночников.

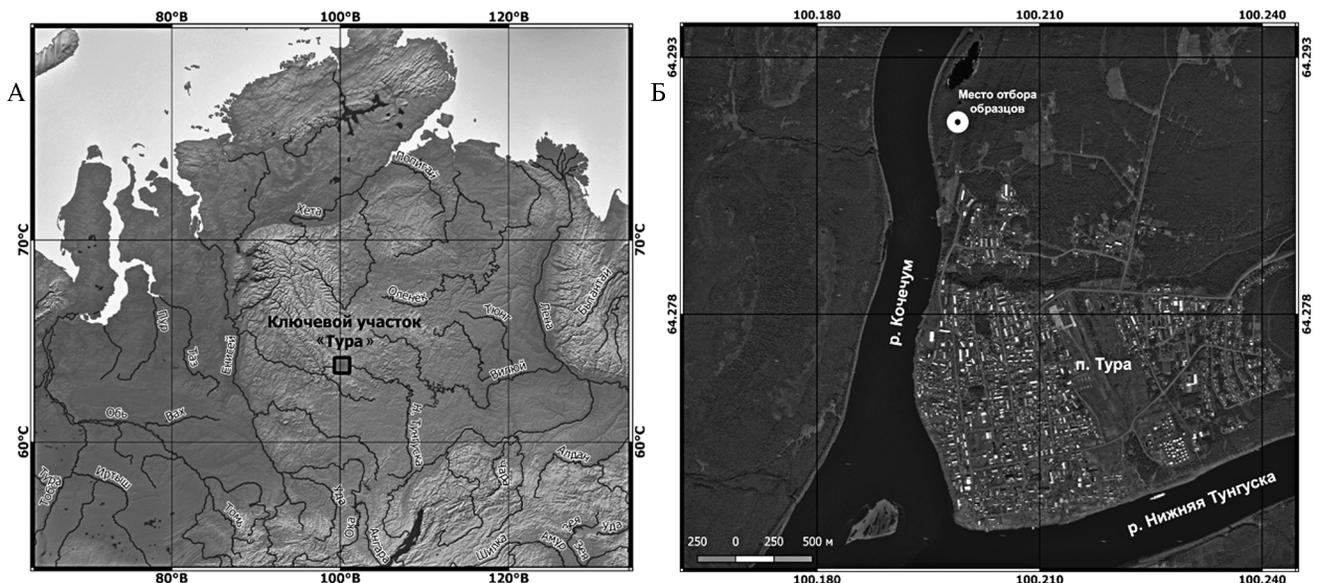


Рис. 1. Положение района исследований в центральной части Среднесибирского плоскогорья (А) и ландшафтная позиция разреза «Тура» (Б)

Fig. 1. Location of the research area in the central part of the Central Siberian plateau (A) and the landscape position of the “Tura” sediment core (B)

Бурение было проведено в центральной части лиственничной редины в августе 2019 г. при помощи торфяного бура Сукачева. Удалось отобрать керн до уровня многолетней мерзлоты, до глубины 64 см.

Для изученного разреза были получены три AMS-датировки. Радиоуглеродное датирование (табл.) проведено в ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» Института географии РАН и Центре прикладных изотопных исследований Университета Джорджии (США). Расчеты скорости седиментации и накопления торфа в разрезе были выполнены на основе модели роста отложений (рис. 2) при помощи программы Clam [Vlaaiuw, 2010] в программной среде R.

Обработка проб для анализа ботанического состава торфа и подстилающих отложений выполнена согласно методике, разработанной С.Н. Тюремным [1959]. Степень разложения торфа определялась микроскопическим методом. Потери при прокаливании определялись путем озоления при температуре 550°C. Образцы для спорово-пыльцевого анализа были подготовлены по стандартной методике [Moore et al., 1991]. При анализе помимо

пыльцы и спор было проведено определение непыльцевых палиноморф и микрочастиц угля (линейные размеры <40 мкм). За 100% принята сумма пыльцы древесных пород (AP) и травянистых растений (NAP). Интервал отбора образцов для всех видов анализа составлял 3 см.

Реконструкция частоты лесных пожаров проведена на основе анализа содержания макроscopicких (размер >125 мкм) частиц угля в торфе, позволяющего выявить региональные и локальные закономерности в истории лесных пожаров [Conedera et al., 2009]. Методика выделения частиц угля из торфа [Mooney, Tinner, 2011] включала отбеливание образца сырого торфа установленного объема (1 см³) в 10%-м водном растворе NaOCl объемом 100 мл 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 ско-

ростями накопления частиц угля в торфе, а также выявления локальных пожарных эпизодов (пожаров или серий пожаров, происходивших на самом болоте и/или в его окрестностях) [Conedera et al., 2009] использовался программный пакет CharAnalysis [Higuera, 2007]. Программа позволяет произвести расчет скоростей накопления частиц угля (Charcoal accumulation rate, CHAR-индекс), а также определить фоновые и пороговые значения CHAR для отделения локального и регионального сигналов

динамики лесных пожаров. Хронологической основой реконструкций выступает модель вертикальной скорости роста отложений (см. рис. 2). При расчете фоновых и пороговых значений скоростей накопления частиц угля в отложениях, а также для выявления локальных пожарных эпизодов применялась LOWESS (локально взвешенная линейная регрессия) как метод сглаживания с периодом сглаживания 300 лет. Период, по которому производилась интерполяция данных, составлял 25 лет.

Таблица

Результаты радиоуглеродного датирования отложений разреза «Тура»*

Лабораторный номер образца IGAN _{AMS}	Глубина отбора образца, см	Радиоуглеродный возраст ¹⁴ C, л. н. (1σ)	Интервал калиброванного возраста, кал. л. н., 2σ (вероятность)
7381	9–10	220±20	150–174 (0,444) 177–185 (0,022) 272–304 (0,447)
7382	36–37	2260±20	2162–2168 (0,011) 2178–2243 (0,477) 302–2343 (0,512)
7383	63–64	3390±20	3579–3649 (0,702) 3658–3691 (0,298)

Примечание: * – материал для датирования – растительные остатки.

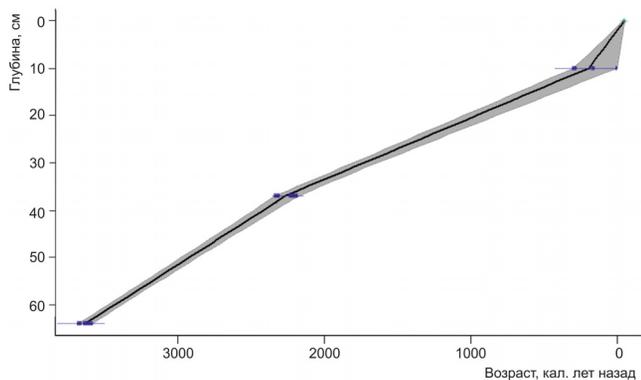


Рис. 2. Модель роста отложений разреза «Тура»

Fig. 2. Age-depth model of the “Tura” sediment core

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно результатам радиоуглеродного датирования, отложения, вскрытые скважиной, начали накапливаться около 3600 кал. л. н. При описании скважины зафиксировано, что верхние 10 см разреза представлены торфом, ниже залегает суглинок тяжелый, с включением растительных остатков. Визуальные наблюдения хорошо согласуются с результатами измерения потерь при прокаливании

(рис. 3). Содержание органического вещества в интервале глубин 64–10 см составляет 20–25% и в верхних 9 см резко возрастает, достигая 90% на глубине 3 см. AMS-датировка растительных остатков подошвы слоя торфа показала, что начало торфонакопления относится к временному интервалу 1782–1797 гг. н. э.

Анализ видовой принадлежности и таксономического разнообразия растительных остатков, выделенных из слоя торфа и подстилающих отложений, позволил разделить изученный разрез на три зоны (см. рис. 3), соответствующие фазам развития локальной растительности.

Зона 1 (64–30 см, 3600–1700 кал. л. н.). Выделено большое количество фрагментов древесины хвойных и лиственных пород, присутствует кора *Larix*, *Betula* и *Salix*. В небольшом количестве отмечены остатки *Carex* и других трав. Верхний образец из этой зоны (глубина 32–30 см, около 1800–1700 кал. л. н.) отличается полным отсутствием остатков древесины хвойных пород, в то время как фрагменты древесины лиственных по-прежнему обильны. Появляются остатки *Eriophorum*, *Menyanthes trifoliata*, *Calamagrostis*, доля остатков *Carex* увеличивается.

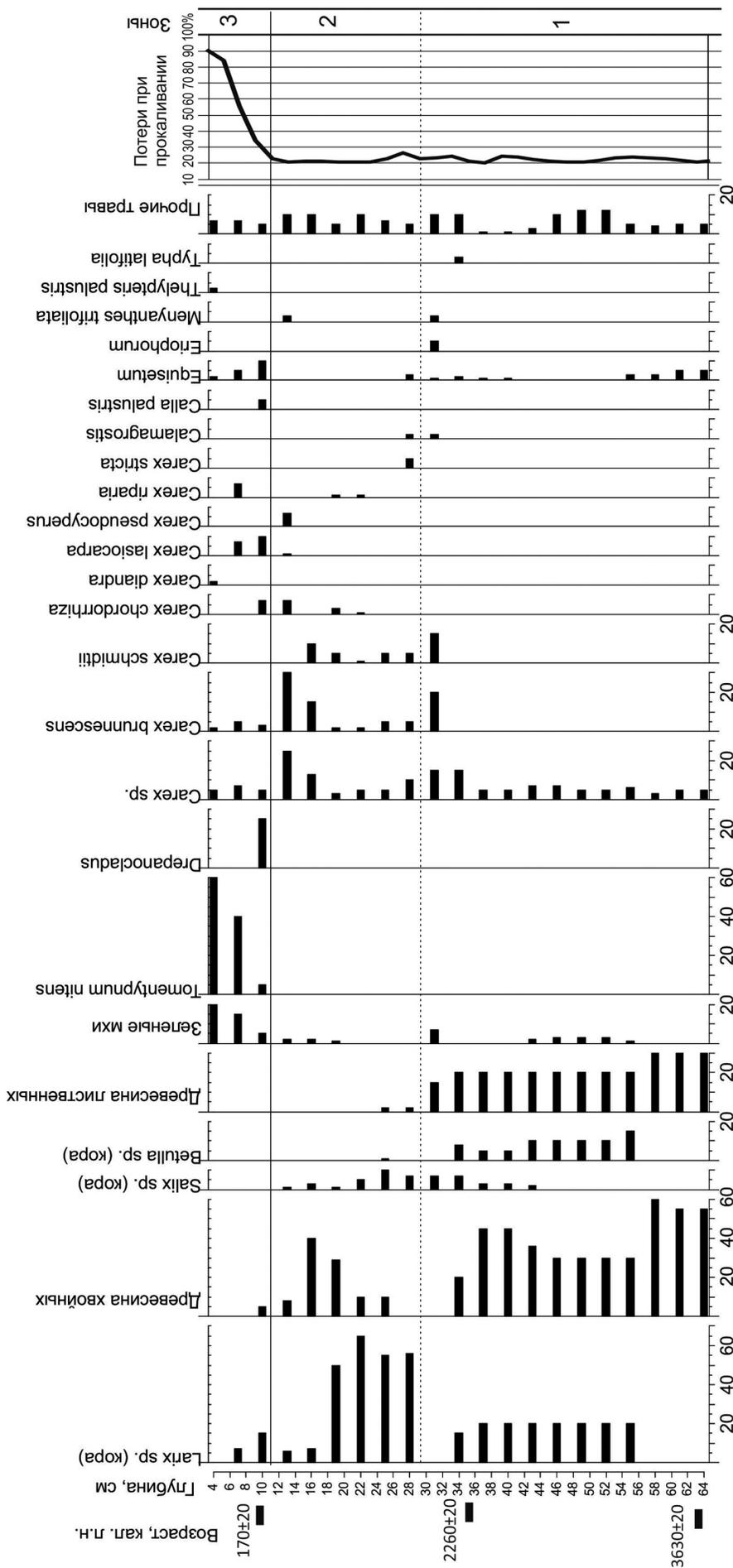


Рис. 3. Диаграмма макроостатков и потери при прокаливании разреза «Тура»

Fig. 3. Plant-macrofossil diagram and Loss-on-ignition of the "Tura" sediment core

Среди растительных остатков в зоне 2 (30–10 см, 1700–150 кал. л. н.) преобладают фрагменты древесины хвойных пород и коры лиственницы (60–80%). Доля остатков *Carex* составляет от 10 до 30%, в основном отмечены *Carex brunnescens* и *C. schmidtii*.

В зоне 3 (10–0 см, 150 кал. л. н. – настоящее время) увеличивается обилие остатков зеленых мхов, преимущественно *Tomentypnum nitens* (40–60%). Участие осок (*Carex lasiocarpa*, *C. riparia*, *C. brunnescens*) изменяется в пределах 5–10%. Отмечены остатки *Equisetum*, *Calla palustris* и *Thelypteris palustris*.

К сожалению, пыльца и споры были выделены в достаточном количестве только из верхних трех образцов, относящихся к слою торфа (рис. 4). В спорово-пыльцевых спектрах преобладает пыльца деревьев и кустарников. Обращает на себя внимание относительно высокое содержание пыльцы *Larix* (8,9–19,5%). Присутствует пыльца *Picea* (3%), *Betula* sect. *Betula* (10%), *Betula* sect. *Apterocaryon* (3–7%). Доля пыльцы *Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa* (Rupr.) Raus. возрастает от 5% в основании слоя торфа до 20% в поверхностном образце. Пыльца *Pinus* subgen. *Diploxylon*, содержание которой составляет до 30%, очевидно, является дальнезапасной, поскольку северная граница ареала сосны обыкновенной расположена примерно на 200 км южнее изучаемой территории [Ареалы деревьев и кустарников СССР, 1977]. Пыльца *Cyperaceae* преобладает в группе NAP, выявлена пыльца *Poaceae*, *Ericaceae*, *Ranunculaceae*, *Papaveraceae*, *Rosaceae*, *Artemisia*, *Gentiana*, *Rubus chamaemorus*, *Valeriana*. Споры немногочисленны, отмечены споры *Sphagnum* и лесных плаунов *Huperzia selago*, *Lycopodium annotinum*, *L. clavatum*, встречающихся в лесных сообществах в районе исследований.

В образцах зафиксировано большое количество микрочастиц угля. В нижнем образце (глубина 10 см) их количество в семь раз превышает сумму AP + NAP. Выше по разрезу количество микрочастиц угля сокращается и становится примерно равным сумме подсчитанной пыльцы. Также в основании слоя торфа выявлено большое количество спор *Gelasinospora* HdV-1 (до 10%), рода грибов-сапротрофов из сем. *Sordariaceae*, являющегося индикатором пожаров [Shumilovskikh et al., 2015]. В приповерхностном слое торфа часто отмечены устья лиственницы. В небольшом количестве отмечены споры грибов, наиболее часто поселяющихся на разлагающейся древесине и растительных остатках, *Brachysporium* sp. (HdV-359), *Clasterosporium caricinum* (HdV-25), *Glomus* (HdV-1103) и споры *Triglocladium opacum* (HdV-10), паразитирующего на эрикоидных кустарничках [Geel, 1978].

По данным изучения концентрации макрочастиц угля в торфе выделено пять периодов изменения частоты лесных пожаров (рис. 5).

На первом этапе (3600–2700 кал. л. н.) скорости аккумуляции древесного угля изменялись в диапазоне от 8 до 12 частиц на см² в год с максимумом, приходящимся на дату ~3100 кал. л. н. Для этой стадии было выделено шесть локальных пожарных эпизодов при частоте лесных пожаров примерно один пожар за 150 лет. Для второй стадии (~2700–1500 кал. л. н.) были характерны относительно низкие значения скоростей аккумуляции частиц угля в торфе (в пределах от трех до восьми частиц на см² в год). Выявлено четыре пожарных эпизода, что соответствует продолжительности межпожарного интервала около 300 лет. В течение следующей стадии (1500–700 кал. л. н.) скорость аккумуляции угля немного возрастает, но не превышает 10 частиц на см² в год. При этом частота пожаров возрастает примерно до одного пожара в 115 лет (выявлено семь пожарных эпизодов), что указывает, очевидно, на частые пожары с небольшой интенсивностью, тогда как в период между 3600 и 2700 кал. л. н. это были крупные пожары, продуцирующие большое количество угольных частиц. В период 700–170 кал. л. н. скорость аккумуляции угольных частиц понижается. За это время выявлен только один лесной пожар в окрестностях изучаемого разреза. В течение последних 240 лет (170 кал. л. н.) резко возрастают скорости аккумуляции макрочастиц древесного угля до значений ~21 (с максимумом ~38) частиц на см² в год. Межпожарный интервал сокращается до 80 лет.

Полученные палеоботанические данные отражают постепенное заболачивание лиственничного леса, произрастающего непосредственно в точке отбора проб. Но поскольку подобные лиственничные редины широко распространены в изучаемом регионе, результаты исследований на топологическом уровне могут служить моделью развития подобных экосистем. Трансформация леса в болото – это во многом саморазвивающийся процесс, однако, согласно результатам реконструкции изменений локальной растительности и периодичности пожаров, климатические условия позднего голоцена и пожары оказывали большое влияние на заболачивание территории.

Преобладание фрагментов древесины и коры лиственницы, березы и ивы, низкое содержание мхов и осок среди макроостатков в отложениях, сформировавшихся в период с 3600 до 1700 кал. л. н., позволяют сделать заключение, что в это время рассматриваемую территорию занимал лиственничный лес с примесью березы в условиях умеренного увлажнения. Кратковременное исчезновение макроостатков лиственницы в образцах, имеющих возраст между 1800 и 1700 кал. л. н., и пик концентрации макрочастиц угля на том же уровне, возможно, являются свидетельством крупного лесного пожара, ставшего причиной уничтожения древостоя и изменения водного баланса экосистемы.

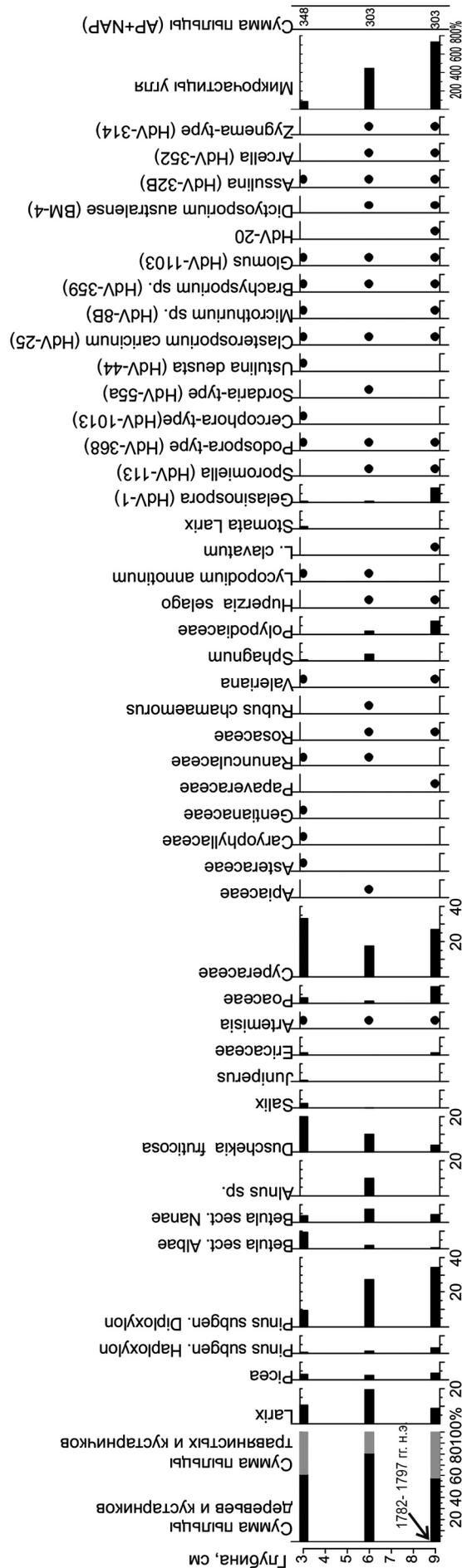


Рис. 4. Спорно-пыльцевая диаграмма верхней части разреза «Тура» (AP + NAP = 100%)

Fig. 4. Pollen diagram of the upper part of the "Tura" sediment core (AP + NAP = 100%)

В течение достаточно долгого периода, начиная с 1700 и до 170 кал. л. н., в рассматриваемом местообитании произрастал лиственный лес. В отложениях этого времени отмечено постепенное увеличение обилия макроостатков осок, среди которых определена *Carex brunnescens*, наиболее часто встречающаяся на болотистых лугах, в заболоченных и сырых лесах, редколесьях и кустарниках, и *C. schmidtii*, типичный вид сырых и болотистых лугов и травяных болот [Флора Красноярского края..., 1983]. Возможно, триггером развития процесса заболачивания лиственного леса послужило не только увеличение влажности почвы после пожара, но и похолодание климата в период с 1600 по 1200 кал. л. н., прослеженное по дендрохронологическим данным Ямала, а также по обобщенной древесно-кольцевой хронологии севера Евразии [Сидорова и др., 2007] и изменениям изотопно-кислородного состава льдов Гренландии [Johnsen et al., 1992].

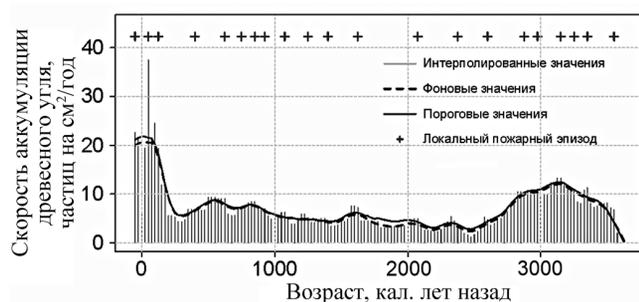


Рис. 5. Скорость аккумуляции частиц углерода (CHAR-индекс), фоновые и пороговые значения CHAR и локальные пожарные эпизоды по данным изучения содержания макроскопических частиц углерода в разрезе «Тура»

Fig. 5. Charcoal accumulation rate (CHAR index), background and threshold CHAR values and local fire episodes revealed by the study of macroscopic charcoal concentration in the “Tura” sediment core

Следующий «поворотный момент» в развитии лиственного леса – начало торфонакопления и трансформация сомкнутого леса в лиственную речину – произошел в 1782–1797 г. н. э. (датировка 220 ± 20 ^{14}C л. н.). Причиной этих изменений также послужил пожар, на что указывают пик концентрации микро- и макрочастиц углерода в основании слоя торфа, находки спор *Gelasinospora*, являющегося индикатором пожаров [Shumilovskikh et al., 2015]. В районе исследований в период с 1790 по 1800 гг. выявлена серия пожаров по дендрохронологическим данным, а в частности по изучению пожарных подсушин [Харук и др., 2005; Прокушкин и др., 2006; Knorre et al., 2019; Kirilyanov et al., 2020]. Один из них, очевидно, затронул описываемый нами участок.

Лесные пожары в области распространения многолетнемерзлых пород существенно меняют тепловой режим почвы за счет увеличения сезонно-талого слоя [Knorre et al., 2019; Kirilyanov et al., 2020]. Согласно исследованиям [Kirilyanov et al., 2020], протаивание почвы в районе исследований увеличивается с 30–50 см до 1,5–1,7 м в первые 30 лет после пожара. Возобновление лиственницы в таких условиях обычно происходит очень активно [Sofronov, Volokitina, 2010]. Относительно высокие значения содержания пыльцы лиственницы (до 19%) в образце из средней части слоя торфа указывают на сомкнутый полог леса, поскольку пыльца лиственницы очень плохо сохраняется в отложениях [Непомилуева, Дурягина, 1990]. Однако увеличение влажности почвы после пожара и возрастание освещенности благоприятно для развития мохового покрова. По наблюдениям А.А. Кнорре с соавт. [Knorre et al., 2019], корневые шейки стволов деревьев в лиственничнике, образовавшемся после опустошительного пожара 1899 г., находятся на глубине 20–45 см под слоем сфагновых мхов. По мере нарастания слоя мха, обладающего высокой теплоизоляционной способностью, температура грунтов понижается. Примерно через 70–80 лет глубина сезонно-талого слоя возвращается к значениям, характерным до пожара [Kirilyanov et al., 2020]. В изучаемом нами лиственничнике интенсивный рост зеленых мхов (*Tomentypnum nitens*, *Drepanocladus* sp.) привел к формированию торфяного слоя, ухудшению роста лиственницы и изреживанию древостоя.

Результаты анализа концентрации макроскопических частиц углерода в разрезе отражают пожары не только в точке исследований, но и на окружающей территории. Полевые наблюдения за выпадением частиц углерода из воздуха и модельные расчеты показали, что большая часть частиц углерода с линейным размером >125 мкм оседает 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].

Полученные данные позволяют выделить четыре этапа изменения режима пожаров на изучаемой территории. Первый этап охватывает временной интервал с 3600 до 2700 кал. л. н. (вторая половина суббореального периода голоцена). Межпожарный интервал составлял 150 лет и был продолжительнее, чем в настоящее время. Оценки частоты лесных пожаров на основе пожарных подсушин дендрохронологическим методом в Центральной Эвенкии на пробных площадях в окрестностях изучаемого нами разреза показали, что межпожарный интервал колебался примерно от 60 до 140 лет, составляя в среднем 82 ± 7 лет [Харук и др., 2005; Kharuk et al., 2011].

Похолодание климата в начале субатлантического периода (около 2700 кал. л. н.) привело к изменению частоты лесных пожаров. Реконструкции летних температур на основе древесно-кольцевых хронологий [Hantemirov, Shiyatov, 2002] и исследования патологических нарушений древесины лиственницы сибирской на Ямале [Хантемиров и др., 2011] указывают на существенное похолодание в Арктике 2700–2500 кал. л. н., что хорошо согласуется с данными по изменению изотопно-кислородного состава льдов Гренландии [Johnsen et al., 1992] и климатическими реконструкциями для Северного полушария [Christiansen, Jungqvist, 2017]. Как следствие, в период с 2700 по 1500 кал. л. н. межпожарный интервал на рассматриваемой нами территории увеличился до 300 лет. По дендрохронологическим данным подобная частота пожаров характерна для лиственничников на северной границе леса [Kharuk et al., 2011].

Следующий период изменения режима пожаров с 1500 до 700 кал. л. н. включает потепление климата средневекового климатического оптимума (СКО, 800–1300 гг. н. э.) [PAGES 2k Consortium, 2013]. Рост летних температур прослежен по данным древесно-кольцевых хронологий на Ямале, на востоке Таймыра и на плато Путорана [Воронин и др., 2014]. Реконструкция температур и условий увлажнения Северной Евразии в целом свидетельствуют о значительном потеплении в период СКО, а также о чередовании относительно влажных и сухих фаз на территории Сибири [Feurdean et al., 2019] и Центральной Азии [Chen et al., 2010]. Климатические изменения послужили причиной увеличения частоты пожаров на изучаемой территории, межпожарный интервал сократился до 115 лет.

Резкое и глубокое похолодание климата Малого ледникового периода (МЛП), пришедшего на смену СКО, прослеживается повсеместно как на рассматриваемой территории, так и в Сибирском секторе Арктики [Хантемиров и др., 2011; Воронин и др., 2014; Сидорова и др., 2007] и в Северном полушарии в целом [Christiansen, Jungqvist, 2017; PAGES 2k Consortium, 2013]. Согласно результатам дендрохронологических исследований, число пожаров в лиственничных лесах в криолитозоне Средней Сибири в течение МЛП было существенно ниже, чем в предыдущие и последующие эпохи [Kharuk et al., 2011]. В условиях более короткого и, возможно, более холодного лета в МЛП испарение было снижено, что могло приводить к увеличению грунтовой влажности во многих местообитаниях [Feurdean et al., 2019], что неблагоприятно для возникновения и распространения лесных пожаров. По данным изучения концентрации макрочастиц угля в рассматриваемом нами разрезе, в период с 700 до 150 кал. л. н. на изу-

чаемой территории произошел только один крупный пожар, а межпожарный интервал составил 275 лет.

Концентрация макрочастиц угля в слое торфа, сформировавшемся в течение последних 240 лет, возросла до максимальных значений за весь поздний голоцен (см. рис. 4). Полученные данные свидетельствуют, что межпожарный интервал сократился до 80 лет и был близок к среднему его значению, восстановленному по результатам изучения пожарных подсушин в районе исследований за тот же период [Kharuk et al., 2011]. Наиболее крупные пожары в изучаемом районе случались в 1846, 1896–1899 и 1914–1916 гг. [Харук и др., 2005; Knorre et al., 2019; Kirdeyanov et al., 2020]. Согласно дендрохронологическим данным опустошительный пожар 1899 г. охватывал территорию около 250 км², включая, вероятно, и участок исследований. Возможно, этому пожару соответствует пик концентрации макрокопических частиц угля на глубине 5 см, более чем вдвое превышающий ее средние значения по разрезу. К сожалению, модель роста отложений изученного разреза, основанная на радиоуглеродных датировках, не позволяет так же точно датировать пожарные события, как древесно-кольцевые хронологии. Как показали исследования режима пожаров на севере Сибири, в XX в. количество пожаров росло и межпожарный интервал проявлял тенденцию к сокращению [Харук и др., 2005; Kharuk et al., 2011; Kirdeyanov et al., 2020], что обусловлено, очевидно, климатическими изменениями.

ВЫВОДЫ

Результаты комплексного исследования заболоченного лиственничника в Центральной Эвенкии позволяют сделать следующие выводы.

На примере изученного лиственничника полученные данные показали, что пожары – важный фактор эволюции лесных геосистем района исследований и в позднем голоцене являлись триггером развития процесса заболачивания.

Реконструкция пожарных событий на основе анализа концентрации макрокопических частиц угля в отложениях позволила выявить связь между периодичностью лесных пожаров и изменениями климатических условий изучаемой территории. Частота пожаров была выше в теплые интервалы позднего голоцена и понижалась в холодные и влажные.

Установлено, что за 3,5 тыс. лет максимальных значений частота лесных пожаров на изучаемой территории достигла в последние 240 лет. Межпожарный интервал, реконструированный на основе анализа макрокопических частиц угля в отложениях, составил около 80 лет, что близко к его среднему значению для этой территории, восстановленному по дендрохронологическим данным за тот же период [Харук и др., 2005].

Благодарности. Полевые исследования выполнены по проекту Holocene climate and environmental records from the Central Siberian Plateau, финансируемому Швейцарским полярным институтом (Swiss Polar Institute); аналитические исследования, обработка данных и подготовка статьи выполнены при поддержке проекта РФФ № 20-17-00043.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ареалы деревьев и кустарников СССР / под ред. С.Я. Соколова, О.А. Связевой, В.А. Кубли. Т. 1. Л.: Наука, 1977. 164 с.
- Валендик Э.Н., Кисляхов Е.К., Рыжкова В.А., Пономарев Е.И., Данилова И.В. Ландшафтные пожары тайги Центральной Сибири // Известия РАН. Серия географическая. 2014. № 3. С. 73–86.
- Воронин В.И., Хантемиров Р.М., Наурзбаев М.М. Сверхдлинные сибирские древесно-кольцевые хронологии – надежные архивы для палеоклиматических реконструкций // Развитие жизни в процессе абиотических изменений на Земле. 2014. № 3. С. 409–415.
- Карпенко Л.В. Растительный покров и оценка видового разнообразия заболоченных лиственничников и болот Центральной Эвенкии // Хвойные бореальной зоны. 2013. № 5–6. С. 22–28.
- Кривобоков Л.В., Зверев А.А. Классификация растительности и особенности ценофлоры лиственничных лесов криолитозоны Средней Сибири (бассейн р. Нижняя Тунгуска) // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2015. № 14. С. 99–104.
- Непомилуева Н.И., Дурягина Д.А. К истории лиственничников среднего Тимана в голоцене (Коми АССР) // Ботанический журнал. 1990. Т. 75. № 3. С. 326–335.
- Прокушкин С.Г., Бузаенко Т.Н., Прокушкин А.С., Шкиркунов В.Г. Сукцессионная трансформация растительного и почвенного покрова на солифлюкционных площадях в криолитозоне Центральной Эвенкии // Известия РАН. Серия биологическая. 2010. № 1. С. 95–104.
- Прокушкин А.С., Кнорре А.А., Кирдянов А.В., Шульце Е.-Д. Продуктивность мхов и накопление органического вещества в подстилке лиственничника сфагнового в криолитозоне // Экология. 2006. № 4. С. 252–260.
- Прокушкин А.С., Токарева И.В., Прокушкин С.Г., Абаимов А.П., Гуггенбергер Г. Потоки растворенного органического вещества в лиственничниках криолитозоны Средней Сибири // Экология. 2008. № 3. С. 163–172.
- Санников С.Н., Санникова Н.С. Эволюционные аспекты пирозологии светлохвойных видов // Лесоведение. 2009. № 3. С. 3–10.
- Сидорова О.В., Наурзбаев М.М., Ваганов Е.А. Динамика климата позднего голоцена Северной Евразии по данным ледниковых кернов Гренландии и длительных древесно-кольцевых хронологий // Известия РАН. Серия географическая. 2007. № 1. С. 95–106.
- Тюрэмнов С.Н. Атлас растительных остатков, встречаемых в торфе. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. 90 с.
- Флора Красноярского края / под ред. А.В. Положий. Вып. 1. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1983. 83 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. Серия географическая. 2011. № 2. С. 89–102.
- Харук В.И., Двинская М.Л., Рэнсон К.Дж. Пространственно-временная динамика пожаров в лиственничных лесах северной тайги Средней Сибири // Экология. 2005. № 5. С. 334–343.
- Blaauw M. Methods and code for “classical” age-modelling of radiocarbon sequences, *Quaternary Geochronology*, 2010, vol. 5, p. 512–518.
- Bobrovsky M.V., Kupriyanov D.A., Khanina L.G. Anthracological and morphological analysis of soils for the reconstruction of the forest ecosystem history (Meshchera lowlands, Russia), *Quaternary International*, 2019, vol. 516, p. 70–82.
- Chen F.H., Chen J.H., Holmes J.A., Boomer I., Austin P., Gates J.B., Wang N.L., Brooks S.J., Zhang J.W. Moisture changes over the last millennium in the arid central Asia: a review, synthesis and comparison with monsoon region, *Quaternary Science Reviews*, 2010, vol. 29, p. 1055–1068.
- Christiansen B., Ljungqvist F.C. Challenges and perspectives for large-scale temperature reconstructions of the past two millennia, *Reviews of Geophysics*, 2017, vol. 55, no. 1, p. 40–96.
- Clear J.L., Molinari C., Bradshaw R.H.W. Holocene fire in Fennoscandia and Denmark, *International Journal of Wildland Fire*, 2014, vol. 23, no. 6, p. 781–789.
- 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.
- Feurdean A., Galka M., Florescu G., Diaconu A.-C., Tanțău I., Kirpotin S., Hutchinson S.M. 2000 years of variability in hydroclimate and carbon accumulation in western Siberia and the relationship with large-scale atmospheric circulation: A multi-proxy peat record, *Quaternary Science Reviews*, 2019, vol. 226, p. 105948, DOI: 10.1016/j.quascirev.2019.105948.
- Feurdean A., Vannièrè B., Finsinger W., Warren D., Connor S.C., Forrest M., Liakka J., Panait A., et al. Fire hazard modulation by long-term dynamics in land cover and dominant forest type in eastern and central Europe, *Biogeosciences*, 2020, vol. 17, p. 1213–1230, DOI: 10.5194/bg-17-1213-2020.
- Hantemirov R.M., Shiyatov S.G. A continuous multimillennial ring-width chronology in Yamal, northwestern Siberia, *The Holocene*, 2002, vol. 12, no. 6, p. 717–726.
- 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.
- Johnsen S., Clausen H., Dansgaard W., Fuhrer K., Gundestrup N., Hammer C., Iversen P., Jouzel J., Stauffer B., Steffensen J. Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core, *Nature*, 1992, vol. 359, p. 311–313.
- Kasin I., Blanck Y., Storaunet K.O., Rolstad J., Ohlson M. The charcoal record in peat and mineral soil across a boreal landscape and possible linkages to climate change

- and recent fire history, *The Holocene*, 2013, vol. 23, no. 7, p. 1052–1065.
- 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.
- Kirdyanov A.V., Saurer M., Siegwolf R., Knorre A.A., Prokushkin A.S., Churakova (Sidorova) O.V., Fonti M.V., Büntgen U. Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia, *Environmental Research Letters*, 2020, vol. 15, p. 034061, DOI: 10.1088/1748-9326/ab7469.
- Knorre A.A., Kirdyanov A.V., Prokushkin A.S., Krusic P.J., Büntgen U. Tree ring-based reconstruction of the long-term influence of wildfires on permafrost active layer dynamics in Central Siberia, *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 652, p. 314–319, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.124.
- Molinari C., Lehsten V., Bradshaw R.H.W., Power M.J., Harmand P., Arneeth A., Kaplan J.O., Vannièrè B., Sykes M.T. Exploring potential drivers of European biomass burning over the Holocene: a data-model analysis, *Global Ecology and Biogeography*, 2013, vol. 22, p. 1248–1260.
- 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.
- Novenko E., Tsyganov A., Volkova E., Kupriyanov D., Mironenko I., Babeshko K., Utkina A., Popov V., Mazei Yu. Mid- and Late Holocene vegetation dynamics and fire history in the boreal forest of European Russia: A case study from Meshchera Lowlands, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, vol. 459, p. 570–584.
- PAGES 2k Consortium. Continental-scale temperature variability during the past two millennia, *Nature Geoscience*, 2013, vol. 6, p. 339–346.
- Pitänen A., Tolonen K., Jungner H. A basin-based approach to the long-term history of forest fires as determined from peat strata, *The Holocene*, 2001, vol. 11, no. 5, p. 599–605.
- Power M.J., Marlon J., Ortiz N. et al. Changes in fire regimes since the last glacial maximum: An assessment based on a global synthesis and analysis of charcoal data, *Climate Dynamics*, 2008, vol. 30, no. 7–8, p. 887–907, DOI: 10.1007/s00382-007-0334-x.
- Shumilovskikh L.S., Schlütz F., Achterberg I., Bauerochse A., Leuschner H.H. Nonpollen palynomorphs from mid-Holocene peat of the raised bog Borsteler Moor (Lower Saxony, Germany), *Studia Quaternaria*, 2015, vol. 32(1), p. 5–18, DOI: 10.1515/squa-2015-0001.
- Sofronov M.A., Volokitina A.V. Wildfire ecology in continuous permafrost zone, *Permafrost Ecosystems: Siberian Larch Forests, Ecological Studies*, Osawa A., Zyryanova O.A., Matsuura Y., Kajimoto T., Wein R.W. (eds.), 2010, vol. 209, p. 59–82.
- Geel van B. A palaeoecological study of Holocene peat bog sections in Germany and the Netherlands, based on the analysis of pollen, spores and macro- and microscopic remains of fungi, algae cormophytes and animals, *Review of Palaeobotany and Palynology*, 1978, vol. 25, p. 1–120.
- Whitlock C., Higuera P.E., McWethy D.B., Briles C.E. Paleocological Perspectives on Fire Ecology: Revisiting the Fire-Regime Concept, *The Open Ecology Journal*, 2010, vol. 3, p. 6–23.
- Электронный ресурс
Climate Explorer, URL: <http://climexp.knmi.nl/data/t24507.dat> (access date 12.10.2020).

Поступила в редакцию 22.11.2020

После доработки 15.02.2021

Принята к публикации 18.03.2021

IMPACT OF FIRES ON THE DYNAMICS OF FOREST ECOSYSTEMS IN CENTRAL EVENKIA DURING THE LAST 3.5 KA

N.G. Mazei¹, A.S. Prokushkin², D.A. Kupriyanov³, E.Yu. Novenko⁴

^{1,3,4} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science

² Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center SB RAS”

⁴ Institute of Geography Russian Academy of Sciences, Department of Quaternary Research, Senior Scientific Researcher

¹ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: natashamazei@mail.ru

² Head of the laboratory, Ph.D. in Biology; e-mail: prokushkin@ksc.krasn.ru

³ Ph.D. student; e-mail: dmitriykupriyanov1994@yandex.ru

⁴ Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: lenenov@mail.ru

The paper discuss new evidence of vegetation changes and fire frequency over the past 3,5 ka BP in the middle part of the Lower Tunguska River basin (Central Evenkia) based on multy-proxy studies of the sediment core from a swampy larch forest. The sampling plot is located within the area of the Evenki scientific station of the V. N. Sukachev Institute of Forest, SB RAS. New paleobotanical data, the results of macroscopic charcoal analysis and detailed radiocarbon dating of the sediment core are presented.

The example of the local ecosystem under study proves that fires were an important factor in the evolution of forest ecosystems within the cryolithozone of Central Siberia and triggered the paludification process during the Late Holocene. Five stages of fire frequency changes were identified. During the first stage

(3600–2700 cal. yr. BP), the fire-free interval was 150 years, and during the next stage (2700–1500 cal. yr. BP) it increased up to 300 years. Between 1500 and 700 cal. yr. BP, including the climate warming of the Medieval Climatic Anomaly, the fire-free interval went down to 115 years. The significant cooling during the Little Ice Age (700–200 cal. yr. BP) led to reduction in the number of fires, and the fire-free interval was 275 years. The data obtained showed that during the period under review (3,5 ka), the frequency of forest fires in the study area reached its maximum within the last 200 years. The fire return period was about 80 years, which is close to the average fire-free interval in the study area reconstructed by dendrochronological data for the same period. The reconstruction of the fire regime demonstrated that the frequency of forest fires was higher during warm phases of the Late Holocene and decreased in the cold intervals. We suggest that during the periods of cooling the shorter and possibly colder summers reduced the evaporation and increased the ground moisture in many habitats, which was unfavorable for the initiation and expansion of forest fires.

Keywords: macro-charcoal analysis, paleobotanical data, forest paludification

Acknowledgements. Field research was carried out under the project “Holocene climate and environmental records from the Central Siberian Plateau” funded by the Swiss Polar Institute; analytical work, data processing and preparation of the paper were financially supported by the Russian Science Foundation (project 20-17-00043).

REFERENCES

- Arealy dereviev i kustarnikov SSSR* [Areal of trees and shrubs of the USSR] Sokolov S.Ya., Svyaseva O.A., Kubli V.A. (eds.), vol. 1, Leningrad, Nauka Publ., 1977, 164 p. (In Russian)
- Blaauw M. Methods and code for ‘classical’ age-modelling of radiocarbon sequences, *Quaternary Geochronology*, 2010, vol. 5, p. 512–518.
- Bobrovsky M.V., Kupriyanov D.A., Khanina L.G. Anthracological and morphological analysis of soils for the reconstruction of the forest ecosystem history (Meshchera lowlands, Russia), *Quaternary International*, 2019, vol. 516, p. 70–82.
- Chen F.H., Chen J.H., Holmes J.A., Boomer I., Austin P., Gates J.B., Wang N.L., Brooks S.J., Zhang J.W. Moisture changes over the last millennium in the arid central Asia: a review, synthesis and comparison with monsoon region, *Quaternary Science Reviews*, 2010, vol. 29, p. 1055–1068.
- Christiansen B., Ljungqvist F.C. Challenges and perspectives for large-scale temperature reconstructions of the past two millennia, *Reviews of Geophysics*, 2017, vol. 55, no. 1, p. 40–96.
- Clear J.L., Molinari C., Bradshaw R.H.W. Holocene fire in Fennoscandia and Denmark, *International Journal of Wildland Fire*, 2014, vol. 23, no. 6, p. 781–789.
- 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.
- Feurdean A., Gałka M., Florescu G., Diaconu A.-C., Tanțău I., Kirpotin S., Hutchinson S.M. 2000 years of variability in hydroclimate and carbon accumulation in western Siberia and the relationship with large-scale atmospheric circulation: A multi-proxy peat record, *Quaternary Science Reviews*, 2019, vol. 226, p. 105948, DOI: 10.1016/j.quasci-rev.2019.105948.
- Feurdean A., Vanni ere B., Finsinger W., Warren D., Connor S.C., Forrest M., Liakka J., Panait A., et al. Fire hazard modulation by long-term dynamics in land cover and dominant forest type in eastern and central Europe, *Biogeosciences*, 2020, vol. 17, p. 1213–1230, DOI: 10.5194/bg-17-1213-2020.
- Flora Krasnojarskogo kraja* [Flora of the Krasnoyarsk territory], Polozhij A.V. (ed.), vol. 1, Tomsk, Izd-vo Tomsk. un-ta Publ., 1983, 83 p. (In Russian)
- Hantemirov R.M., Gorlanova L.A., Surkov A.Ju., Shiyatov S.G. Ekstremal’nye klimaticheskie sobytija na Jamale za poslednie 4100 let po dendrochronologicheskim dannym [Extreme climate events in the Yamal Peninsula during the last 4,100 years according to dendrochronological data], *Izvestija Rossijskoj akademii nauk, Ser. geograficheskaja*, 2011, no. 2, p. 89–102. (In Russian)
- Hantemirov R.M., Shiyatov S.G. A continuous multimillennial ring-width chronology in Yamal, northwestern Siberia, *The Holocene*, 2002, vol. 12, no. 6, p. 717–726.
- Haruk V.I., Dvinskaja M.L., Rjenson K.Dzh. Prostranstvenno-vremennaja dinamika pozharov v listvennichnyh lesah severnoj tajgi Srednej Sibiri [Spatio-temporal dynamics of fires in larch forests of the northern taiga of Central Siberia], *Ekologija*, 2005, no. 5, p. 334–343. (In Russian)
- 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.
- Johnsen S., Clausen H., Dansgaard W., Fuhrer K., Gundestrup N., Hammer C., Iversen P., Jouzel J., Stauffer B., Steffensen J. Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core, *Nature*, 1992, vol. 359, p. 311–313.
- Karpenko L.V. Rastitel’nyj pokrov i ocenka vidovogo raznoobrazija zabolochennyh listvennichnikov i bolot Central’noj Jevenkii [Vegetation cover and assessment of species diversity of swampy larch forests and swamps of Central Evenkia], *Hvojnye boreal’noj zony*, 2013, no. 5–6, p. 22–28. (In Russian)
- Kasin I., Blanck Y., Storaunet K.O., Rolstad J., Ohlson M. The charcoal record in peat and mineral soil across a boreal landscape and possible linkages to climate change and recent fire history, *The Holocene*, 2013, vol. 23, no. 7, p. 1052–1065.
- 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.
- Kiryanov A.V., Saurer M., Siegwolf R., Knorre A.A., Prokushkin A.S., Churakova (Sidorova) O.V., Fonti M.V., Buntgen U. Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia, *Environmental Research Letters*, 2020, vol. 15, p. 034061, DOI: 10.1088/1748-9326/ab7469.

- Knorre A.A., Kirdyanov A.V., Prokushkin A.S., Krusic P.J., Büntgen U. Tree ring-based reconstruction of the long-term influence of wildfires on permafrost active layer dynamics in Central Siberia, *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 652, p. 314–319.
- Krivobokov L.V., Zverev A.A. Klassifikacija rastitel'nosti i osobennosti cenoflory listvennichnyh lesov kriolitozony Srednej Sibiri (bassejn r. Nizhnjaja Tunguska) [Classification of plant community and traits of coenoflora of larch forests of Middle Siberia permafrost zone (Nizhnjaya Tunguska River basin)], *Problemy botaniki Juzhnoj Sibiri i Mongolii*, 2015, no. 14, p. 99–104. (In Russian)
- Molinari C., Lehsten V., Bradshaw R.H.W., Power M.J., Harmand P., Arneth A., Kaplan J.O., Vanni re B., Sykes M.T. Exploring potential drivers of European biomass burning over the Holocene: a data-model analysis, *Global Ecology Biogeography*, 2013, vol. 22, p. 1248–1260.
- 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.
- Nepomilueva N.I., Durjagina D.A. K istorii listvennichnikov srednego Timana v golocene (Komi ASSR) [On the history of larch forests of the middle Timan in the Holocene (Komi ASSR)], *Botanicheskij zhurnal*, 1990, no. 3, p. 326–335. (In Russian)
- Novenko E., Tsyganov A., Volkova E., Kupriyanov D., Mironenko I., Babeshko K., Utkina A., Popov V., Mazei Yu. Mid- and Late Holocene vegetation dynamics and fire history in the boreal forest of European Russia: A case study from Meshchera Lowlands, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, vol. 459, p. 570–584.
- PAGES 2k Consortium. Continental-scale temperature variability during the past two millennia, *Nature Geoscience*, 2013, vol. 6, p. 339–346.
- Pit anen A., Tolonen K., Jungner H. A basin-based approach to the long-term history of forest fires as determined from peat strata, *The Holocene*, 2001, vol. 11, no. 5, p. 599–605.
- Power M.J., Marlon J., Ortiz N., et al. Changes in fire regimes since the last glacial maximum: An assessment based on a global synthesis and analysis of charcoal data, *Climate Dynamics*, 2008, vol. 30, no. 7–8, p. 887–907.
- Prokushkin A.S., Knorre A.A., Kirdyanov A.V., Schulze E.-D. Produktivnost' mhov i nakoplenie organicheskogo veshchestva v podstilke listvennichnika sfagnovogo v kriolitozone [Productivity of mosses and organic matter accumulation in the litter of *Sphagnum* larch forest in the permafrost zone], *Ekologija*, 2006, no. 4, p. 252–260. (In Russian)
- Prokushkin A.S., Tokareva I.V., Prokushkin S.G., Abaimov A.P., Guggenberger G. Potoki rastvorenного organicheskogo veshchestva v listvennichnikah kriolitozony Srednej Sibiri [Flows of dissolved organic matter in larch forests of the cryolithozone of Central Siberia], *Ekologija*, 2008, no. 3, p. 163–172. (In Russian)
- Prokushkin S.G., Bugaenko T.N., Prokushkin A.S., Shkikunov V.G. Sukcessionnaja transformacija rastitel'nogo i pochvenного pokrova na soliflukcionnyh ploshhadjah v kriolitozone Central'noj Jevenkii [Successional transformation of vegetation and soil cover within solifluction areas of the cryolithozone of Central Evenkia], *Izvestija RAN, Ser. biologicheskaja*, 2010, no. 1, p. 95–104. (In Russian)
- Sannikov S.N., Sannikova N.S. Evoljucionnyye aspekty piroekologii svetlohojnyh vidov [Evolutionary aspects of pyroecology of light coniferous species], *Lesovedenie*, 2009, no. 3, p. 3–10. (In Russian)
- Shumilovskikh L.S., Schl utz F., Achterberg I. et al. Nonpollen palynomorphs from mid-Holocene peat of the raised bog Borsteler Moor (Lower Saxony, Germany), *Studia Quaternaria*, 2015, vol. 32(1), p. 5–18.
- Sidorova O.V., Naurzbaev M.M., Vaganov E.A. Dinamika klimata pozdnego golocena Severnoj Evrazii po danym lednikovyh kernov Grenlandii i dlitel'nyh drevesnokol'cevych hronologij [Climate dynamics of the Late Holocene of Northern Eurasia based on Greenland ice cores and long-term tree-ring chronologies], *Izvestija RAN, Ser. geograficheskaja*, 2007, no. 1, p. 95–106. (In Russian)
- Tjuremnov S.N. *Atlas rastitel'nyh ostatkov, vstrechaemyh v torfe* [Atlas of plant residues found in peat], Moscow, Leningrad, Gosjenergoizdat Publ., 1959, 90 p. (In Russian)
- Valendik Je.N., Kisiljahov E.K., Ryzhkova V.A., Ponomarev E.I., Danilova I.V. Landshaftnye pozhary tajgi Central'noj Sibiri [Landscape fires in the taiga of Central Siberia], *Izvestija RAN. Ser. geograficheskaja*, 2014, no. 3, p. 73–86. (In Russian)
- van Geel B. A palaeoecological study of Holocene peat bog sections in Germany and the Netherlands, based on the analysis of pollen, spores and macro- and microscopic remains of fungi, algae cormophytes and animals, *Review of Palaeobotany and Palynology*, 1978, vol. 25, p. 1–120.
- Voronin V.I., Hantemirov R.M., Naurzbaev M.M. Sverhdlinnye sibirskie drevesno-kol'cevye hronologii – nadezhnye arhivy dlja paleoklimaticheskikh rekonstrukcij [Ultra-long Siberian tree-ring chronologies as reliable archives for paleoclimatic reconstructions], *Razvitie zhizni v processe abioticheskikh izmenenij na Zemle*, 2014, no. 3, p. 409–415. (In Russian)
- Whitlock C., Higuera P.E., McWethy D.B., Briles C.E. Paleoeological Perspectives on Fire Ecology: Revisiting the Fire-Regime Concept, *The Open Ecology Journal*, 2010, vol. 3, p. 6–23.
- Sofronov M.A., Volokitina A.V. Wildfire ecology in continuous permafrost zone, *Permafrost Ecosystems: Siberian Larch Forests, Ecological Studies*, A. Osawa, O.A. Zyryanova, Y. Matsuura, T. Kajimoto, R. Wein (eds.), 2010, vol. 209, p. 59–82.

Web source

Climate Explorer, URL: <http://climexp.knmi.nl/data/t24507.dat> (access date 12.10.2020).

Received 22.11.2020

Revised 15.02.2021

Accepted 18.03.2021