

THE IMPACT OF WILDFIRES ON THE DYNAMICS OF VEGETATION COVER IN THE MIDDLE TAIGA SUBZONE OF WESTERN SIBERIA DURING THE HOLOCENE

Pupysheva M.A.^{1}, Blyakharchuk T.A.^{1,2}*

1) *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск*

2) *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск*

*455207@mail.ru

Citation: Pupysheva M.A., Blyakharchuk T.A. 2024. The impact of wildfires on the dynamics of vegetation cover in the middle taiga subzone of Western Siberia during the Holocene. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 15(3): 200–210.

DOI: 10.18822/edgcc634013

В работе представлены новые результаты изучения влияния палеопожаров на динамику растительного покрова в средней тайге Западной Сибири (Ханты-Мансийский автономный округ), полученные при исследовании донных отложений озера «S14». На смену растительного покрова оказывает воздействие не только климат, но и пожарная активность, являющаяся определенным триггером эволюции растительного покрова ландшафтов. Об этом свидетельствуют полученные палеоэкологические данные, основанные на анализе выявленных частиц угольков и пыльцы в озерных отложениях. Согласно радиоуглеродному датированию, осадконакопление в озере «S14» началось 11920 кал. л. н. (календарных лет назад). На основе проведенного макроуголькового анализа и статистической обработки полученных данных в программе CharAnalysis в R реконструирована голоценовая история пожаров в исследуемом районе. Выявлено 16 локальных пожарных эпизодов, их время, периодичность и интенсивность. Полученная реконструкция истории пожаров сопоставлена с динамикой растительного покрова в районе озера «S14» (на основе данных пыльцевого анализа из отложений этого озера) и с климатическими периодами голоцена. Это позволило выделить три периода с максимальной пирогенной активностью – 11500-10400, 7500-6800 и 400-250 кал. л. н., а также рассмотреть условия, способствующие интенсификации пожаров голоцена. Для определения степени воздействия пожаров на смену растительного покрова и связей между ними проведен корреляционный анализ методом Пирсона в программе PAST. Анализ осуществлен на основе сравнения микро- и макрочастиц угля с содержанием пыльцы преобладающих растительных таксонов в донных отложениях озера «S14». Согласно результатам корреляционного анализа, пожары оказывали воздействие на динамику растительности в течение всего голоцена. Выявлена положительная корреляция частиц микро- и макроугольков друг с другом, что подтверждает наличие пожаров на локальном и региональном уровнях и их взаимосвязь. Определено, что микро- и макроугольки синхронно имеют отрицательную корреляционную связь с березой, кедром, сосной обыкновенной и пихтой сибирской и положительную – со злаками и елью сибирской. Положительная корреляция со злаками и отрицательная с древесной пылью отражает влияние пожаров на растительный покров, а именно на угнетение древесных видов и разрастание трав (злаков) в первые этапы постпирогенных сукцессий. Положительная корреляция с елью, скорее всего, связана с большей горимостью ландшафтов в начале голоцена, когда в ландшафте доминировали лиственнично-еловые леса, а климат был сухим. Это подтверждает прямое влияние пожаров на формирование растительных ландшафтов в исследуемом регионе.

Ключевые слова: динамика пожаров, угольковый анализ, корреляционный анализ, озерные отложения, Западная Сибирь, голоцен.

In the article we present new results on the influence of paleo-fires on the dynamics of vegetation cover and the connections between them using the example of bottom sediments of Lake “S14” in the middle taiga subzone of Western Siberia (Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug). The change in vegetation cover is influenced by both climate and fire activity, which acted as a trigger for the evolution of vegetation cover. This is evidenced by the obtained paleoecological data based on the analysis of identified particles of charcoal and pollen in lake sediments. According to the radiocarbon dating, sedimentation of lake "S14" began at 11920 cal. yr. BP. Based on the macro-charcoal analysis and statistical processing of the obtained data in the CharAnalysis program in R, the Holocene history of paleo-fires in the study area was reconstructed. 16 local fire episodes, their time, frequency and intensity were identified (11400, 11100, 10700, 10400, 9800, 9400, 7400, 6100, 5150, 4500, 3800, 2800, 1400, 1100, 400, 250 cal. yr BP).

Using spore-pollen analysis, the dominant landscapes were reconstructed for the entire period of the existence of lake “S14”: 12000-11500 cal. yr BP – larch-spruce forests with an admixture of birch; 11500-9850 cal. yr BP – larch-spruce-birch forests; 9850-4700 cal. yr BP – spruce-pine-birch forests; 4700-3500 cal. yr BP – birch-pine forests; 3500-2250 cal. yr BP – birch-cedar-pine forests; 2250-1000 cal. yr BP – cedar-pine forests with an admixture of birch; 1000 cal. yr BP to present – cedar-birch-pine forests. The resulting reconstruction of the dynamics of vegetation cover is

compared with the history of paleo-fires of the study lake and with the climatic periods of the Holocene. This made it possible to identify three periods with maximum pyrogenic activity (11500-10400, 7500-6800 and 400-250 cal. yr BP), as well as to consider the conditions contributing to the intensification of Holocene wildfires. To determine the degree of impact of fires on the change in vegetation cover and the connections between them, a correlation analysis was carried out using the Pearson method in the PAST program. The analysis was made based on a comparison of micro- and macro-particles of charcoals with the pollen content of the predominant plant taxa for lake "S14".

The most powerful paleo-fires were noted at the end of the Preboreal – beginning of the Boreal periods of the Holocene (11500-10400 cal. yr BP) with 4 local fire episodes and a high rate of accumulation of charcoal particles (1.1 per cm²/year). At the same time, larch-spruce forests with an admixture of birch grew near the lake area. The next maximum of pyrogenic activity was recorded in the mid-Atlantic period of the Holocene (7500-6800 cal. yr BP) with one local fire. The rate of charcoal accumulation decreased slightly compared to the previous period – 0.9 particles per cm²/year. At this time, the territory of the middle taiga subzone was covered with spruce-pine-birch forests. The third peak of local fires occurred at the end of the Subatlantic Holocene period (400-250 cal. yr BP) with a macro-charcoal accumulation rate of 0.6 particles per cm²/year. The vegetation cover included Siberian cedar, birch and pine forests at this time. It was found that the most intense fires occurred during dry climatic periods. The longest fire-free periods (9400-7400, 2800-1400 cal. yr BP) were observed precisely during the period of increasing precipitation.

According to the results of correlation analysis, wildfires had an impact on vegetation dynamics throughout the Holocene. A positive correlation of micro- and macro-charcoal particles with each other was revealed, which confirms the presence of fires at the local and regional levels and connection of local fires with regional fire situation. It has been determined that micro- and macro-charcoals simultaneously have a negative correlation with birch (*Betula pendula*), Siberian cedar (*Pinus sibirica*), Scot's pine (*Pinus sylvestris*) and fir (*Abies sibirica*), and a positive correlation with grasses (*Poaceae*) and spruce (*Picea obovata*). A positive correlation with grasses and a negative correlation with tree pollen reflects the effect of fires on vegetation cover, probably, the suppression of tree species and the growth of grasses in the first stages of post-pyrogenic succession. The positive correlation with spruce is most likely due to the greater burning of landscapes at the beginning of the Holocene, when larch-spruce forests dominated the landscape and the climate was drier. This confirms the direct influence of fires on the formation of vegetation landscapes in the study region.

Key words: dynamics of wildfires, charcoal analysis, correlation analysis, lake sediments, Western Siberia, Holocene.

ВВЕДЕНИЕ

С конца XX века и по настоящее время во всем мире наблюдается тенденция к увеличению пожарной активности, включая северные регионы Западной Сибири [Ponomarev et al., 2016]. Несмотря на то, что часть природных пожаров происходит по вине человека, для бореальной зоны Западно-Сибирской равнины климатические изменения и возросшие экстремальные погодные явления – основные причины возникновения лесных пожаров [Kharyutkina et al., 2024]. Продолжающееся изменение климата может спровоцировать новые очаги пожаров и сопутствующую им перестройку природных экосистем. Несмотря на причинённый ущерб от воздействия огня, пожары являются естественным эволюционно-экологическим процессом, необходимым для формирования и развития природных экосистем [Furyaev, 1996]. Чтобы понять закономерности влияния пожаров на лесоболотные комплексы Западной Сибири и составить долгосрочные прогнозы пространственно-временной динамики пожаров, необходимы данные за более длительный период времени, охватывающий весь голоцен. В этом могут помочь озерно-болотные отложения, представляющие собой надёжный «архив» палеоэкологической информации [Marlon, 2020]. Обнаруженные частицы макро- (размером >125 мкр) и микроугольков (размером <125 мкр) в слоях отложений являются прямыми индикаторами пожаров на локальном и региональном уровнях соответственно [Mooney, Tinner, 2011]. С помощью современных средств обработки и анализа полученного уголькового материала [Hammer et al., 2001; Higuera, 2009] восстанавливается периодичность, интенсивность и время возникновения палеопожаров за весь период существования озера или болота.

В ранее опубликованных работах [Blyakharchuk et al., 2021; Pupysheva, Blyakharchuk, 2024] авторами приводились данные по возрасту отложений озера «S14» и динамике пожаров в среднетаёжной подзоне Западной Сибири. В данном исследовании показаны новые результаты реконструкции истории пожаров с помощью программного пакета «CharAnalysis» [Higuera, 2009] в сопоставлении с динамикой растительного покрова, а также рассматривается влияние пожаров на смену растительных ландшафтов и взаимосвязи между ними.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта изучения выбрано болотное озеро «S14» (Рис. 1), расположенное в пределах среднетаежной подзоны Обско-Иртышской провинции Западно-Сибирской равнины [Isachenko, 2014]. Озеро находится в 23 км к юго-западу от г. Ханты-Мансийска (Ханты-Мансийский автономный округ – Югра) [Blyakharchuk et al., 2021; Pupysheva, Blyakharchuk, 2024]. Это внутриболотное озеро обширного верхового болота с сосново-кустарничково-сфагновым растительным покровом, расположенное к югу от научной станции Мухрино. Болото окружают смешанные елово-пихтово-берёзовые и осиновые леса на минеральной почве. Восточнее расположена обширная пойма р. Оби с лугами, старичными озёрами и ивняковыми зарослями.

Для средней тайги Западной Сибири уже проводился ряд исследований по реконструкции палеопожаров на основе озерно-торфяных [Turunen et al., 2001; Pitkänen et al., 2002; Lamentowicz et al., 2015; Amon et al., 2020] и почвенных отложений [Loiko et al., 2022] (Рис. 1). Однако практически во всех опубликованных работах не проводилась реконструкция локальных палеопожаров, а также не рассматривались корреляционные связи между динамикой пожаров и растительным покровом.

Во время экспедиции в марте 2020 г. из озера «S14» был отобран керн донных отложений мощностью 231 см. Из керна было отобрано и подготовлено 113 образцов для проведения макроуголькового анализа. В радиоуглеродной лаборатории г. Познань (Польша) получено 5 радиоуглеродных УМС дат [Blyakharchuk et al., 2021; Pupysheva, Blyakharchuk, 2024]. На основе радиоуглеродных дат, откалиброванных в программе Bacon [Blaauw, Christen, 2011], в R 4.0.4 [R Core Team, 2020] в системе счисления «от настоящего времени» (за нулевую точку отсчета принят 1950 г.) построена глубинно-возрастная модель донных отложений озера «S14» и рассчитан календарный возраст каждого образца [Blyakharchuk et al., 2021; Pupysheva, Blyakharchuk, 2024].

Для реконструкции локальной динамики пожаров использовался метод макроуголькового анализа по стандартной методике подготовки и физико-химической обработке образцов [Mooney, Tinner, 2011]. Макрочастицы угля достаточно крупные и тяжелые (размером >125 мкм) и разносятся на незначительные расстояния от источника возгорания (от нескольких метров до 1-2 км) и обычно осаждаются на поверхность в пределах местного водораздела. Выявленные крупные частицы макроугольков, сохранившиеся в отложениях после пожара, свидетельствуют о локальной пирогенной активности [Mooney, Tinner, 2011].

Статистические данные по абсолютному количеству частиц макроугольков в каждом из слоев отложений обработаны в программе CharAnalysis [Higuera, 2009] в R [R Core Team, 2020]. С помощью программы CharAnalysis рассчитана скорость аккумуляции макрочастиц угля, определены фоновые и пороговые значения для отделения локальных (в радиусе до 1-3 км от очага возгорания) пожаров от региональных (на расстоянии до 20 км) и выявлены конкретные локальные пожарные эпизоды. В качестве хронологической основы использовались данные глубинно-возрастной модели отложений озера «S14». При расчетах фоновых и пороговых значений скоростей аккумуляции макрочастиц угля применялась статистическая функция локально-линейной регрессии (LOWESS) с периодом сглаживания 1500 лет. Временное окно для определения локальных пожарных эпизодов путем выделения значений, превышающих фоновые показатели, составило 11 000 лет. Для статистической достоверности временного окна использован безразмерный индекс отношения сигнала к шуму (SNI) [Kelly et al., 2011]. В данном случае он составил от 2.5 до 4.5, что удовлетворяет статистическим требованиям анализа [Pupysheva, Blyakharchuk, 2024].



Рис. 1. Расположение участков исследования палеопожаров в среднетаежной подзоне Западной Сибири. 1 – озеро S14 [Pupysheva, Blyakharchuk, 2024], 2 – болото Мухрино [Lamentowicz et al., 2015], 3 – озеро Светленькое [Amon et al., 2020], 4 – Салым-Юганское болото [Turunen et al., 2001; Pitkänen et al., 2002], 5 – подзол в бассейне р. Большой Юган [Loiko et al., 2022].

Fig. 1. Location of paleofire study sites in the middle taiga subzone of Western Siberia. 1 – lake “S14” [Pupysheva, Blyakharchuk, 2024], 2 – Mukhrino swamp [Lamentowicz et al., 2015], 3 – Svetlenkoe lake [Amon et al., 2020], 4 – Salym-Yuganskoe swamp [Turunen et al., 2001; Pitkänen et al., 2002], 5 – podzol in the Bolshoy Yugan river basin [Loiko et al., 2022].

Для реконструкции региональной динамики пожаров использовался метод микроуголькового анализа озерных отложений [Mooney, Tinner, 2011]. Микрочастицы угля (размером <125 мкм) достаточно легкие, поэтому они поднимаются и переносятся ветром на значительные расстояния (от 20 до 100 км и более) от очага пожара. Их наличие в исследуемых слоях озерных отложений отражает региональную историю палеопожаров. Вместе с частицами угольков в воздух поднимаются пыльца и споры растений, сопоставимые по размеру и весу с микроскопическими частицами угольков. Микроугольки подчиняются тем же пространственным закономерностям переноса, рассеивания и захоронения, что пыльца и споры. Поэтому микроугольковый и спорово-пыльцевой анализы проводились одновременно по одному и тому же микропрепарату при тех же методах обработки образцов и параметрах оптики.

Для подтверждения связей между пожарной активностью и растительным покровом проведен корреляционный анализ методом Пирсона в программе PAST [Hammer et al., 2001] на основе

сравнения микро- и макрочастиц угля с содержанием пылицы преобладающих растительных таксонов для донных отложений озера «S14».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Реконструкция голоценовой динамики пожаров

Согласно данным радиоуглеродного датирования (Табл. 1, Рис. 2), осадконакопление в озере «S14» началось 11920 кал. л. н. [Pupysheva, Blyakharchuk, 2024]. За это время произошло 16 локальных пожарных эпизодов (Рис. 3), выявленных программой CharAnalysis [Higuera, 2009] в пространстве R [R Core Team, 2020] – 11400, 11100, 10700, 10400, 9800, 9400, 7400, 6100, 5150, 4500, 3800, 2800, 1400, 1100, 400, 250 кал. л. н.).

Таблица 1. Радиоуглеродные даты донных отложений озера «S14» [Pupysheva, Blyakharchuk, 2024].

Table 1. Radiocarbon dates of bottom sediments of lake “S14” [Pupysheva, Blyakharchuk, 2024].

| Лабораторный номер образца | Глубина отбора образца, см | Возраст, ¹⁴ C лет назад |
|----------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| Poz-134628 | 50-51 | 5320±40 |
| Poz-134626 | 100-101 | 8190±50 |
| Poz-135825 | 145-146 | 8910±50 |
| Poz-135824 | 190-191 | 9580±50 |
| Poz-135823 | 222-223 | 9690±50 |

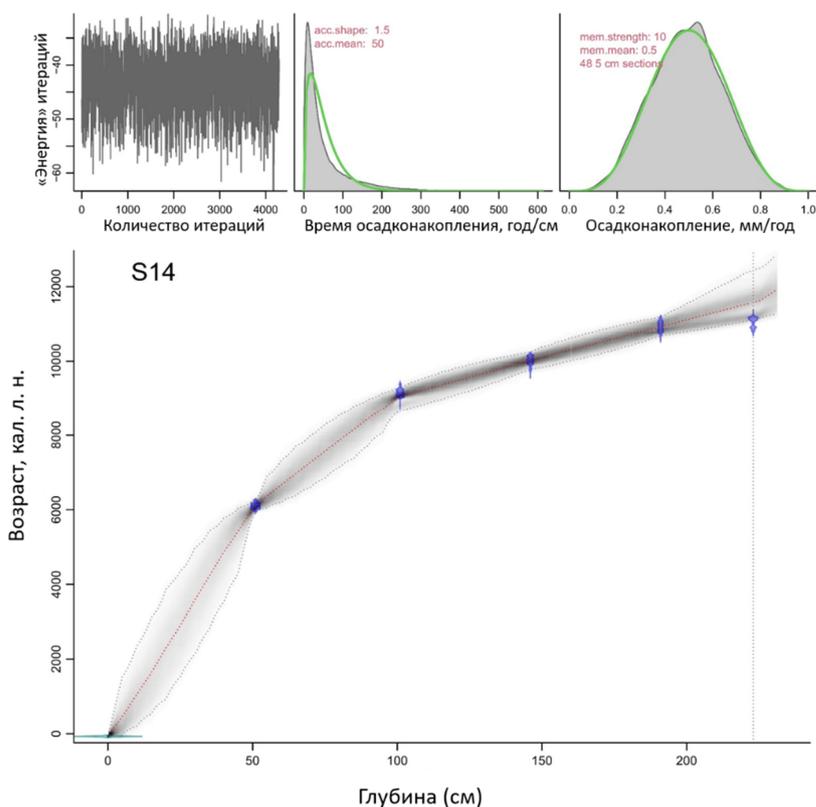


Рис. 2. Глубинно-возрастная модель донных отложений озера «S14» [Pupysheva, Blyakharchuk, 2024].

Fig. 2. Depth-age model of bottom sediments of lake “S14” [Pupysheva, Blyakharchuk, 2024].

Для выявления доминирующих растительных ландшафтов и региональной истории пожаров полученные палеопожарные данные были сопоставлены с результатами спорово-пыльцевого и микроуголькового анализов донных отложений озера «S14». Результаты палеоэкологических реконструкций также сравнивались с климатическими периодами голоцена. В совокупности это позволило выделить 3 периода максимальной пирогенной активности в районе исследуемого озера: 11500-10400, 7500-6800 и 400-250 кал. л. н. (Рис. 3).

Самые интенсивные локальные пожары для данной территории произошли на границе пребореального и бореального периодов голоцена (11500-10400 кал. л. н.): в это время отмечена высокая скорость аккумуляции частиц угольков для данной территории (1.1 частицы на см²/год) (Рис. 3). В течение первого периода максимальной пирогенной активности зафиксировано 4 локальных пожарных эпизода (11400, 11100, 10700, 10400 кал. л. н.). Данный период, вероятно, мог быть связан с общим потеплением климата [Arkhipov, Volkova, 1994], что привело к усилению грозовой активности, способствующей возникновению новых очагов пожаров. В это же время доминирующую роль в растительном покрове занимали разреженные лиственнично-еловые леса с примесью березы, а содержание пыльцы злаков (*Poaceae*) в отложениях достигало максимальных значений. Вероятно, злаковые сообщества являлись первой стадией постпирогенных сукцессий в среднетаежной подзоне. О высокой пирогенной активности исследуемого региона в раннем голоцене также свидетельствуют работа [Turunen et al., 2001] и полученные авторами результаты микроуголькового анализа озера «S14».

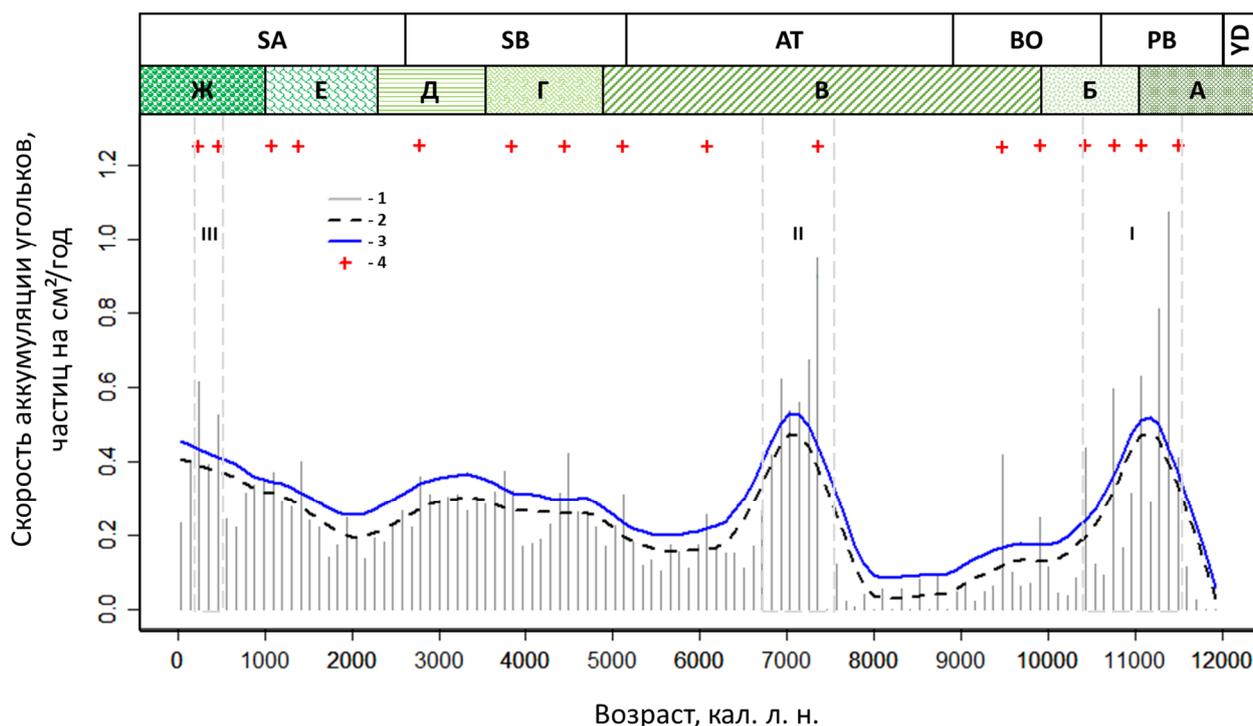


Рис. 3. Сопоставление данных реконструкции долговременной динамики пожаров озера «S14» с динамикой растительного покрова и периодами голоцена.

Примечание: 1 – интерполированные значения; 2 – фоновые значения; 3 – пороговые значения; 4 – локальные пожарные эпизоды. Периоды максимальной пирогенной активности (вертикальные пунктирные линии): I – 11500-10400 кал. л. н., II – 7500-6800 кал. л. н., III – 400-250 кал. л. н. Периоды голоцена: YD – дриас; PB – пребореальный; BO – бореальный; AT – атлантический; SB – суббореальный; SA – субатлантический. Доминирующий тип растительности: А – лиственнично-еловые с примесью березы редколесья; Б – лиственнично-елово-березовые леса; В – елово-сосново-березовые леса; Г – березово-сосновые леса; Д – березово-кедрово-сосновые леса; Е – кедрово-сосновые леса с примесью березы; Ж – кедрово-березово-сосновые леса.

Fig. 3. Comparison of the reconstruction data of the long-term fire dynamics of lake “S14” with the dynamics of the vegetation cover and the periods of the Holocene.

Note: 1 – interpolated values; 2 – background values; 3 – threshold values; 4 – local fire episodes. Periods of maximum pyrogenic activity (vertical dotted lines): I – 11 500-10 400 calendar years ago, II – 7 500-6 800 calendar years ago, III – 400-250 calendar years ago. Holocene periods: YD – Dryas; PB – Preboreal; BO – Boreal; AT – Atlantic; SB – Subboreal; SA – Subatlantic. Dominant vegetation type: A – larch-spruce with an admixture of birch sparse forests; Б – larch-spruce-birch forests; В – spruce-pine-birch forests; Г – birch-pine forests; Д – birch-cedar-pine forests; Е – cedar-pine forests with an admixture of birch; Ж – cedar-birch-pine forests.

Второй период максимальной пирогенной активности произошел в середине атлантического периода голоцена (7500-6800 кал. л. н.) при максимальной скорости аккумуляции угольков – 0.9 частицы на см²/год (Рис. 3). При том, что лишь один пожарный эпизод (7400 кал. л. н.), произошедший в этот период, отмечен программой CharAnalysis [Higuera, 2009] как наиболее достоверный. Остальные пики, вероятно, могли быть следствием как вторичного отложения угольков, так и серией небольших низовых пожаров в районе озера «S14». Возможно, кратковременное иссушение климата в данный период [Arkhipov, Volkova, 1994] повлияло на усиление интенсивности пожаров. В это время территорию среднетаежной подзоны покрывали елово-сосново-березовые леса. О пирогенных событиях в данный период также указывают работы [Pitkanen et al., 2002; Turunen et al., 2001].

Третий период максимальных локальных пожаров пришелся на конец субатлантического периода голоцена (400-250 кал. л. н.). Уменьшилась их интенсивность по сравнению с предыдущими пожарами, о чем свидетельствует скорость аккумуляции угольков (0.6 частицы на см²/год) (Рис. 3). Тем не менее зафиксировано 2 локальных палеопожарных эпизода (400 и 250 кал. л. н.). Серия пожаров произошла во время похолодания и иссушения климата Малого ледникового периода. В растительном покрове лидирующую роль заняла сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*) при значительной доле сибирского кедра (*Pinus sibirica*) и березы (*Betula pendula*).

С конца бореала и до середины атлантического периода голоцена (9400-7400 кал. л. н.) наблюдался самый длительный беспожарный режим (~2000 кал. л.), о чем свидетельствует минимальная скорость аккумуляции частиц макроугольков (до 0.1 частицы на см²/год). Вероятно, данный режим мог быть связан с общим увлажнением и потеплением климата, а также с интенсификацией процесса заболачивания на территории Западно-Сибирской равнины, что, по всей видимости, сдерживало распространение пожаров. При этом часть исследователей обнаружили прослойки углей в отложениях в период 9000-8000 кал. л. н. [Pitkanen et al., 2002; Turunen et al., 2001] и 8110 кал. л. н. [Turunen et al., 2001]. В это время в районе озера «S14» преобладали елово-сосново-березовые леса. С конца суббореального и до середины субатлантического периода голоцена (2800-1400 кал. л. н.) зафиксирован второй по длительности беспожарный период (~1400 кал. л.), о чем свидетельствует низкая скорость аккумуляции угольков (до 0.25 частицы на см²/год). Именно в это время наблюдалось увеличение годового количества осадков [Arkhipov, Volkova, 1994], что, возможно, способствовало снижению пирогенной активности. Данный период совпал с переходом от березово-кедрово-сосновых лесов к кедрово-сосновым лесам с примесью березы. Также в одной из работ по изучению динамики палеопожаров в среднетаежной подзоне Западной Сибири [Loiko et al., 2022] приводились сведения о небольших пожарных эпизодах в данный период времени – 2600-2400, 1500 кал. л. н. Такое расхождение может свидетельствовать о влиянии местных физико-географических и климатических особенностей исследуемых участков, так или иначе способствующих распространению локальных пожаров.

Корреляция пожарной активности с динамикой растительности

Для выявления статистических взаимосвязей между пожарной активностью и составом растительного покрова проведен корреляционный анализ методом Пирсона в программе PAST [Hammer et al., 2001] между количеством микро- и макрочастиц угля и содержанием пыльцы преобладающих растительных таксонов в донных отложениях озера «S14» (Рис. 4, Табл. 2).

Частицы микро- и макроугольков положительно коррелируют друг с другом ($r = 0.73$), а также с елью сибирской (*Picea obovata*) ($r = 0.47$ и 0.27 соответственно) и со злаками (*Poaceae*) ($r = 0.76$ и 0.75 соответственно). При этом синхронная отрицательная корреляция микро- и макроугольков зафиксирована с сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris*) ($r = -0.67$ и -0.54 соответственно), кедром (*Pinus sibirica*) ($r = -0.34$ и -0.21 соответственно), пихтой сибирской (*Abies sibirica*) ($r = -0.43$ и -0.26 соответственно) и березой повислой (*Betula pendula*) ($r = -0.43$ и -0.49 соответственно).

Результаты корреляционного анализа показали, что содержание пыльцы сосны, сибирского кедра, березы и пихты уменьшалось по мере увеличения интенсивности пожаров на региональном и локальном уровнях, поскольку обилие пыльцы этих видов связано значимой отрицательной корреляцией с обилием микро- и макроугольков. Положительная корреляция пиков угольков со злаками (*Poaceae*) в пребореальном периоде голоцена свидетельствует о наличии более сухих условий, способствовавших распространению пожаров, либо является отражением послепожарных сукцессий. Травянистые сообщества на пожарищах развиваются в первые же годы после пожаров, поэтому пыльца злаков коррелирует именно с пожарными событиями. Также частицы микро- и макроугольков достоверно положительно коррелируют с пылью ели сибирской (*Picea obovata*). Эта

связь, скорее всего, обусловлена разреженными (или долинными) еловыми лесами, распространёнными в позднеледниковое время с резко континентальным холодным и сухим климатом. Позднее, в начале атлантического периода голоцена, по мере постепенного потепления климата содержание пыльцы ели в образцах немного увеличилось. Однако серия пожаров в период голоценового оптимума резко снизила участие ели в древесном покрове (содержание пыльцы ели в образцах этого периода резко понижается), в котором доминировать стали сначала берёза, а после 5000 кал. л. н. – сибирский кедр и пирогенно-устойчивая сосна обыкновенная.

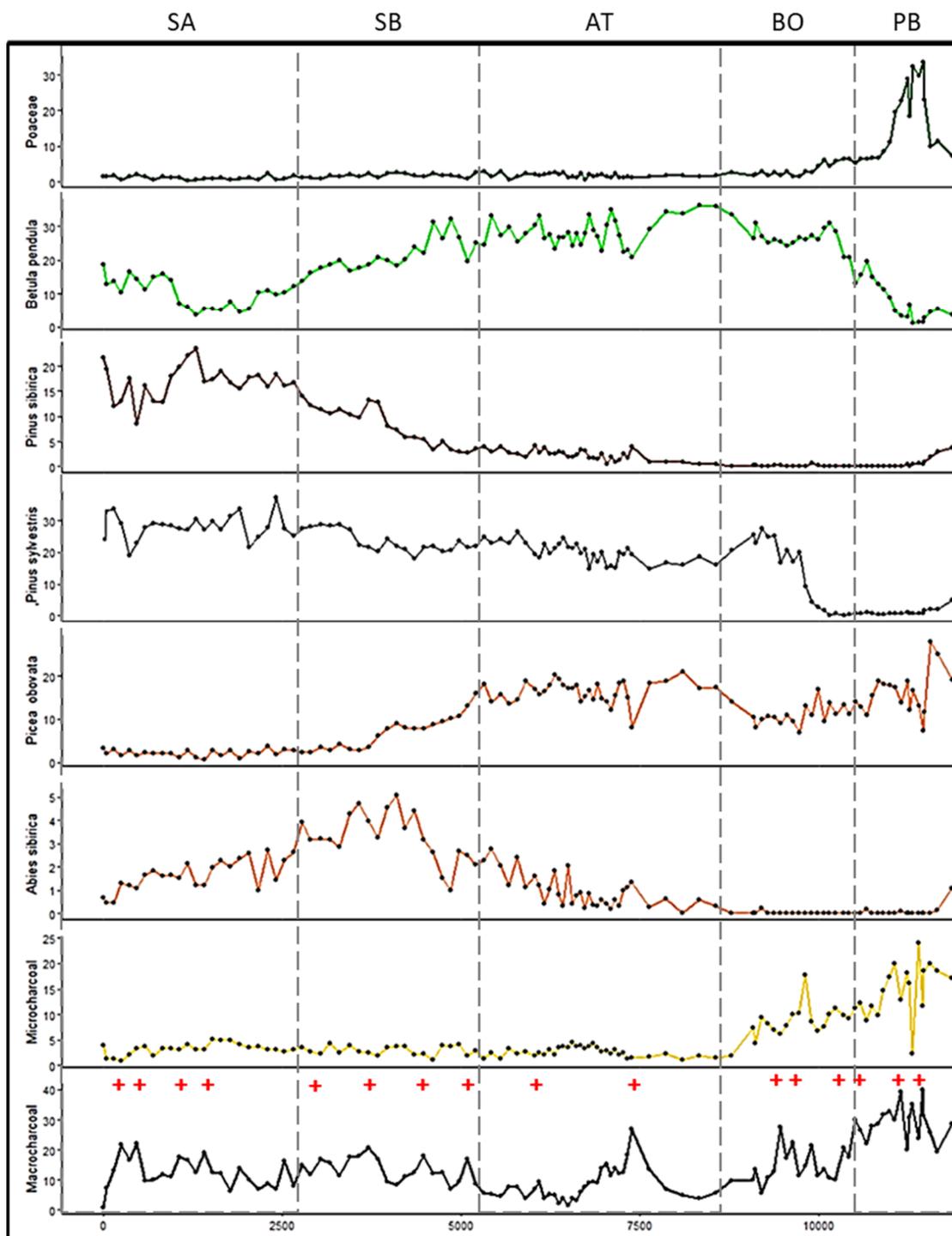


Рис. 4. Концентрация частиц микро- и макроугольков в сравнении с процентным содержанием пыльцы преобладающих таксонов для озера «S14». Красными крестиками отмечены локальные пожары.

Fig. 4. Concentration of micro- and macro-charcoal particles compared to percentage of pollen of dominant taxa for lake “S14”. Red crosses mark local fires.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции микро- и макроугольков с процентным содержанием пыльцы доминирующих видов растительности для озера «S14». Условные обозначения: А – Micro-charcoal (микроугольки); В – Macro-charcoal (макроугольки); С – *Pinus sylvestris*; D – *Pinus sibirica*; E – *Picea obovata*; F – *Abies sibirica*; G – *Betula pendula*; H – *Poaceae*. Красным цветом обозначены значимые отрицательные коэффициенты корреляции, синим цветом – значимые положительные коэффициенты корреляции, черным цветом – незначимые коэффициенты корреляции (при $P < 0.05$ и $n = 114$).

Table 2. Correlation coefficients of micro- and macrocharcoal with the percentage of pollen of dominant vegetation species for lake “S14”. Legend: A – Micro-charcoal (микроугольки); B – Macro-charcoal (макроугольки); C – *Pinus sylvestris*; D – *Pinus sibirica*; E – *Picea obovata*; F – *Abies sibirica*; G – *Betula pendula*; H – *Poaceae*. Significant negative correlation coefficients are shown in red, significant positive correlation coefficients are shown in blue, and insignificant correlation coefficients are shown in black (at $P < 0.05$ and $n = 114$).

| | A | B | C | D | E | F | G | H |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A | 1 | 0.73 | -0.67 | -0.34 | 0.47 | -0.43 | -0.43 | 0.76 |
| B | 0.73 | 1 | -0.54 | -0.21 | 0.27 | -0.26 | -0.49 | 0.75 |
| C | -0.67 | -0.54 | 1 | 0.69 | -0.57 | 0.55 | 0.15 | -0.59 |
| D | -0.34 | -0.21 | 0.69 | 1 | -0.73 | 0.52 | -0.41 | -0.30 |
| E | 0.47 | 0.27 | -0.57 | -0.73 | 1 | -0.48 | 0.28 | 0.38 |
| F | -0.43 | -0.26 | 0.55 | 0.52 | -0.48 | 1 | -0.05 | -0.33 |
| G | -0.43 | -0.49 | 0.15 | -0.41 | 0.28 | -0.05 | 1 | -0.48 |
| H | 0.76 | 0.75 | -0.59 | -0.30 | 0.38 | -0.33 | -0.48 | 1 |

Удаленность от основных объектов инфраструктуры и природно-климатические особенности расположения озера «S14» делают его уникальным объектом для изучения естественной эволюции природных экосистем в средней тайге Западной Сибири. Можно предположить, что практически при полном отсутствии антропогенного воздействия на динамику пожаров решающее воздействие оказывал климат и изменение его метеорологических показателей. Пожары, в свою очередь, являлись возможным триггером перестройки растительных ландшафтов в течение всего голоцена. На это указывают проведенный корреляционный анализ и полученные реконструкции по динамике пожаров и растительного покрова.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований реконструирована история динамики палеопожаров в среднетаежной подзоне Западной Сибири за 11 920 кал. л. С помощью программного пакета CharAnalysis определено, что за всю историю развития озера «S14» произошло 16 локальных пожарных эпизодов с разной периодичностью и интенсивностью.

Выявлено, что самые интенсивные пожары произошли в раннем голоцене при переходе от лиственнично-еловых редколесий (или долинных лесов) к лиственнично-елово-березовым лесам. Теплые климатические условия и наличие открытых злаковых формаций в начале голоцена, вероятно, способствовали интенсификации пожаров. В середине среднего голоцена при значительном участии березовых лесов в составе растительного покрова также наблюдались сильные пожары. По мере увеличения доли наиболее пирогенно-устойчивой древесной породы – сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) в лесах средней тайги в целом снизилась пирогенная активность. С начала позднего голоцена началось постепенное увеличение интенсивности пожаров, достигнув максимальных значений в Малый ледниковый период. Серия пожаров в середине субатлантического

периода голоцена, вероятно, привела к смене кедрово-сосновых лесов с примесью березы к кедрово-березово-сосновым лесам. Данные пожары произошли в период Средневековой климатической аномалии. Современный рост интенсивности пожаров, вероятно, связан с потеплением климата и увеличением количества экстремальных погодных явлений на севере Западной Сибири. Также установлено, что самые длительные беспожарные периоды (9400-7400, 2800-1400 кал. л. н.) связаны с увеличением количества осадков в данное время.

Проведенный корреляционный анализ частиц микро- и макроугольков с пылью преобладающих таксонов показал связь между интенсивностью пожаров и их влиянием на сукцессионные процессы в растительном покрове. Следует заметить, что частицы микро- и макроугольков положительно коррелируют друг с другом, подтверждая голоценовую реконструкцию истории пожаров в районе озера. Кроме того, микро- и макроугольки синхронно коррелируют с одними и теми же таксонами: отрицательно с березой, кедром, сосной обыкновенной и пихтой сибирской и положительно со злаками и елью сибирской. Отмечено, что с началом распространения сомкнутых лесов в раннем голоцене на исследуемой территории минимальные значения содержания пыльцы древесных видов в отложениях соответствовали максимальным пикам пожаров, увеличиваясь по мере постпирогенного восстановления растительного покрова. Это подтверждает прямое влияние пожаров на формирование лесных ландшафтов в исследуемом регионе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-27-00217. Авторы благодарны Маартену ван Харденбуку, Павлу Анатольевичу Бляхарчуку и Елене Дмитриевне Лапшиной за помощь в организации и выполнении экспедиционных работ по отбору донных отложений озера S14.

ЛИТЕРАТУРА

- Amon L., Blaus A., Alliksaar T., Heinsalu A., Lapshina E., Liiv M., Reitalu T., Vassiljev J., Veski S. 2020. Postglacial flooding and vegetation history on the Ob river terrace, central Western Siberia based on the paleoecological record from lake Svetlenkoye. *The Holocene*, 30(5): 618-631.
- Arkhipov S.A., Volkova V.S. 1994. *Geological history, landscapes and climates of Pleistocene Western Siberia*. Novosibirsk: NRC OIGGM SB RAS, 105 pp. (in Russian). [Архипов С.А., Волкова В.С. 1994. Геологическая история, ландшафты и климаты плейстоцена Западной Сибири. Новосибирск: НИЦ ОИГТМ СО РАН, 105 с.].
- Blaauw M., Christen J.A. 2011. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*, 6: 457-474.
- Blyakharchuk T.A., Degtyareva M.A., Maarten V.H. 2021. Holocene dynamics of local fires according to macrocharcoal analysis of bottom sediments of a swamp lake in the vicinity of the scientific station Mukhrino, Khanty-Mansiysk district. In: *West Siberian peatlands and the carbon cycle: past and present: Proceedings of the Sixth International Field Symposium*. Tomsk. Publisher: Tomsk University Publishing House: 161-163. (in Russian). [Бляхарчук Т.А., Дегтярева М.А., Маартен В.Х. 2021. Голоценовая динамика лесных пожаров по данным макроуголькового анализа донных отложений болотного озера в окрестностях научной станции «Мухрино», Ханты-Мансийский автономный округ. Западносибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее: Материалы Шестого Международного полевого симпозиума. Томск: Издательство Томского университета: С. 161-163].
- Furyaev V.V. 1996. *The role of fires in the process of forest formation*. Novosibirsk: Science. Siberian Publishing Company RAS, 253 pp. (in Russian). [Фуряев В.В. Роль пожаров в процессе лесообразования. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 253 с.].
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D. 2001. Past - palaeontological statistics. URL: <http://www.uv.es/~pardomv/pe/2001> (Last accessed 03.04.2024).
- Higuera P. 2009. *CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis*. Bozeman: MT, Montana State University, 27 pp.
- Isachenko A.G. 2014. Western Siberia as an object of historical-geographical study and description. Article II. *Proceedings of the Russian Geographical Society*, 146(3): 1-29. (in Russian). [Исаченко А.Г. 2014. Западная Сибирь как объект историко-географического изучения и описания. Статья II // Известия Русского географического общества, 146(3): 1-29].
- Kelly R.F., Higuera P.E., Barrett C.M., Sheng F.A. 2011. Signal-to-noise index to quantify the potential for peak detection in sediment - charcoal records. *Quaternary Research*, 75(1): 11-17.
- Kharyutkina E., Moraru E., Pustovalov K., Loginov S. 2024. Lightning-Ignited Wildfires and Associated Meteorological Conditions in Western Siberia for 2016-2021. *Atmosphere*, 15(1): 106.
- Loiko V.S., Kuzmina D.M., Dudko A.A., Konstantinov A.O., Vasilyeva Yu. A., Kurasova A.O., Lim A.G., Kulizhsky S.P. 2022. Charcoals of albic podzols of the middle taiga of Western Siberia as indicator of ecosystem history. *Eurasian Soil Science*, 2: 176-192. (in Russian). [Лойко В.С., Кузьмина Д.М., Дудко А.А., Константинов А.О., Васильева Ю.А., Курасова А.О., Лим

- А.Г., Кулижский С.П. 2022. Древесные угли в подзолах средней тайги Западной Сибири как индикатор истории геосистем. Почвоведение. № 2. С. 176-192].
- Marlon J.R. 2020. What the past can say about the present and future of fire. *Quaternary Research*, (96): 66-87.
- Mooney S.D., Tinner W. 2011. The analysis of charcoal in peat and organic sediments. *Mires and Peat*, 7(9): 1-18.
- Pitkänen A., Turunen J., Tahvanainen T., Tolonen K. 2002. Holocene vegetation history from the Salym-Yugan mire area, West Siberia. *The Holocene*, 12(3): 353-362.
- Lamentowicz M., Slowiński M., Marcisz K., Zielińska M., Kaliszczan K., Lapshina E., Gilbert D., Buttler A., Fiałkiewicz-Koział B., Jassey V.E.J. 2015. Hydrological dynamics and fire history of the last 1300 years in western Siberia reconstructed from a high-resolution, ombrotrophic peat archive. *Quaternary Research*, 84(3): 312-325.
- Ponomarev E.I., Kharuk V.I., Ranson K.J. 2016. Wildfires dynamics in Siberian larch forests. *Forests*, 7(6): 125.
- Pupysheva M.A., Blyakharchuk T.A. 2024. Reconstruction of the holocene paleo-fire history in the Middle Taiga subzone of Western Siberia according to the macro-charcoal analysis of lake sediments. *Geosfernyye issledovaniya*, 1: 135-151 (in Russian). [Пупышева М.А., Бляхарчук Т.А. 2024. Реконструкция голоценовой истории палеопожаров в среднетаежной подзоне Западной Сибири по данным макроуголькового анализа озерных отложений. Геосферные исследования. № 1. С. 135-151].
- R Core Team R: a language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing. 2020. Vienna. URL: www.r-project.org/index.html (Last accessed: 20.03.2024).
- Turunen J., Tahvanainen T., Tolonen K., Pitkänen A. 2001. Carbon accumulation in West Siberian mires, Russia Sphagnum peatland distribution in North America and Eurasia during the past 21,000 years. *Global biogeochemical cycles*, 15(2): 285-296.

Поступила в редакцию: 03.07.2024
Переработанный вариант: 25.10.2024