

HOLOCENE ENVIRONMENTAL CONDITIONS IN THE WESTERN PART OF EASTERN SAYAN LOW-MOUNTAIN RELIEF: BASED ON COMPREHENSIVE STUDY OF THE MINA MIRE DEPOSITS

Grenaderova A.V. , Sharafutdinov R.A., Mitev A.R., Mikhailova A.B.*

Институт экологии и географии, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

* grenaderova-anna@mail.ru

Citation: Grenaderova A.V., Sharafutdinov R.A., Mitev A.R., Mikhailova A.B. 2025. Holocene environmental conditions in the Western part of Eastern Sayan low-mountain relief: based on comprehensive study of the Mina mire deposits. *Environmental dynamics and global climate change*. 16(1): 33–48.

DOI: 10.18822/edgcc678544

Приводятся результаты палеоэкологической реконструкции для низкогорья западной части Восточного Саяна за последние 7.9 тыс. календарных лет, полученные на основе радиоуглеродного AMS-датирования, спорово-пыльцевого, ботанического анализа и анализа макрочастиц угля торфяных отложений в бассейне р. Мина (правобережье р. Енисей). Установлено, что в период усиления аридизации 7.9-5.7 тыс. кал. л. н. в среднем течении р. Мина на участке с широкой поймой складывались условия для отшнуровывания старицы с постепенным ее заилением, зарастанием и заболачиванием. На склонах Кутурчинского и Койского Белогорья в это время были развиты пихтово-елово-кедровые леса, часто случались пожары. Откликом на термический оптимум голоцена можно считать снижение обводненности поймы и начало торфонакопления, усиление пожарной активности. Стабильным увлажнением отличался период 5.3-4.1 тыс. кал. л. н., когда по склонам произрастали пихтово-елово-кедровые разнотравно-папоротниковые леса. На основе анализа макрочастиц угля выделено три этапа усиления пожарной активности: I – 6800-5400 кал. л. н., II – 4600-3200 кал. л. н. (пожарные эпизоды около 4300 и 3400 кал. л. н. отличаются максимальным пиковым значением скорости аккумуляции угля), III – 1800 кал. л. н. – по настоящее время, последний этап характеризуется наименьшими межпожарными интервалами (около 200-400 лет). На даты 7500, 6200, 5250, 2200 и 1100 кал. л. н. пришлось пожарные события со скоростью аккумуляции угля, не превышающей пороговое значение. Снижение общей увлажненности в период 4.1-3.3 тыс. кал. л. н. способствовало высокой пожарной активности, повлекшей увеличение освещенности территории и усиление развития растений нижних ярусов – кустарников и трав. Начиная с 2.4 тыс. кал. л. н. в пыльцевом спектре нарастает содержание пыльцы темнохвойных видов, болото переходит с евтрофно-мезотрофной стадии развития на мезотрофную, что совпадает со значительным уменьшением величины солнечной инсоляции для 55° с. ш. После 1200 кал. л. н. на суходолах развиты пихтово-елово-кедровые леса в условиях стабильного увлажнения, пойменное болото перешло на мезотрофно-олиготрофную стадию развития. Временной интервал 700-600 кал. л. н. отличается снижением доли хвойных растений, основу спорово-пыльцевого спектра составляют *Betula sect. Nanae*, сем. Ericaceae и род *Sphagnum*, низкая пыльцевая продуктивность древесных отмечена и около 450-400 кал. л. н., что может отражать похолодание Малого ледникового периода. Последние 150-200 лет фиксируется сокращение доли *Pinus sibirica* и увеличение содержания *Pinus sylvestris* в составе древостоя, что в совокупности со стабильно высоким содержанием макроугля отражает нарастающую континентальность климата.

Ключевые слова: реконструкция растительности и климата, голоцен, торфяные отложения, пожары, низкогорье, Восточный Саян.

Mires in the foothill areas have high palaeoecological information content. Pollen and spores, which record composition and abundance changes of the main forest-forming species' pollen in combination with pollen of shrubs and grasses, make it possible to trace altitudinal shifts in vegetation belts caused by relative warming or cooling [Blyakharchuk, 2011; Borisova, Panin, 2019; Blyakharchuk & Kurina, 2021; Bezrukova et al., 2022]. The feature of peat strata to retain various organogenic and mineral fractions that fall on their surface as a result of deluvial and river runoff [Volkova, 2005; Chernova, 2005] makes it possible to identify periods of increased erosion, including those of a pyrogenic factor. To date, within the Altai-Sayan region, the features of palaeoecological conditions in the western part of the Eastern Sayan have been less studied. To understand the main trends in the development of mountain taiga landscapes in specific physical-geographical, climatic and forest growth conditions, a comprehensive study of peat deposits seems extremely important.

The study site is located on the north-western macroslope of the Eastern Sayan in the floodplain of the Mina River (right bank of the Yenisei River). The river valley lies between the slopes of the Kuturchinsky and Koysky Belogorye, north of the Manskoye Belogorye ridge (the western end of the main watershed ridge of the Eastern Sayan), and belongs to the northern part of the Mansko-Kansky low-mountain region. The mires are confined to the widest sections of the Mana and Mina rivers valleys. At the river mouth of the Mina the terrace part is swampy; in the high-mountain belt, small areas of mires are confined mainly to the shores of overgrown lakes. The studied mire area is located on the right bank of the Mina River in the middle reaches above the mouth of the left-bank tributary of the Kuturchin River. The modern mire vegetation cover is represented by a mixed sparse forb-sphagnum-green moss forested mire.

Using botanical analysis of peat, three columns were studied: 1) in a terrace depression at a point with coordinates 54.92° N, 94.28° E and an absolute mark of 560 m, where the thickness of the deposits was 2.40 m, of which: peat - 2.05 m, peaty loam - 0.35 m; 2) at a distance of 450 m from the slope depression, the total thickness is 1.95 m, of which 1.25 m is peat, 0.7 m is loam; 3) at a distance of 750 m from the slope, where peat is 0.8 m, below there is gravel.

Samples of the thickest column were studied using a combination of methods: pollen [Grichuk, Zaklinskaya, 1948], botanical analysis [Kulikova, 1974], macrocharcoal analysis [Clark, 1988], determination of peat ash content was carried out according to [GOST 11306-2013, 2019]. AMS dating was performed in Poznań Radiocarbon Laboratory, Poland.

Peaty loam (depth interval 2.40–2.05 m, 7900–5700 cal. yr BP) includes remains of the bark of *Picea obovata* and *Pinus sibirica*, as well as tissues of green and sphagnum moss. The peat core has a two-layer structure; in the interval of 2.05–1.35 m, the deposit is formed by lowland woody-sphagnum peat, with ash content values varying from 15 to 30%, except for the depth interval of 1.87–1.81 m (4500–4100 cal. yr BP), where the maximum value of 53% is observed. A sample from this stratigraphic layer was separated in an aqueous medium with subsequent examination of the fine and medium-dispersed phase using a TESCAN VEGA 3 SBH scanning electron microscope with an OxfordX-Act energy-dispersive microanalysis system. The content of Si (6%) and Al (2.2%) indicates a high proportion of terrigenous admixture in the formation of the stratigraphic layer, likely associated with post-pyrogenic erosion in the study area. The upper part of the core (1.35–0.07 m, approximately from 1100 to 60 cal. yr BP) is formed by sphagnum peat.

Starting from 7970±23 cal.yr BP on the Kuturchinsky and Koysky Belogorye slopes fir-spruce-siberian pine forests grew. In the Mina River valley with a wide floodplain conditions developed for the pinching off of an oxbow lake with its gradual silting and overgrowing. The time interval of 7200–5700 cal. yr BP was characterized by high fire activity and the beginning of peat accumulation in the Mina River floodplain (around 5700 cal. yr BP), which may reflect the response of landscapes to the Holocene Thermal Maximum.

The period 5300–4100 cal. yr BP is characterized by consistently high humidity, with slopes covered by fir-spruce-cedar forests and a forb-fern ground cover. The time interval 4500–4100 cal. yr BP is characterized by the passage of strong fires and increased surface erosion, which contributed to a high input of mineral particles to the surface of the mire, which together may reflect the manifestation of pyrogenic erosion.

Starting from 4100 cal. yr BP, a significant reduction in the amount of dark coniferous species pollen is noted (up to 40–44% in total): *Pinus sibirica* – 25–27%, *Picea* – 5–8%, with a slight increase in the content of *Abies* pollen (up to 7–9%) and *Betula* sect. *Nanae* (up to 18–23%). The total content of grass pollen increases to 20%, representatives of the following taxons are noted: Rosaceae, Caryophyllaceae, Poaceae, *Artemisia*, *Thalictrum*. In the mire the spruce-sphagnum community is replaced by green moss-sphagnum yernik. This period is marked by the maximum extremum in the content of macrocharcoals indicating the close localization of the fire to the study point. The totality of the identified paleosignals may indicate a decrease in overall humidity in the period 4100–3300 cal. yr BP and high fire activity. The increase in fire activity during this period is in good agreement with the Subboreal Thermal Maximum of the Holocene (from 4200 to 3200 cal. yr BP), which was identified by N.A. Khotinsky [Khotinsky, 1982] for Northern Eurasia, or on a global scale with “event 4.2” (4.2–3.8 thousand cal. yr BP) [Mayewski et al., 2004; Wang et al., 2010].

The cooling period around 2600 cal. yr BP, known for the temperate latitudes of the Northern Hemisphere [Shnitnikov, 1957], was also noted in the highlands of the Eastern Sayan [Bezrukova et al., 2004], in Altai [Galakhov et al., 2012], and in the Baikal region [Vorobyeva, 2010]. In the Mina core, this period was manifested by an increase in the amount of *Betula* sect. *Nanae* (up to 25% in the pollen sum), a high content of *Equisetum* (16% of the proportion of spores), and a complete absence of traces of macrocharcoal.

Beginning at 2400 cal. yr BP, the pollen content of dark coniferous species. In the range of 2400–2000 cal. yr BP the content of spruce is noted – up to 13.6%, which may indicate a wide distribution of *Picea* and a consistently high soil moisture content. At the same time, sphagnum moss dominates in the ground cover of the mire. *Sphagnum angustifolium* dominates, the tree layer is absent, the mire passes from the eutrophic-mesotrophic stage of development to the mesotrophic-oligotrophic one, which coincides with a significant decrease in the amount of solar insolation [Berger, Loutre, 1991], for 55° N approximately to 480–490 Wm⁻².

Fires occurred 1550, 1100 and 900 cal. yr BP which in the observations may reflect a change in humidification conditions towards lower humidity. In general, the interval 1600-1100 cal. yr BP correlates well with the Cooling of the Dark Ages (410-775 AD).

The interval 1100-900 cal. yr BP is characterized by a peak value of dark coniferous species (68-73%– the maximum extremum for the entire reconstruction period), the participation of *Pinus sibirica* – 50-52%, *Picea* – up to 11%, *Abies* – up to 12%. This period is consistent with the Medieval Warm Period, which covered significant areas of the Northern Hemisphere from approximately 830 to 1100 AD [PAGES 2k Consortium, 2013; Moberg et al., 2005].

The most dramatic changes in vegetation composition occurred during the period 750–650 cal. yr BP: pollen concentration was extremely low, the contribution of conifers to the pollen sum was minimal, and the majority consisted of *Betula* sect. *Nanae* grains (over 65%), *Ericaceae* pollen, and *Sphagnum* spores.

In the interval of 600-500 cal. yr BP stable humid conditions are recorded, fir-spruce- siberianpine forests are developed. Later, around 500–450 cal. yr BP, a high proportion of Siberian pine in the forest composition is noted (41% of the pollen sum), with a decrease in the proportion of other dark coniferous species (up to 4–7%), a reduction in spore content to 20%, and a maximum of *Ericaceae* and *Artemisia* in the grass and shrub group, which may reflect increased continentality.

Further, at 450–400 cal. yr BP, while Siberian pine remained dominant, relatively low pollen productivity was noted. It is known that 1600-1826 AD became the coldest period of the Little Ice Age.

Later, consistently humid and cool conditions were observed in the study area, with fir-spruce-Siberian pine forests continuing to develop on the slopes. At the final stage, an increase in the pollen content of *Pinus sylvestris* (up to 13%) and a decrease in the proportion of *Pinus sibirica* (up to 27%) were recorded. The content of macrocharcoal in peat has remained consistently high over the past 1000 years, reflecting the increasing intensity of fires characteristic of the entire Northern Hemisphere [Goldammer et al., 2013; Valendik et al., 2014; Ponomarev, Haruk V.I., 2016].

Key words: vegetation and climate reconstruction, Holocene, peat deposits, fires, low-mountain relief, Eastern Sayan.

ВВЕДЕНИЕ

Бореальные леса занимают значительную территорию нашей страны и играют чрезвычайно важную роль в поддержании экологического равновесия на Земле, в том числе в поглощении и связывании углерода, в смягчении глобальных изменений климата [The Boreal Forest, 2020]. В настоящее время для понимания основных тенденций развития таежных ландшафтов в условиях меняющегося климата представляется чрезвычайно важным изучение ретроспективного отклика лесных экосистем в конкретных физико-географических условиях.

Хорошей палеоэкологической информативностью обладают болотные отложения. Оценить изменение структуры леса и смещение высотных границ растительных поясов в ответ на потепление или похолодание климата позволяет анализ фоссилизированных в болоте спорово-пыльцевых спектров [Blyakharchuk, 2011; Borisova, Panin, 2019; Blyakharchuk & Kurina, 2021; Bezrukova et al., 2022]. Способность торфяных толщ удерживать различные органогенные и минеральные фракции, попадающие на их поверхность, дает возможность выделять периоды усиления делювиального и речного стока [Volkova, 2005; Chernova, 2005], этапы активизации эрозии, в том числе и пирогенной природы.

Объектом настоящего исследования являются торфяные отложения, расположенные на северо-западном макросклоне Восточного Саяна в пределах Манско-Канского лесорастительного округа Восточно-Саянской провинции Алтае-Саянской горной области [Korotkov, 1994]. Леса Манско-Канского района низких гор по целевому назначению относятся к эксплуатационным и защитным примерно в равной степени [Draft forest plan, 2018]. Они имеют большое значение для поддержания гидрологического режима крупных правобережных притоков р. Енисей, таких как р. Мана и р. Кан.

Цель работы заключается в реконструкции отклика ландшафтов в Манско-Канском районе низких гор на масштабные изменения климата в голоцене. Для выполнения поставленной цели решались следующие задачи: реконструировать динамику растительных сообществ в низкогорье Восточного Саяна; восстановить динамику пожарного режима и выделить интервалы усиления пожарной активности в окрестностях болота; сопоставить полученные данные с известными глобальными климатическими тенденциями.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования располагается на северо-западном макросклоне Восточного Саяна, в пойме р. Мина. Долина реки Мина залегает между склонами Кутурчинского и Койского Белогорья, севернее хребта Манское Белогорье. Последний совместно с хребтом Канское Белогорье образует западную оконечность главного водораздельного хребта Восточного Саяна. Рельеф выположенный, хребты характеризуются уплощенными широкими вершинами и пологими склонами, ориентированы параллельно главному хребту с юго-востока на северо-запад [Nikolaev, Chernov, 1988].

Река Мина является крупным правобережным притоком р. Мана, бассейн которой занимает значительную площадь северной части Манско-Канского района низких гор (рис. 1). Район характеризуется сочетанием максимальной для Восточного Саяна густоты водотоков – 0.68-0.7 км/км² и минимальной величины падения русла – 2.3 м/км. Длинные (до 3 км) участки врезания русла в коренные породы чередуются с участками меандрирования, в пределах которых происходит аккумуляция аллювия [Nikolaev, Chernov, 1988].

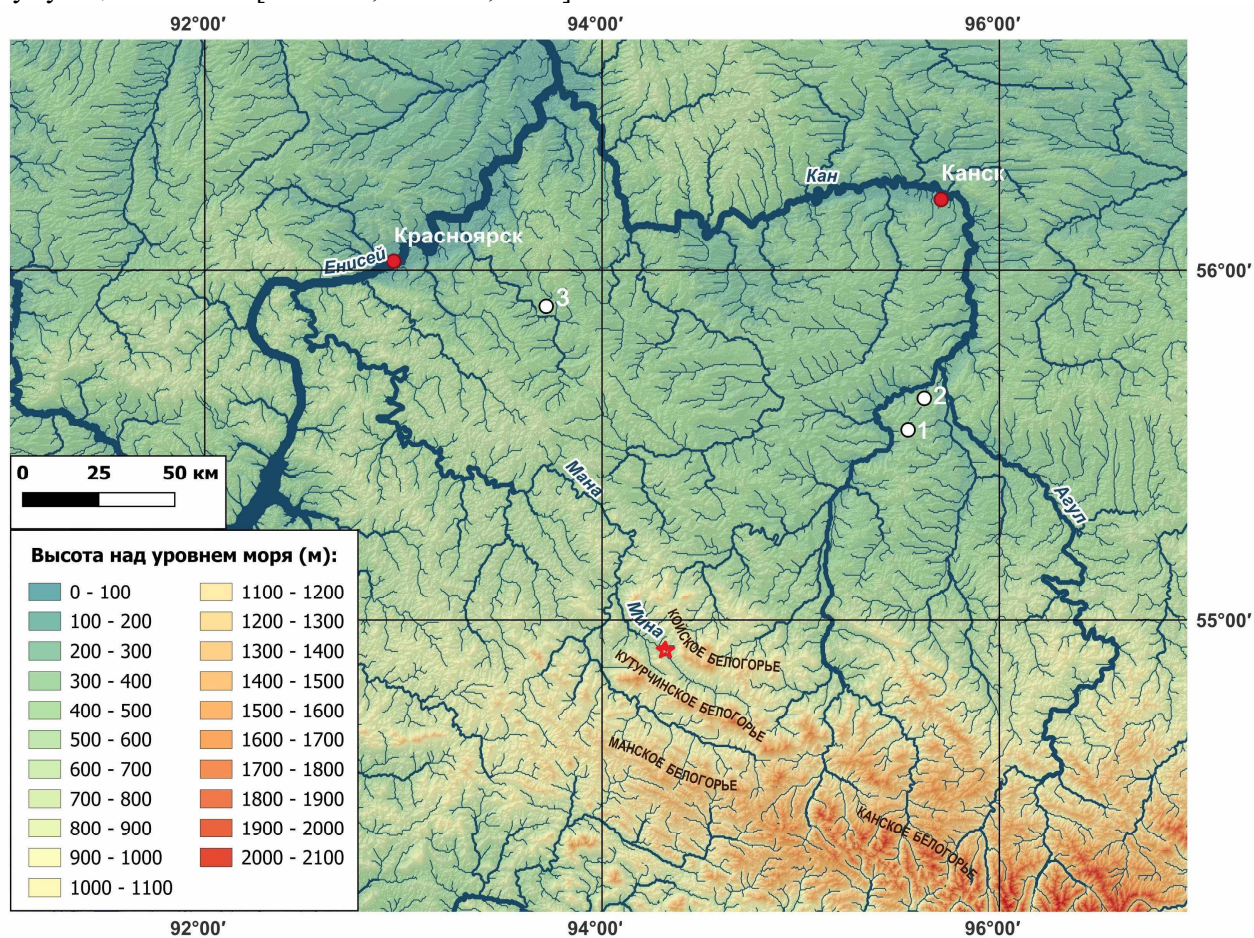


Рис. 1. Месторасположение района исследования, звездочка – точка отбора торфяной колонки «Мина»; положение ближайших изученных торфяных разрезов: 1 – болото Большое [Grenaderova et al., 2024a], 2 – болото Сосновка [Grenaderova et al., 2024b], 3 – болото Пинчинское (Mikhailova et al., 2021). Карта построена с помощью геоинформационной системы QGIS 3.32.3-Lima.

Fig. 1. Location of the study area, the asterisk indicates the sampling point of the Mina peat core; location of the nearest studied peat sections: 1 – Bolshoe mire [Grenaderova et al., 2024a], 2 – Sosnovka mire [Grenaderova et al., 2024b], 3 – Pinchinskoye mire (Mikhailova et al., 2021). The map was created using the QGIS 3.32.3-Lima geographic information system.

На правобережье р. Мина водосбор ограничен высотами склонов южной и юго-западной экспозиции Койского Белогорья. Они достигают в среднем отметки 1350-1250 м в верховье реки, 1200-1000 м (отдельные вершины до 1469 м, 1518 м, Голец Кирельский – 1733 м) в среднем течении и 1300-1000 м – в нижнем течении реки. На левобережье водосбор р. Мина представлен склонами

северо-восточной экспозиции Кутурчинского Белогорья с преобладающими абсолютными отметками около 1400 м (отдельные вершины на водоразделе достигают 1637 м, 1643 м, 1765 м, 1876 м). Исток Мины находится на высоте 1240 м. Высота уреза реки на приустьевом участке, в месте впадения р. Мина в р. Мана, составляет 490 м.

Климат района резко континентальный, умеренно прохладный, с продолжительной и суровой зимой, с неустойчивой прохладной погодой летом, в течение которого выпадает основная масса осадков. На высотах 900-1300 м средняя температура января колеблется от -17 до -25°C, июля – от 12 до 14°C. Распределение осадков находится в тесной зависимости от ориентации горных склонов: на западных и юго-западных склонах, открытых в сторону влажных воздушных потоков, их выпадает до 800 мм и более в год, в северных предгорьях – до 400 мм [Parmuzin, 1964]. Температурный максимум колеблется от +6°C в январе и до +38°C в июле [Krasnoborov, 1963].

Основными типами ландшафтов Восточного Саяна являются горно-таёжные и высокогорные [Mikhailov, 1961]. Преобладают елово-кедрово-пихтовые леса на горных таёжных слабоподзолистых светлых глубоковыщелоченных почвах [Parmuzin, 1964]. Верхняя граница леса в Кутурчинском Белогорье проходит на высоте 1450-1600 м, светлохвойные леса поднимаются до отметки 900 м [Krasnoborov, 1963]. В высокогорье наблюдается сочетание черт альпийской и гольцовой растительности. Небольшие участки болот в основном занимают берега зарастающих озёр.

Болотная растительность приурочена к наиболее широким отрезкам речных долин и приустьевым участкам в предгорье и низкогорье. Возраст болот в долинах рек с водосбором на северном макросклоне западной части Восточного Саяна не превышает 6000 кал. л. н. [Rodionova, Grenaderova, 2016, 2018; Grenaderova et al., 2024a]. Наиболее древние из известных торфяных толщ перирогенной области Восточного Саяна и Сибирской платформы, расположенные в южной части Рыбинской впадины (самой крайней северо-восточной межгорной впадины Саяно-Алтайской складчатой области) [Nikolaev, Chernov, 1988], имеют возраст 8500-7000 кал. л. н. [Mikhailova et al., 2021; Grenaderova et al., 2024b] и залегают на старичных (озерных) суглинках различной мощности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследуемое болото находится в среднем течении реки Мина, выше устья её левобережного притока р. Кутурчин. Долина р. Мина здесь асимметрична, поперечный профиль ящикообразный. Ширина правобережной заболоченной поймы достигает 800 м, уступ поймы возвышается на 0.7 м над урезом реки. Русло шириной 10-15 м, глубина – 0.6-0.8 м, скорость течения воды – 1.3 м/с. Левый берег представлен скальным склоном Кутурчинского Белогорья с крутизной более 45° (рис. 2).

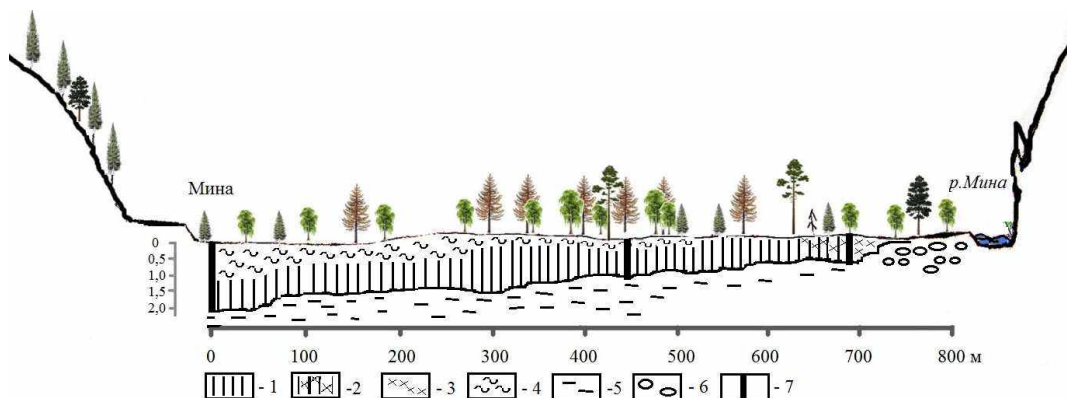


Рис. 2. Схема поперечного профиля болота в пойме р. Мина.

Торф: 1 – древесный, 2 – древесно-хвощевой, 3 – хвощевой, 4 – сфагновый, 5 – суглинок, 6 – галечник, 7 – колонки отбора на детальный ботанический анализ торфа.

Fig. 2. Cross-sectional diagram of a mire in the Mina River floodplain. Peat: 1 – wood, 2 – wood-horsetail, 3 – horsetail, 4 – sphagnum, 5 – loam, 6 – gravel, 7 – sampling columns for detailed botanical analysis of peat.

Современный растительный покров представлен смешанным редкостойным разнотравно-сфагново-зеленомошным облесенным болотом. В притеррасной части болота древесный ярус образован *Picea obovata* Ledeb., *Betula pubescens* Ehrh., из кустарников отмечены *Betula* sect. *Nanae*, *Rhododendron palustre* L., кустарничковый ярус представлен *Oxycoccus palustris* Pers., в моховом покрове преобладает зеленый мох (*Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schwaegn., *Pleurozium shreberi* (Brid.) Mitt, *Calliergonella cuspidata* (Hedw.) Loeske. По направлению к урезу реки (в 100 м от склона) наблюдается выпадение ели из древесного яруса, здесь и далее высота березы не превышает 3-4 м, напочвенный покров образует разнотравно-осоково-сфагновое сообщество с клюквой. В центральной части болота (380-700 м от склона) в древесном ярусе появляется *Pinus sylvestris* L., *Larix sibirica* Ledeb., присутствуют *Picea obovata*, *Betula pubescens*, травяно-кустарничковый ярус представлен: *Vaccinium vitis-idaea* L., *Oxycoccus palustris*, *Carex cespitosa* L., *Carex rostrata* Stokes., *Eriophorum*, *Lycopodium* sp., моховой покров слагают *Sphagnum angustifolium* C. Jens., *Sph. fuscum* (Schimp.) Klinggr., *Sph. divinum* Flatberg & K. Hassel, *Sph. teres* (Schimp.) Ångstr., *Sph. cuspidatum* Ehrh. ex Hoffm., *Sph. squarrosum* Crome, *Sph. rubellum* Wils., *Sph. warnstorffii* Russow. Ближе к урезу реки в составе древесного яруса преобладают береза и сосна сибирская (*Pinus sibirica* DuTour.), отмечены багульник, клюква, брусника, в моховом покрове доминирует зеленый мох (*Pleurozium schreberi*, *Tomentypnum nitens* (Hedw.) Loeske, *Dicranum bonjeanii* De Not., *Polytrichum commune* Hedw., *Calliergonella cuspidate*, *Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al., *Ptilium* sp., *Drepanocladus* sp.). У реки произрастает березняк осоково-разнотравный с лиственницей и елью, почва аллювиально-серогумусовая глееватая легкосуглинистая.

Мощность торфа снижается по направлению от присклонового понижения к урезу. Вблизи склона максимальная мощность торфа достигает 2.05 м, в центральной части снижается до 1.25 м, а в 50 м от реки составляет 0.8 м, постепенно сходя на нет.

Отбор болотных отложений из трех колонок проводился с помощью пробоотборника Eijkelkamp Peat sampler. Опробование выполнено с шагом в 5-8 см. Первая колонка расположена в притеррасном понижении в точке с координатами 54.92° с.ш. и 94.28° в.д. (абсолютная отметка 560 м) и имеет мощность 2.40 м, из них: торф – 2.05 м, оторфованный суглинок – 0.35 м. Вторая колонка отобрана на расстоянии 450 м от присклонового понижения, общая мощность достигает 1.95 м, из них: 1.25 м – торф, 0.7 м – суглинок. Третья колонка заложена ближе к урезу реки, мощность торфа – 0.8 м, ниже галечник (рис. 2).

Образцы первой колонки изучены комплексом методов: спорово-пыльцевой [Grichuk, Zaklinskaya, 1948], ботанический [Kulikova, 1974], палеоантракологический анализ [Clark, 1988], определение зольности торфа проведено согласно [GOST 11306-2013, 2019]. Минералы из высокозольной прослойки торфа (1.87-1.81 м) изучены методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе TESCAN VEGA 3 SBH с системой энергодисперсионного микроанализа OxfordX-Act. AMS-датирование выполнено в Poznań Radiocarbon Laboratory, Польша. Радиоуглеродный возраст в интервале глубин 2.30-2.35 м составил 7135±35 ¹⁴C (Poz-119029), 1.35-1.40 м – 1190±30 ¹⁴C (Poz-119028). Калибрование и построение глубинно-возрастной модели осуществлено в программе R [R CoreTeam, 2013] с использованием пакета «clam» [Blaauw, 2010]. Калиброванный возраст в интервале глубин 2.30-2.35 м составил 7970±23 кал. л. н., а для интервала 1.35-1.40 м – 1121±42 кал. л. н.

Лабораторная подготовка образцов для спорово-пыльцевого анализа проводилась по методике [Moore et al., 1991] с применением HCl и NaOH, в модификации без проведения ацетализа и обработки тяжелой жидкостью. Промывание образцов выполнено через сито 250 мкм. Обработке подвергались пробы объемом 1 мл, таблетки со спорами *Lycopodium* для подсчета концентрации пыльцы не применялись. Анализ проводился на микроскопе «Микромед-3» при увеличении ×400, с использованием определителей [Kurgijanova, Aleshina, 1972, 1978; Veug, 2004]. Для каждого образца подсчитывалось не менее 300-350 пыльцевых зерен древесных и травянистых в сумме. На спорово-пыльцевой диаграмме (рис. 3) обилие пыльцы травянистых (NAP) и древесных (AP) выражено в процентах от их суммы (пыльца представителей сем. Сурегасеае исключена из расчета), обилие споровых посчитано отдельно. Для выделения спорово-пыльцевых зон применялся метод broken stick model [MacArthur, 1957] в программе R пакетах ‘vegan’, ‘rioja’ и ‘analogue’.

При подготовке к ботаническому анализу пробы торфа кипятили в течение 10 минут в 10%-ном растворе NaOH, промывали под струей горячей воды через сито с диаметром ячейки 250 мкм [Largin, 1977]. Микроскопирование осуществлялось при помощи светового микроскопа «Микромед-3» при

увеличении $\times 200$. Для определения видовой принадлежности растительных остатков использовались атласы [Dombrovskaya et al., 1959; Кас et al., 1977].

Для анализа макрочастиц угля из каждого интервала была отобрана осредненная проба объёмом 1 см^3 . Лабораторный этап включал в себя пробоподготовку по стандартной методике [Clark, 1988] с предварительной обработкой 5%-ным раствором пиродифосфата натрия ($\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7$) и 6%-й перекисью водорода (H_2O_2). Подсчет частиц угля проведен при увеличении $\times 20$, учитывались все частицы крупнее 125 мкм . Выявленное количество угольков в каждом интервале и полученный с помощью калибровочной кривой интерполированный возраст были введены в качестве исходных параметров в программу CharAnalysis [Higuera, 2009]. В исходном файле обработки данных применены следующие значения: для интерполяции использовался временной отрезок 10 лет; метод сглаживания данных – функция локальной взвешенной регрессии с робастными весами (Robust LOWESS) со сглаживающим интервалом в 500 лет; тип пороговых значений – локальный; вероятность, при которой отсекаются минимальные значения CHAR, – 0.05; временной интервал, использовавшийся для сглаживания данных расчёта межпожарных интервалов, – 1000 лет.

Полученные схемы демонстрируют скорость аккумуляции макрокопических частиц угля (CHAR), локальные пожарные эпизоды и интервалы повторения пожаров в заданном временном отрезке (рис. 4). Локальный пожарный эпизод (“+”) отражает первичное отложение древесного угля от пожара и/или серии пожаров, находящихся в радиусе от нескольких десятков-сотен метров [Clark et al., 1998] до 3 км [Higuera, 2009] от объекта исследования.

Графическое отображение результатов выполнено при помощи программ C2 (распределение макрофоссилий растений, пыльцы и спор) [Juggins, 2003].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ макрофоссилий и зольность торфа

Оторфованный суглинок (интервал глубин 2.40 – 2.05 м, 7.9-5.7 тыс. кал. л. н.) включает остатки коры *Picea obovata* и *Pinus sibirica*, ткани зеленого и сфагнового мха (рис. 3).

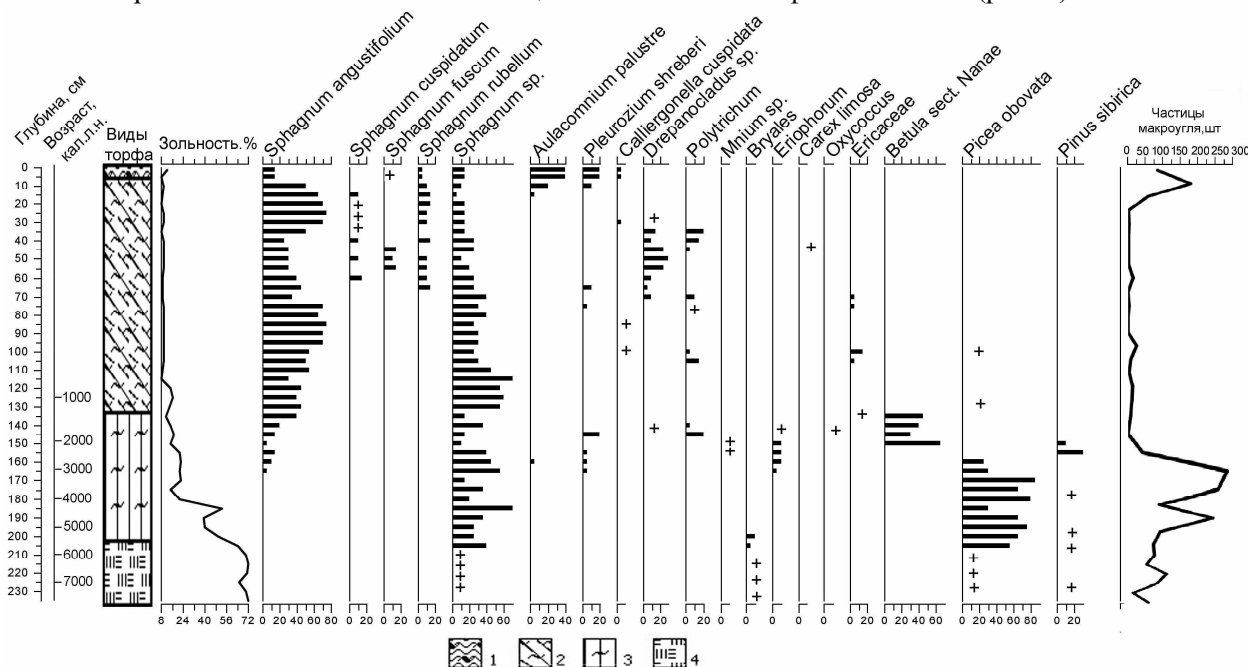


Рис. 3. Виды торфа и основные растения-торфообразователи из отложений болота Мина, зольность торфа и содержание частиц макроугля, шт./см³

Торф: 1 – гипновый, 2 – сфагновый переходный, 3 – древесно-сфагновый низинный, 4 – оторфованный суглинок.

Fig. 3. Types of peat and main peat-forming plants from the Mina mire deposits, ash content of peat and content of macrocharcoal particles, pcs./cm³

Peat: 1 – hyprnum, 2 – sphagnum transitional, 3 – woody-sphagnum lowland, 4 – peaty loam.

Торфяная толща имеет двуслойное сложение. В интервале 2.05-1.35 м залежь образована низинным древесно-сфагновым торфом. Значение зольности варьирует от 15 до 30%, за исключением интервала глубин 1.87-1.81 м (4.5-4.1 тыс. кал. л. н.), где наблюдается максимум – 53%. Проба из данного стратиграфического слоя подвергнута сепарации в водной среде с последующим исследованием мелко- и среднедисперсной фракции с применением сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 SBH с системой энергодисперсионного микроанализа OxfordX-Act. Микроанализ позволил выявить присутствие в пробе зерен пирита размером 0.5-2.5 мкм, формирующие шаровидные агрегаты, новообразования барита, а также неидентифицированные в минералогическом отношении фосфаты кальция. В большом количестве представлена терригенная компонента – кристаллы циркона размером до 60 мкм (рис. 4 А), кварца, ортоклаза, альбита различного размера, вплоть до 180 мкм. В пробе отмечены остатки древесины со вскрытыми и истонченными в результате пиролиза клеточными стенками (толщиной 0.8-1.1 мкм) размером до 600 мкм. Поверхности углистых остатков покрыты угловатыми частицами алюмосиликатов размером от 2 до 100 мкм, слабо отделяемых в водной суспензии ультразвуком (рис. 4 Б). Содержание Si (6%) и Al (2.2%) указывает на высокую долю терригенной примеси в формировании стратиграфического слоя, что было связано, вероятно, с развитием постпирогенной эрозии на исследуемой территории.

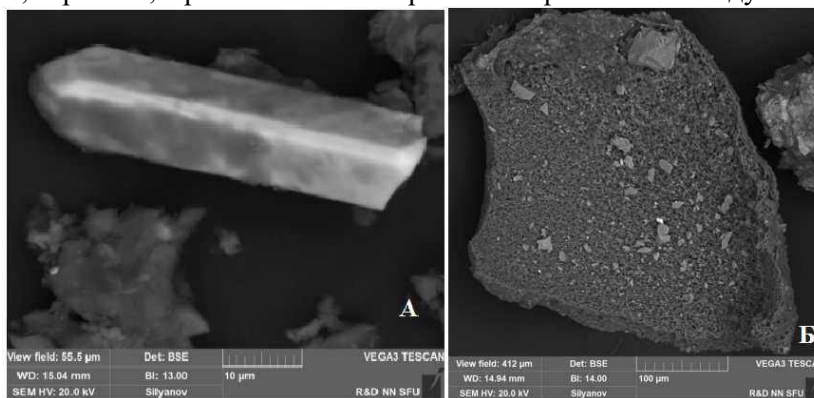


Рис. 4. Микрофотография пробы из интервала 1.87-1.81 м (4.5-4.1 тыс. кал. л. н.).

А – кристалл циркона размером 55 мкм, Б – частица обугленной древесины. Определение выполнено при помощи системы энергодисперсионного микроанализа OxfordX-Act, входящего в состав сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 SBH в R&D центре «Норникель» СФУ.

Fig. 4. Micrograph of a sample from the interval of 1.87-1.81 m (4.5-4.1 thousand cal. years ago). A – zircon crystal 55 μm in size, B – particle of charred wood. The determination was made using the OxfordX-Act energy-dispersive microanalysis system, which is part of the TESCAN VEGA 3 SBH scanning electron microscope in the R&D center of Norilsk Nickel SFU.

Верхняя часть толщи (1.35-0.07 м, примерно от 1.1 тыс. кал. л. н. до 60 кал. л. н.) образована сфагновым торфом переходного типа, включает ткани *Sphagnum angustifolium*, *Sph. cuspidatum*, *Sph. fuscum*, *Sph. rubellum*, значения зольности варьируют от 7 до 16%. Слой 0.07-0.00 м представлен гипновым торфом (*Aulacomnium palustre*, *Pleurozium shreberi*, *Calliergonella cuspidata*).

Спорово-пыльцевой анализ

Палинозона 1 (2.40-2.00 м; 7.9-5.3 тыс. кал. л. н.) отличается относительно низким содержанием пыльцы и спор. В общем составе пыльцевого спектра (без учета пыльцы осоковых) преобладает пыльца древесных растений. Доминирует *Pinus sibirica*, содержание пыльцы варьирует в пределах 21-34%, доля *Picea* составляет 5-12%, *Abies* – 3-6%, *Pinus sylvestris* – до 12%, *Betula sect. Nanae* в среднем – 15%. Участие пыльцы травянистых растений в сумме не превышает 10%. Отмечены пыльцевые зерна представителей семейств Rosaceae, Ericaceae, Asteraceae, Chenopodiaceae, Cyperaceae, рода *Artemisia* и *Thalictrum*. Среди споровых преобладает *Sphagnum*, обильно Polypodiaceae.

Палинозона 2 (2.00-1.55 м; 5.3-2.4 тыс. кал. л. н.). Содержание пыльцы древесных растений варьирует от 80 до 90% от общего состава пыльцевых зерен. Доминирующее положение занимает *Pinus sibirica* (25-49%), *Picea* (5-12%), *Abies* (4-9%), *Pinus sylvestris* (до 6%), *Betula sect. Nanae* (9-

25%). Среди пыльцы мелколиственных растений в небольшом количестве присутствует пыльца *Duschekia*. Доля пыльцы травянистых растений варьирует от 11 до 20% с максимумом (20%) в интервале глубин 1.74-1.68 м (3.7-3.3 тыс. кал. л. н.). Среди них высока доля *Artemisia* и *Rosaceae* (до 7% каждый). Отмечены представители семейств *Ericaceae*, *Ranunculaceae*, *Apiaceae*, *Roaceae*, родов *Polemonium*, *Thalictrum*. Единично фиксируется пыльца семейств *Caryophyllaceae* и *Asteraceae*. В группе споровых растений доминирует *Sphagnum*. Зона отличается наибольшим обилием *Bryales* до 35%, *Polypodiaceae* – до 14%, *Equisetum* – 5-17%.

Палинозона 3 (1.55-0.96 м; 2.4-0.8 тыс. кал. л. н.). Доля пыльцы древесных растений в составе пыльцевого спектра в среднем составляет 91%. Доминирует *Pinus sibirica* 48-52%, *Picea* и *Abies* до 12-14% каждый. Для зоны характерно небольшое, по сравнению с остальными зонами, содержание пыльцы *Betula sect. Nanae* – 3-7%, и только в конце зоны ее участие возрастает до 12-17%. Количество пыльцы *Pinus sylvestris* (до 12%) и *Betula sect. Albae* (до 6%) отражает заносный характер. Отмечено сокращение пыльцы травянистых растений, пыльца рода *Artemisia*, семейств *Ranunculaceae* и *Rosaceae* встречается единично.

Палинозона 4 (0.96-0.0 м; 0.8 тыс. л.н. – настоящее время). Основной фон в палиноспектрах по-прежнему составляет пыльца деревьев (86%). *Pinus sibirica* сохраняет преимущество, но доля ниже, чем в предыдущих зонах. Содержание пыльцы *Picea* и *Abies* по 4-7%, за исключением интервала 0.80-0.64 м (620-500 кал. л. н.), где отмечено увеличение ели и пихты до 10 и 14% соответственно. В интервале 0.88-0.80 м (около 690-620 кал. л. н.) фиксируется относительно низкая концентрация пыльцы по сравнению с остальными пробами, участие темнохвойных пород в сумме составило 11.8%, содержание *Betula sect. Nanae* в составе данного спектра достигает 47.6%, а *Ericaceae* – 16%. В целом в этой палинозоне сопутствующее положение в группе трав и кустарничков занимают пыльцевые таксоны *Artemisia* и *Ericaceae* (3-7%). Присутствуют единичные пыльцевые зерна представителей семейств *Chenopodiaceae*, *Rosaceae*, *Ranunculaceae*, а также рода *Thalictrum*. Среди споровых растений, как и в палинозоне 2, абсолютный доминант – *Sphagnum* (91-98%).

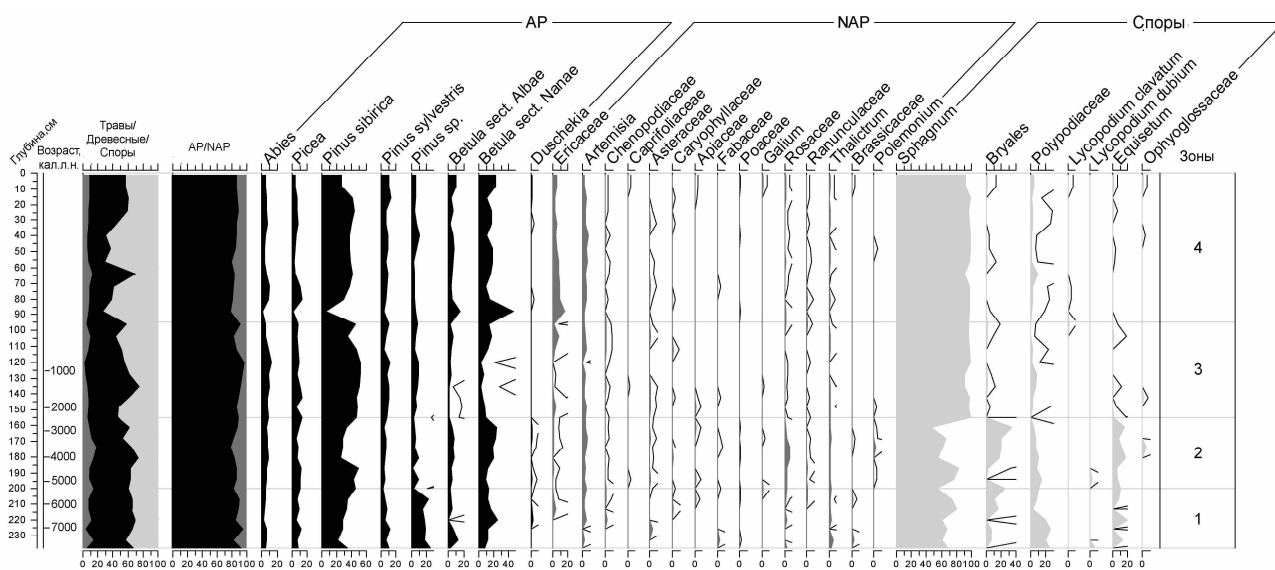


Рис. 5. Спорово-пыльцевая диаграмма отложений болота Мина. AP+NAP=100%.

AP – древесные и кустарники, NAP – травянистые и кустарнички. Дополнительный контур показывает увеличение базового пыльцевого таксона в 10 раз.

Fig. 5. Spore-pollen diagram of the Mina mire deposits. AP+NAP=100%. AP – trees and shrubs, NAP – herbs and shrubs. The additional contour shows a 10-fold increase in the basic pollen taxon.

Анализ макрокопических частиц угля

Содержание частиц макроугля варьирует от единичных значений до нескольких сотен штук на 1 см^3 . Максимальное количество приходится на интервалы: 0.08-0.16 м – 184 шт/см³, 1.61-1.87 м – до 291 шт/см³ и в суглинке в слое 2.13-2.20 м – до 114 шт/см³ (рис. 3). Пожарные эпизоды соответствуют следующим временным отметкам: 6600, 5750, 4300, 3400, 1550, 900, 550 и 200 кал. л. н. Именно в эти

временные окна наблюдались наибольшие превышения притока угля над его фоновым уровнем (рис. 6).

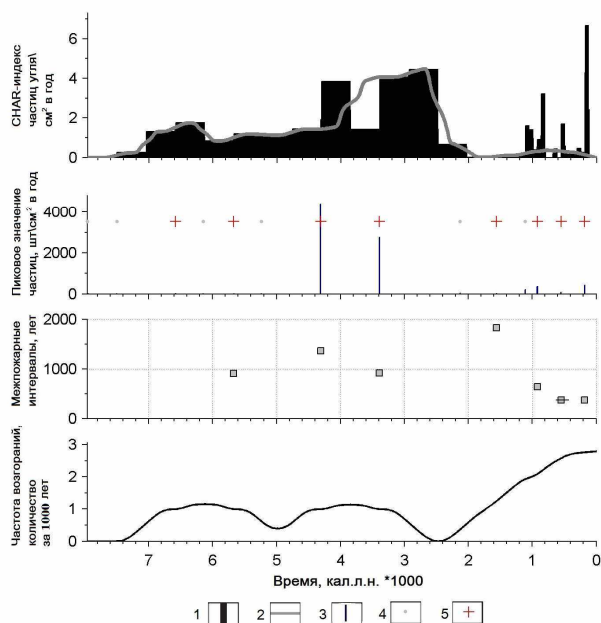


Рис. 6. Скорость аккумуляции макроскопических частиц угля и пиковые значения в пожарные эпизоды; межпожарный интервал и частота возгораний по данным изучения отложений болота Мина:

1 – контуры интерполированного притока древесного угля, 2 – смоделированный фоновый приток древесного угля, шт. (см² в год), 3 – пики древесного угля (разность интерполированного значения притока и фонового значения притока), 4 – пики, не превышающие пороговые, 5 – пожарный эпизод.

Fig. 6. Accumulation rate of macroscopic charcoal particles and peak values during fire episodes; interfire interval and fire frequency based on the study of Mina mire sediments:

1 – contours of interpolated charcoal inflow, 2 – simulated background charcoal inflow, pcs (cm² per year), 3 – charcoal peaks (difference between interpolated inflow value and background inflow value), 4 – peaks below threshold, 5 – fire episode.

Анализ макроскопических частиц угля позволил выделить три этапа усиления пожарной активности: I – около 6800-5400 кал. л. н., II – 4600-3200 кал. л. н. (включает 2 пожарных эпизода, отличающихся максимальным пиковым значением скорости аккумуляции угля), III – 1800 кал. л. н. – по настоящее время, отличается наименьшими межпожарными интервалами (около 200-400 лет). На даты 7500, 6200, 5250, 2200 и 1100 кал. л. н. пришлось пожарные события со скоростью аккумуляции угля, не превышающей пороговое значение. Средняя скорость аккумуляции древесного угля в основном составляет 2-4 частицы×см²/год. За последние 200 лет отмечено резкое увеличение данного показателя до 6 частиц×см²/год.

ОБСУЖДЕНИЕ

Комплекс полученных палеосигналов из отложений болота Мина, подкрепленный результатами радиоуглеродного датирования, позволил реконструировать следующий ход развития природных условий в Манско-Канском районе низких гор.

На склонах Кутурчинского и Койского Белогорья начиная с 7.9 тыс. кал. л. н. произрастали пихтово-елово-кедровые леса, периодически случались пожары. Заболачивание в пойме р. Мина началось по мере развития в долине перстративного или констративного режима аккумуляции (Lamakin, 1948; Kartashev, 1972; Shantzer, 1982). Последовавшее торфонакопление в совокупности с пожарной активностью может отражать реакцию ландшафтов на потепление и усиление аридизации в термический оптимум голоцена (7.5-6.0 тыс. л. н.) [Khotinsky, 1977; Wang et al., 2010]. Сигналы снижения общей увлажненности фиксируются и ниже по макросклону, в торфяниках, расположенных в пределах южной части Рыбинской впадины (рис. 1) [Mikhailova et al., 2021;

Grenaderova et al., 2024b]. В восточной части Восточного Саяна в пределах Окинского хребта начало торфонакопления также приходится на данный интервал [Bezrukova et al., 2004]. Вероятно, это вызвано снижением речного стока из-за уменьшения притока талых ледниковых вод.

Накоплению мощных аллювиальных и озерных отложений (предшествующих торфообразованию) на отдельных участках речной долины способствует переход от стадии врезания к стадии равновесия. Одна из причин развития участков реки с замедленным течением – формирование структуры, аналогичной периферийному компенсационному валу, в результате гляциоизостатических движений. Как, например, в Восточных Альпах, где, по данным исследования [Meu et al., 2016], даже небольшие оледенения способны оказывать существенное влияние на величины прогибания и компенсационного поднятия. Е.Н. Былинский [Bylinsky, 1996] считал, что воздействие гляциоизостази не ограничено покровными оледенениями, а имеет глобальное (планетарное) распространение. Известно, что в Восточном Саяне позднеплейстоценовое оледенение охватывало большую территорию, и в МИС 2 (Морская изотопная стадия; 24-11 тыс. л. н.) имели место крупные ледники [Arzhannikov et al., 2015].

Период 5.3-4.1 тыс. кал. л. н. в районе исследования отличался стабильно высоким увлажнением. Склоны Кутурчинского и Койского Белогорья покрывали пихтово-елово-кедровые леса с разнотравно-папоротниковым напочвенным покровом. На присклоновом понижении в пойме р. Мина произрастал заболоченный ельник. Временной интервал 4.5-4.1 тыс. кал. л. н. характеризуется прохождением пожаров и усилением поверхностной эрозии, повлекшей высокий привнос минеральных частиц на болото. Распространению пожаров в это время могла способствовать периодическая сухость летних сезонов, когда интенсивно горели значительные запасы лесных горючих материалов, накопленные при достаточном увлажнении.

Известно, что пожары существенно трансформируют водный баланс рек с облесенным водосбором. Снижение сомкнутости крон способствует сокращению периода снеготаяния, что влечет увеличение поверхностного стока в кратковременный период и приводит к усилению эрозии и росту твердого стока рек, что может отразиться в виде прослоек, обогащенных минеральным материалом, в торфяниках [Pomeroy et al., 1998; Chang, 2003]. Развитие постпирогенной эрозии особенно хорошо прослеживается на склонах крутизной более 12° [Gabbasova et al., 2019], которые занимают свыше 50% площади водосбора реки Мина.

На период 4.1-3.3 тыс. кал. л. н. выпадает максимум по содержанию макрочастиц угля. Слой отличается наибольшим содержанием крупных угольков размером около 1 мм, свидетельствующих о близкой к точке исследования локализации пожара. Состав спорово-пыльцевых спектров фиксирует снижение сомкнутости темнохвойных пород и расширение травянистых ассоциаций. Совокупность выявленных палеосигналов может указывать на снижение общей увлажненности и высокую пожарную активность, которая способствовала увеличению освещенности территории, усилению роста и развитию растений нижних ярусов – кустарников и трав. Это связано с повышением содержания минеральных веществ в почве, улучшением светового режима [Valendik, Ivanova, 1989; Ivanova, Golubtsova, 2014]. Усиление пожарной активности в данный период хорошо согласуется со среднесуббореальным термическим максимумом (4200-3200 лет назад), который выделяется Н.А. Хотинским [Khotinsky, 1982] для Северной Евразии, или, в глобальном масштабе, с «событием 4.2» (4.2-3.8 тыс. кал. л. н.) [Mayewski et al., 2004; Wang et al., 2010]. На восточном макросклоне Восточного Саяна изменения в составе растительных сообществ в период с 4450 по 2750 л. н. связывают с нарастающей континентальностью климата, увеличением аридности [Bezrukova et al., 2004].

Известное для умеренных широт Северного полушария похолодание около 2700-2600 л. н. [Shnitnikov, 1957], проявление которого отмечено в высокогорной зоне Восточного Саяна [Bezrukova et al., 2004], на Алтае [Galakhov et al., 2012], в Прибайкалье [Vorobyeva, 2010], нашло отражение и на болоте Мина. Здесь на смену ельнику сфагновому приходит ерник кустарничково-болотнотравно-сфагновый с *Pinus sibirica* в древесном ярусе.

Начиная с 2.4 тыс. кал. л. н. количество пыльцы темнохвойных пород в составе пыльцевого спектра постепенно увеличивается (до 70%), содержание ели достигает 13.6%. Это может свидетельствовать о широком распространении *Picea* в структуре древостоя и стабильно высокой влажности почв [Koltsova, 1980; Bezrukova et al., 2005]. В это же время в напочвенном покрове болота господствует сфагновый мох, доминирует *Sph. angustifolium*. Болото переходит с евтрофно-

мезотрофной стадии развития на мезотрофную, что совпадает со значительным уменьшением величины солнечной инсоляции [Berger, Loutre, 1991], для 55° с.ш. примерно до 480-490 Wm².

Около 2.0-1.6 тыс. кал. л. н. отмечено снижение обилия ели до 5.2%, восстановление до прежнего уровня (13.7%) произошло около 1.6-1.1 тыс. кал. л. н. В составе пыльцы травянистых растений зафиксировано высокое разнообразие (9 таксонов), несмотря на низкое участие этой группы в пыльцевом спектре (6%). В составе локального болотного сообщества в это время был развит ерник кустарничково-болотнотравно-сфагновый.

Временной интервал 1.1-0.9 тыс. кал. л. н. характеризуется максимумом пыльцы древесных в соотношении древесные/травянистые/споры, среди которых доминирует пыльца темнохвойных пород (68-73% от суммы пыльцы – максимум за весь период реконструкции), участие *Pinus sibirica* – 50-52%, *Picea* – до 11%, *Abies* – до 12%. Пожарные эпизоды установлены для 1100 и 900 кал. л. н. Данный период согласуется со Средневековым климатическим оптимумом, который охватывал значительные районы северного полушария примерно с 830 по 1100 г. н. э. [PAGES 2k Consortium, 2013; Moberg et al., 2005] и создал самые благоприятные условия для развития пихтово-елово-кедровых лесов на склонах Койского и Кутурчинского Белогорья.

Самыми кардинальными перестройками в составе растительного покрова характеризуется период 750-650 кал. л. н.: концентрация пыльцы крайне низкая, участие хвойных в формировании пыльцевого спектра минимальное, основу составляют зерна *Betula sect. Nanae* (свыше 65 %), пыльца *Ericaceae* и споры *Sphagnum*. По данным реконструкции, выполненной [Borisova, Panin, 2019] по отложениям из озера Тере-Холь (юго-восток Тувы), период 700-400 л. н. приходится на криоксеротическую фазу.

В интервале 620-500 кал. л. н. фиксируются стабильно влажные условия, развиты пихтово-елово-кедровые леса (доля пыльцы пихты и ели в составе древесных достигает соответственно 11 и 14%). Позднее, около 500-450 кал. л. н., значительно возрастает участие сосны сибирской в составе лесов (доля в пыльцевом спектре – 41%). Одновременно снижается участие других темнохвойных таксонов (до 4-7%), споровых растений – до 20% (вместо стабильных 50-55%), из которых 9% приходится на *Polypodiaceae*, а 91% – на споры *Sphagnum*. В группе травянистые+кустарнички отмечен максимум *Ericaceae* и *Artemisia*, что может отражать условия усиления континентальности. Известно, что вид *P. sibirica*, по сравнению с другими темнохвойными породами, более засухоустойчив, лучше защищен от чрезмерной солнечной инсоляции и повышения температуры [Pakharkova et al., 2020], что позволило виду удерживать господствующее положение в структуре древостоя.

Далее, около 450-400 кал. л. н., при сохранении доминирующего положения *P. sibirica* отмечена относительно низкая пыльцевая продуктивность (в 1 капле мацерата фиксируется в 2.5 раза меньше пыльцы, 130 зерен вместо 300). Известно, что интервал от 1600 до 1826 г. н. э. являлся наиболее холодным периодом Малого ледникового периода, температуры около 400 лет назад были примерно на 0.7°C ниже среднего показателя 1961-1990 гг. [Moberg et al., 2005].

Позже на исследуемой территории отмечались стабильно влажные и прохладные условия, на склонах развиты пихтово-елово-кедровые леса, на болоте – ерник зеленомошно-сфагновый, в моховом покрове наряду с доминантом *Sphagnum angustifolium* отмечены *Sph. rubellum*, *Sph. fuscum*, а также *Sph. cuspidatum*, среди зеленых мхов: *Drepanocladus sp.*, *Politrichum strictum* и *Pleurozium shreberi*.

Скорость аккумуляции угля за последние 150 лет достигла максимума – до 7 частиц на 1 см² в год (рис. 4), что отражает нарастающую интенсивность пожаров, характерную для всего северного полушария [Goldammer et al., 2013; Valendik et al., 2014; Ponomarev, Naruk, 2016], в составе лесов увеличивается участие *Pinus sylvestris*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате настоящего исследования получены новые палеоэкологические данные для западной части Восточного Саяна. Непрерывная стратиграфическая последовательность отложений болота Мина позволила, опираясь на индикаторы палеогеографической обстановки, проследить изменения ландшафтно-климатических особенностей в районе Манско-Канских низких гор на протяжении большей части голоцена.

В начале голоцена на некоторых участках русла реки Мина происходил переход от стадии врезания к стадии равновесия, что привело к накоплению в долине мощных аллювиальных и старичных отложений. В термический оптимум голоцена (7.5-6.0 тыс. л. н.) этот процесс способствовал активизации торфообразования. Длительное время на болоте был развит ельник осоково-сфагновый. Выпадение древесного яруса и переход болота на мезотрофную стадию с господствующим положением сфагнового мха пришелся на 2700-2400 кал. л. н.

В течение всего рассматриваемого периода, начиная с 7.9 тыс. кал. л. н., на склонах Кутурчинского и Койского Белогорья произрастали пихтово-елово-кедровые леса. Ориентированность склонов перпендикулярно направлению господствующих ветров и низкогорное положение обеспечивали достаточное увлажнение и смягчение климатических флуктуаций.

Однако глобальные климатические изменения нашли некоторое отражение в относительно стабильной видовой структуре лесов изучаемого района. Так, нарастание континентальности во время среднесуббореального термического максимума способствовало усилению пожарной активности и развитию постпирогенной эрозии, повлекшей привнос на болото различных микрочастиц (пирит, новообразования барита, кристаллы циркона, кварца, ортоклаза, альбита, остатки древесины со вскрытыми и истонченными в результате пиролиза клеточными стенками, углистые частицы, покрытые алюмосиликатом). Кроме того, в данный временной интервал отмечено сокращение ареала *Pinus sibirica* и увеличение площади, занятой травянистыми сообществами.

Наиболее благоприятные условия для развития пихтово-елово-кедровых лесов в низкогорье на склонах Койского и Кутурчинского Белогорья складывались 1060-870 кал. л. н. – в период Средневекового климатического оптимума. В это же время на болотах, расположенных ниже по склону (болото Большое, Сосновка), отмечено снижение увлажнения [Grenaderova et al., 2024a, b].

Вероятно, похолодания в конце голоцена являются причиной низкой пыльцевой продуктивности хвойных пород. Это отразилось в минимальной пыльцевой наполненности проб из отложений, сформированных 750-650 кал. л. н. и 450-400 кал. л. н.

В последние 150-200 лет происходило сокращение доли *Pinus sibirica* и увеличение содержания *Pinus sylvestris* в составе древостоя, что в совокупности со стабильно высоким содержанием макроугля отражает нарастающую континентальность климата.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00341, <https://rscf.ru/project/23-27-00341/>.

Авторы выражают благодарность сотрудникам R&D-центра ГМК «Норильский никель» Сибирского федерального университета С.А. Сильянову и Б.М. Лобастову за выполнение минералогического анализа и сканирующей электронной микроскопии.

ЛИТЕРАТУРА

Arzhannikov S.G., Arzhannikova A.V., Braucher R., Jolivet M. 2015. Late pleistocene glaciations in southern East Sayan and detection of MIS 2 terminal moraines based on beryllium (¹⁰Be) dating of glacier complexes. *Russian geology and geophysics*, 56(11): 1509–1521. DOI: 10.1016/j.rgg.2015.10.001

Berger A., Loutre, M.F. 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews*, 10(4): 297–317. DOI: 10.1016/0277-3791(91)90033-q

Beug H.-J. 2004. *Leitfaden der Pollenbestimmung für Mitteleuropa und angrenzende Gebiete*. Publisher Verlag Friedrich Pfeil, Munich, 542 pp. DOI: 10.1002/jqs.915

Bezrukova E.V., Abzaeva A.A., Letunova P.P., Kulagina N.V., Vershinin K.E., Belov A.V., Orlova L.A., Danko L.V., Krapivina S.M. 2005. Post-glacial history of Siberian spruce (*Picea obovata*) in the Lake Baikal area and the significance of this species as a paleo-environmental indicator. *Quaternary International*, 136(1): 47–57. DOI: 10.1016/j.quaint.2004.11.007

Bezrukova E.V., Kulagina N.V., Reshetova S.A., Shchetnikov A.A., Krainov M.A., Filinov I.A. 2022. Environment of the Oka plateau (East Sayan mountains) in the late glacial and holocene: A case study of a complex record from the lake Khikushka sediments. *Geomorphology*, 53(3): 61–73. DOI: 10.31857/S043542812203004X

Bezrukova E.V., Vershinin K.E., Letunova P.P., Orlova L.A., Krapivina S.M., Chepinoga V.V., Verkhovina A.V., Dudareva N.V., Abzaeva A.A. 2004. Vegetation of the highlands of the Eastern Sayan in the Late Holocene according to the study of peat deposits. *Botanical Journal*, 89(2): 221–232 (in Russian). [Безрукова Е.В., Вершинин К.Е., Летунова П.П., Орлова Л.А., Крапивина С.М., Чепинога В.В., Верхозина А.В., Дударева Н.В., Абзаева А.А. 2004. Растительность высокогорий

- Восточного Саяна в позднем голоцене по данным изучения торфяных отложений // Ботанический журнал. Т. 89. № 2. С. 221–232]
- Blaauw M. 2010. Methods and code for “classical” age-modelling of radiocarbon sequences. *Quaternary Geochronology*, 5(5): 512–518. DOI: 10.1016/j.quageo.2010.01.002
- Blyakharchuk T.A. 2011. Changes in vegetation and climate of the Western Sayan and their relationship with the development of archaeological cultures of the region in the second half of the Holocene according to the spore-pollen analysis of marsh sediments. *Bulletin of Tomsk State University*, 351: 145–151 (in Russian). [Бляхарчук Т.А. 2011. Изменение растительности и климата Западного Саяна и их взаимосвязь с развитием археологических культур региона во второй половине голоцена по данным спорово-пыльцевого анализа болотных отложений. Вестник Томского государственного университета. № 351. С. 145–151.]
- Blyakharchuk T.A., Kurina I.V. 2021. Late Holocene environmental and climatic changes in the Western Sayan Mountains based on high-resolution multiproxy data. *Boreas*, 50: 919–934. DOI: 10.1111/bor.12493
- Borisova O.K., Panin A.V. 2019. Multicentennial climatic changes in the Tere-Khol basin, Southern Siberia, during the late Holocene. *Geography environment sustainability*, July 2019 DOI: 10.24057/2071-9388-2018-64
- Bylinsky E.N. 1996. *Glacio-isostatic influence on the Earth's relief development in the pleistocene*. Publishing House of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 210 pp. (in Russian). [Былинский Е.Н. 1996. Влияние гляциоизостазии на развитие рельефа Земли в плейстоцене. Москва: Издательство РАН, 210 с.]
- Chang M. 2003. *Forest hydrology: an introduction to water and forests*. CRC Press, Boca Raton, 373 pp. DOI: 10.1201/b13614
- Chernova N.A. 2005. On the formation of the marshes of the Ergaki ridge. *Trudy zapovednika «Tigirekskiy»*, 1, 159–161 (in Russian) DOI: 10.53005/20767390_2005_1_159 [Чернова Н.А. 2005. О формировании болот хребта Ергаки // Труды заповедника «Тигирекский». № 1. С. 159–161. DOI: 10.53005/20767390_2005_1_159]
- Clark J.S. 1988. Particle Motion and the Theory of Charcoal Analysis: Source Area, Transport, Deposition, and Sampling. *Quaternary Research*, 30(01): 67–80. DOI: 10.1016/0033-5894(88)90088-9
- Clark J.S., Lynch J.A., Stocks B.J., Goldammer J.G. 1998. Relationships between charcoal particles in air and sediments in west-central Siberia. *The Holocene*, 8(1): 19–29. <https://doi.org/10.1191/095968398672501165>
- Decree of the President of the Russian Federation No. 529 dated June 18, 2024 "On approval of priority areas of scientific and technological development and the list of the most important high-tech technologies"*. 2024. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1306389112> (Last accessed: 22.11.2024) (in Russian). [Указ Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 года № 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий». 2024. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1306389112> (дата обращения: 22.11.2024)]
- Dombrovskaya A.V., Koreneva M.M., Turemnov S.N. 1959. *Atlas of plant residues found in peat*. Gosjenergoizdat, Moscow, Leningrad, 137 pp. [Домбровская А.В., Коренева М.М., Тюремнов С.Н. 1959. Атлас растительных остатков, встречаемых в торфе. Москва, Ленинград: Госэнергоиздат, 137 с.]
- Draft forest plan of the Krasnoyarsk Territory 2019-2028*. 2018. Ministry of Natural Resources and Forestry of the Krasnoyarsk Territory, Krasnoyarsk. URL: http://mlx.krskstate.ru/dat/File/57/proekt_les_plan/Lesnoy%20plan%2026.11.2018.zip (Last accessed: 22.11.2024) (in Russian). [Проект лесного плана Красноярского края 2019-2028 гг. 2018. Красноярск: Министерство природных ресурсов и лесного комплекса Красноярского края. URL: http://mlx.krskstate.ru/dat/File/57/proekt_les_plan/Lesnoy%20plan%2026.11.2018.zip (дата обращения: 22.11.2024)]
- Gabbasova I.M., Garipov T.T., Suleimanov R.R., Komissarov M.A., Khabirov I.K., Sidorova L.V., Nazyrova F.I., Prostyakova Z.G., Kotlugalyamova E.Yu. 2019. The influence of ground fires on the properties and erosion of forest soils in the southern urals (Bashkir state nature reserve). *Eurasian Soil Science*, 52(4): 370–379.
- Galakhov V.P., Chernykh D.V., Zolotov D.V., Orlova L.A. 2012. Location and time of moraine forming of Fernau and Historic stages in the basin of Khaidun River, Altai. *Proceedings of the Russian Geographical Society*, 144(6): 15–21.
- Goldammer J.G., Stocks B.J., Sukhinin A.I., Ponomarev E.I. 2013. Current Fire Regimes, Impacts and the 226 Likely Changes – II: Forest Fires in Russia – Past and Current Trends. In: *Vegetation Fires and Global Change: 227 Challenges for Concerted International Action. A White Paper Directed to the United Nations and International 228 Organizations* (Goldammer J.G., Ed.), pp. 51–79, Global Fire Monitoring Center (GFMC)/Kessel Publishing House, Eifelweg, Germany.
- GOST 11306-2013. 2019. *Peat and products of its processing*. Methods for determination of ash content. Standartinform, Moscow, 6 pp. (in Russian). [ГОСТ 11306-2013. 2019. Торф и продукты его переработки. Методы определения зольности. Стандартинформ, Москва, 6 с.]
- Grenaderova A.V., Mikhailova A.B., Kuryina I.V., Podobueva O.V. 2024a. The vegetation cover response in the Eastern Sayan foothills to Holocene climate extremes (according to paleoecological researches of Bolshoye peat bog). *Geomorphology and paleogeography*, 55(4): 163–183. (in Russian). [Гренадерова А.В., Михайлова А.Б., Курьина И.В., Подобуева О.В. 2024а Отклик растительного покрова в предгорье Восточного Саяна на голоценовые экстремумы климата (по данным изучения болота Большое). *Геоморфология и палеогеография*. Т. 55. № 4. С. 163–183. DOI: 10.31857/S2949178924040107
- Grenaderova A.V., Mikhailova A.B., Sharafutdinov R.A., Stoyko T.G. 2024b. Holocene environmental conditions in the Eastern Sayan foothills according to a comprehensive paleoecological study of the Sosnovka mire. *Limnology and Fresh water Biology*, 4: 394–396. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-394
- Grichuk V.P., Zaklinskaya E.D. 1948. Analysis of fossil pollen and spores and its application to paleogeography. *Geografiz*, Moscow, 224 pp. (in Russian). [Гричук В.П., Заклинская Е.Д. 1948. Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. Географиз, Москва. 224 с.]
- Helama S., Jones P.D., Briffa K.R. (2017) Dark Ages Cold Period: A literature review and directions for future research. *The Holocene*, 27(10): 1600–1606. DOI: 10.1177/0959683617693898
- Higuera P.E. 2009. *CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis*, USA: Montana State University, MT, Bozeman, 27 pp.

- Ivanova N.A., Golubtsova O.S. 2014. *Environmental factors and functional processes in herbaceous plants during pyrogenic forest succession*. Publishing House of Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, 152 pp. (in Russian) [Иванова Н.А., Голубцова О.С. 2014. Факторы среды и функциональные процессы у травянистых растений при пирогенной сукцессии леса. Издательство Нижневартковского государственного университета, Нижневартовск, 152 с.]
- Juggins S. C. 2003. *User guide Software for ecological and palaeoecological data analysis and visualization*. University of Newcastle, Newcastle upon Tyne, 69 pp.
- Кас N.Я., Кас S.V., Скобеева E.I. 1977. *Atlas of plant residues in peats*. Nedra, Moscow, 371 pp. (in Russian). [Кас Н.Я., Кас С.В., Скобеева Е.И. 1977. Атлас растительных остатков в торфах. Недра, Москва, 371 с.]
- Kartashev I. P. 1972. *Basic patterns of geological activity of rivers in mountainous countries*. Nauka, Moscow, 212 pp. (in Russian). [Карташев И. П. 1972. Основные закономерности геологической деятельности рек горных стран. Наука, Москва, 212 с.]
- Khotinsky N.A. 1977. *Holocene of Northern Eurasia: Experience of transcontinental correlation of stages of development of vegetation and climate*. Nauka, Moscow, 197 pp. (in Russian). [Хотинский Н.А. 1977. Голоцен Северной Евразии: Опыт трансконтинентальной корреляции этапов развития растительности и климата. Наука, Москва, 197 с.]
- Khotinsky N.A. 1982. Holocene chronosections: controversial problems of Holocene Paleogeography. In: *Razvitie prirody territorii SSSR v pozdnem pleistocene i golocene*, pp. 142–147, Nauka, Moscow (in Russian). [Хотинский Н.А. 1982. Голоценовые хроносрезы: дискуссионные проблемы палеогеографии голоцена // Развитие природы территории СССР в позднем плейстоцене и голоцене. Москва: Наука. С. 142–147.]
- Koltsova V.G. The history of the forest vegetation of the Stolby Nature Reserve in the Holocene. Abstract dis. cand. biol. sciences. Krasnoyarsk: V.N. Sukachev Institute of Forest and Timber, 150 pp. (in Russian) [Кольцова В.Г. 1980. История лесной растительности заповедника "Столбы" в голоцене. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Красноярск: Институт леса и древесины им. В.Н. Сукачева, 150 с.]
- Korotkov I.A. 1994. Forest-growing zoning of Russia and the republics of the former USSR. In: *Carbon in ecosystems of forests and swamps of Russia* (V.A. Alekseev, R.A. Berdsi eds.), pp. 29–47, VC SB RAS, Krasnoyarsk (in Russian). [Коротков И.А. 1994. Лесорастительное районирование России и республик бывшего СССР // Углерод в экосистемах лесов и болот России / Под ред. В. А. Алексеева и Р. А. Бердси. Красноярск: ВЦ СО РАН. С. 29–47.]
- Krasnoborov I.M. 1963. Flora and vegetation of the Kuturchinsky belogorie (Eastern Sayan). Abstract dis. cand. biol. sciences. Moscow, 21 pp. (in Russian) [Красноборов И.М. 1963. Флора и растительность Кутурчинского белогорья (Восточный Саян). Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Москва, 21 с.]
- Kulikova G.G. 1974. *A short guide to botanical analysis of peat*. MSU, Moscow. 94 pp. (in Russian). [Куликова Г.Г. 1974. Краткое пособие к ботаническому анализу торфа. Изд-во Московского университета, Москва, 94 с.]
- Kurpjanova L.A., Aleshina L.A. 1972. *Pollen and spores of plants of the flora of the USSR*. Nauka, Leningrad, 1: 171 pp. (in Russian). [Курпянова Л.А., Алешина Л.А. (1972). Пыльца и споры растений флоры СССР. Л.: Наука. Т. 1. 171 с.]
- Lamakin V.V. 1948. Dynamic phases of river valleys and alluvial deposits. *Zemlevedenie*, 2 (42): 154–187. (in Russian). [Ламакин В.В. 1948. Динамические фазы речных долин и аллювиальных отложений // Землеведение. Т. 2 (42). С. 154–187.]
- Largin I.F. (ed.) 1977. *Peat deposits and their exploration (guidelines for laboratory and practical exercises)*. Nedra, Moscow, 264 pp. (in Russian). [Ларгин И.Ф. (ред.). 1977. Торфяные месторождения и их разведка (руководства по лабораторно-практическим занятиям). Недра, Москва, 264 с.]
- MacArthur R.H. 1957. On the relative abundance of bird species. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 43(3): 293–295. DOI: 10.1073/pnas.43.3.293
- Mayewski P.A., Rohling E.E., Stager J.C., Karlen W., Maasch K.A., Meeker L.D., Meyerson E.A., Gasse F., van Kreveld Sh., Holmgren K., Lee-Thorp J., Rosqvist G., Rack F., Staubwasser M., Schneider R.R., Steig E.J. 2004. Holocene climate variability. *Quaternary Research*, 62: 243–255. DOI: 10.1016/j.yqres.2004.07.001
- Mey J., Scherler D., Wickert A.D., Egholm D.L., Tesauro M., Schildgen T.F., Strecker M.F. 2016. Glacial isostatic uplift of the European Alps. *Nature Communications*, 7: 13382. DOI: 10.1038/ncomms13382
- Mikhailov N.I. 1961. *Mountains of Southern Siberia*. Moscow, 238 pp. (in Russian) [Михайлов Н.И. 1961. Горы Южной Сибири. Москва, 238 с.]
- Mikhailova A.B., Grenaderova A.V., Kurina I.V., Shumilovskikh L.S., Stojko T.G. 2021. Holocene vegetation and hydroclimate changes in the Kansk forest steppe, Yenisei River Basin, East Siberia. *Boreas*, 50: 948–966. DOI: 10.1111/bor.12542
- Moberg A., Sonechkin D.M., Holmgren K., Datsenko N.M., Karlen W. 2005. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*, 433: 613–617. DOI: 10.1038/nature03265
- Moore P.D., Webb J.A., Collinson M.E. 1991. *Pollen analysis*. Blackwell scientific publications, Oxford, 216 p.
- Nikolaev V.A., Chernov A.F. 1988. *Relief of the Altai-Sayan mountain region*. Nauka, Novosibirsk, 204 p. (in Russian). [Николаев В.А., Чернов А.Ф. 1988. Рельеф Алтае-Саянской горной области. Наука, Новосибирск, 204 с.]
- PAGES 2k Consortium. 2013. Continental-scale temperature variability during the past two millennia. *Nature Geoscience*, 6: 339–346. DOI: 10.1038/ngeo1797
- Pakharkova N., Borisova I., Sharafutdinov R., Gavrikov V. 2020. Photosynthetic Pigments in Siberian Pine and Fir under Climate Warming and Shift of the Timberline. *Forests*, 11(1), 63. DOI: 10.3390/f11010063
- Parmuzin Y.P. 1964. Middle Siberia. Mysl', Moscow, 308 p. [Пармузин Ю.П. 1964. Средняя Сибирь. Мысль, Москва, 308 с.]
- Peltier W.R. 2004. Global glacial isostasy and the surface of the ice-age earth: the ICE-5G (VM2) model and GRACE. *Repository Geology Science*, 32: 111–149. DOI: 10.1146/annurev.earth.32.082503.144359
- Pomeroy J. W., Gray D. M., Shook K. R., Toth J. B., Essery R. L. H., Pietroniro A., Hedstrom N. 1998. An evaluation of snow accumulation and ablation processes for land surfacemodeling. *Hydrological Processes*, 12: 2339–2367.
- Ponomarev E.I., Haruk V.I. 2016. Wildfire Occurrence in Forests of the Altai-Sayan Region under Current Climate Changes. *Siberian Ecological Journal*, 1: 38–46.

- R Core Team. 2013. *R: A language and environment for statistical computing*. Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rodionova A.B., Grenaderova A.V. 2016. Peat soils of the Kansk forest-steppe (genesis and classification). *Vestnik KrasGAU*, 4: 65–72. (in Russian) [Родионова А.Б., Гренадерова А.В. 2016. Торфяные почвы Канской лесостепи (генезис и классификация) // Вестник КрасГАУ. № 4. С. 65–72.]
- Rodionova A.B., Grenaderova A.V. 2018. Peatland development and paleoclimate records from the Holocene peat archive in the foothills of the Eastern Sayan Mountains. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 138. DOI: 10.1088/1755-1315/138/1/012014
- Shantzer E.V. (ed.) 1982. *Stratigraphy of the USSR. Quaternary system*. Nedra, Moscow, 443 pp. (in Russian). [Шанцер Е. В. (ред.). 1982. Стратиграфия СССР. Четвертичная система. Полугом 1. Недра, Москва, 443 с.]
- Shnitnikov A.V. 1957. *Variability of the total moisture content of the continents of the Northern Hemisphere*. Zapiski Geograficheskogo obshhestva SSSR. Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR, Vol. 16. Moscow, Leningrad, 337 pp. (in Russian) [Шнитников А.В. 1957. Изменчивость общей увлажненности материков Северного полушария. Записки Географического общества СССР. Т. 16. Москва, Ленинград: Издательство Академии наук СССР. 337 с.]
- Filipchuk A., Malysheva N., Zolina T., Yugov A. 2020. The Boreal Forest of Russia: Opportunities for the Effects of Climate Change Mitigation. *Forestry information*, 1: 92–113 (in Russian). [Филипчук А.Н., Малышева Н.В., Золина Т.А., Югов А.Н. 2020. Бореальные леса России: возможности для смягчения изменения климата // Лесохоз. информ. № 1. С. 92–113. URL: <http://lhi.vniilm.ru/>]. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2020.1.10.
- Valendik E.N., Ivanova G.A. 1989. Extreme fire-hazardous seasons in the forests of Siberia. *Lesnoe hozyajstvo*, 5: 57–59 (in Russian). [Валендик Э.Н., Иванова Г.А. 1989. Экстремальные пожароопасные сезоны в лесах Сибири // Лесное хозяйство. № 5. С. 57–59.]
- Valendik E.N., Verkhovets S.V., Ponomarev E.I., Ryzhkova V.A., Kisilyakhov Y.K. 2014. Large Wildfires in Taiga Subzones of Central Siberia. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 7(1): 43–56. DOI: 10.17516/1997-1389-0092
- Volkova I.I. 2005. On the problem of studying swamps in the Altai Mountains. *Trudy zapovednika «Tigirekский»*, 1, 67–70 (in Russian). [Волкова И.И. 2005. К проблеме изучения болот в горах Алтая // Труды заповедника «Тигирекский». Вып. 1. С. 67–70.]
- Vorobyeva G.A. 2010. *Soil as a chronicle of natural events in the Baikal region: problems of evolution and classification of soils*. Irkutsk State University Publishing House, Irkutsk. 205 pp. (in Russian). [Воробьева Г.А. 2010. Почва как летопись природных событий Прибайкалья: проблемы эволюции и классификации почв. Иркутск: Издательство Иркутского государственного университета. 205 с.]
- Wang Y., Liu X., Herzschuh U. 2010. Asynchronous evolution of the Indian and East Asian summer monsoon indicated by Holocene moisture patterns in monsoonal central Asia. *Earth-Science Reviews*, 103: 135–153. DOI: 10.1016/j.earscirev.2010.09.004

Поступила в редакцию: 17.10.2024
 Переработанный вариант: 25.11.2025
 Принято в печать: 15.03.2025