

EDN: VHDLJR

УДК 504.455:551.3.051:630\*43–022.58–(571.513)

## **Macrocharcoal in Upper Sediments of the Lakes of North-Minusinsk Valley (Southern Siberia) as a Proxy of Fires on the Surrounding Territory**

**Denis Yu. Rogozin<sup>\*a, b</sup>,  
Leonid A. Burdin<sup>a, b</sup> and Galina N. Bolobanshchikova<sup>b</sup>**

*<sup>a</sup>Institute of Biophysics SB RAS  
Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center SB RAS”*

*Krasnoyarsk, Russian Federation*

*<sup>b</sup>Siberian Federal University*

*Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 22.11.2022, received in revised form 28.04.2023, accepted 12.05.2023

---

**Abstract.** Samples of the upper part of bottom sediments collected from saline lakes Shira and Uchum, which are located in the steppe region of southern Siberia (Khakasia and Krasnoyarsk Krai), were analyzed to investigate the distribution of charcoal particles >100 μm. The sediments of ages up to 400 years BP were sampled by a freeze-corer in order to avoid mixing of the uppermost semi-liquid layers. Charcoal particles were divided into three classes according to their morphology. The first-class particles had an elongated shape, and they were interpreted as the remains of herbaceous plants. The second-class particles looked like thin flat plates, and they were interpreted as the remains of leaves. The third group consisted of solid particles of irregular shapes, which presumably were remains of burnt wood and coal. In the last century, the sedimentary flux of third-class particles has increased significantly, which most likely reflects an increase in the amount of solid fuel (wood and coal) burned by people in settlements around the lakes. The contents of the first- and second-class particles, which were presumably traces of wildfires, were not lower in the past than in the recent time. Thus, the intensity of wildfires in the study region does not tend to increase in the modern period. The data obtained will be useful for the reconstruction of fire regimes from longer cores, covering a period of a few millennia.

**Keywords:** wildfires, charcoal particles, lake sediments.

**Acknowledgments.** The study was supported by Russian Science Foundation, grant No. 22–27–00398, <https://rscf.ru/project/22–27–00398>.

Citation: Rogozin D. Yu., Burdin L. A., Bolobanshchikova G. N. Macrocharcoal in upper sediments of the lakes of North-Minusinsk Valley (southern Siberia) as a proxy of fires on the surrounding territory. J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2023, 16(2), 252–266. EDN: VHDLJR



## **Угольные макрочастицы в верхних слоях донных отложений озёр Северо-Минусинской котловины (юг Сибири) как индикатор динамики пожаров на окружающей территории**

**Д. Ю. Рогозин<sup>а, б</sup>, Л. А. Бурдин<sup>а, б</sup>, Г. Н. Болобанщикова<sup>б</sup>**  
*<sup>а</sup>ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН»  
обособленное подразделение Институт биофизики СО РАН  
Российская Федерация, Красноярск  
<sup>б</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** В верхней части донных отложений озер Шира и Учум, расположенных в степной зоне юга Сибири (Республика Хакасия и Красноярский край) проанализированы распределения макрочастиц древесных углей размером более 100 мкм. Пробы донных отложений были отобраны методом замораживания *in situ* с помощью пробоотборника – намораживателя (freeze-core) с целью сохранения ненарушенной последовательности верхних полужидких слоев. Возраст исследуемых отложений составил до 400 лет назад. В отложениях обоих озер обнаружены частицы, по форме классифицированные на три класса. Первый класс частиц имеет вытянутую форму, которая интерпретируется как остатки травянистых растений. Второй класс имеет вид тонких плоских пластинок и интерпретируется как остатки листьев. Третий класс составляют объемные частицы различной неправильной формы, предположительно являющиеся остатками от горения древесины и угля. Показано, что в слоях, соответствующих последнему столетию, значительно возрастает содержание частиц третьего класса, что вероятнее всего отражает увеличение количества сжигаемого людьми твердого топлива (древесины и угля) для обогрева жилищ и другой хозяйственной деятельности в окрестностях озер. Содержание частиц первого и второго классов, предположительно являющихся следами природных пожаров, в прошлом не было меньше, чем в настоящее время. Следовательно, интенсивность природных пожаров в исследуемом регионе не демонстрирует тенденции к увеличению в современный период. Полученные сведения будут полезны при реконструкциях пожарных режимов по более длинным кернам, охватывающим период в несколько тысячелетий.

**Ключевые слова:** степные пожары, угольные частицы, донные отложения.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда, грант № 22–27–00398, <https://rscf.ru/project/22–27–00398>.

Цитирование: Рогозин, Д. Ю. Угольные макрочастицы в верхних слоях донных отложений озёр Северо-Минусинской котловины (юг Сибири) как индикатор динамики пожаров на окружающей территории / Д. Ю. Рогозин, Л. А. Бурдин, Г. Н. Болобанщикова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2023. 16(2). С. 252–266. EDN: VHDLJR

## Введение

Природные пожары несут угрозу лесным и степным экосистемам, нарушая растительный и почвенный покров, а также могут существенно ухудшать качество жизни людей, живущих на прилегающих территориях. Вместе с тем показано, что пожары, вызванные естественными причинами (например, возгорания от молний), в ряде случаев являются необходимым условием функционирования экосистем, ускоряя круговорот углерода в биосфере (Leys et al., 2018). В настоящее время во всем мире наблюдается увеличение количества природных пожаров, что обусловлено как естественными причинами (изменение климата), так и причинами антропогенного характера (Feurdean et al., 2020; Marlon, 2020). Поскольку частота и интенсивность пожаров зависят от климатических факторов (температуры, влажности, количества молний) прогноз пожарных режимов при различных климатических сценариях является чрезвычайно актуальной задачей в условиях быстро меняющегося климата. Очевидно, что для прогнозирования пожарных обстановок весьма полезна информация о динамике пожаров в прошлом. Сравнение современных пожарных обстановок с таковыми в доиндустриальный период позволяет оценить вклад антропогенного фактора в этот процесс.

Степные и луговые экосистемы (grasslands) составляют около трети растительного покрова Земли, но именно в них происходит около 80 % пожаров (Mouillot, Field, 2005). Однако палеореконструкции пожарных режимов на степных территориях

немногочисленны по сравнению с лесными, а поскольку границы биомов со временем меняются, то трудно даже определить, где и когда степные участки были в прошлом, что затрудняет их анализ (Leys et al., 2018). В Евразии распределение палеореконструкций степных пожаров сильно неравномерно: большинство из них расположены в Западной Европе и Монголии (Leys et al., 2018). В обзорах по палеопожарам (Marlon, 2020; Lays et al., 2018) упоминания о Сибири вообще отсутствуют. Для территории Сибири на сегодняшний день имеется ряд работ по реконструкции палеопожаров, сделанных по древесным кольцам (Knorre et al., 2019; Kirilyanov et al., 2020; Wang et al., 2021), а также по торфяным колонкам (Feurdean et al., 2020; Grenaderova et al., 2021) и озерным отложениям (Novenko et al., 2022; Glückler et al., 2021), однако эти исследования проведены для лесных экосистем, тогда как по степным регионам юга Сибири на сегодняшний день нам известны лишь две работы по степному Алтаю (Rudaya et al., 2020; Жилич, Рудая, 2021).

На степных территориях южной Сибири пожары являются характерным явлением, причем часто они вызваны умышленными или случайными поджогами сухой прошлогодней травы весной (конец апреля – начало мая) и осенью (октябрь). Территория Минусинской котловины (Красноярский край и Республика Хакасия) в значительной степени страдает от таких пожаров. По данным обсерватории NASA (NASA Observatory), активность пожаров здесь варьирует в диапазоне 1–10 пожаров/ 1000 км<sup>2</sup>·день

(данные за 2015 г) (Leys et al., 2018). Иногда пожары здесь наносят ущерб жилым и хозяйственным постройкам, как, например, 12 апреля 2012 г., когда сильнейший пожар уничтожил десятки жилых домов в нескольких поселках Ширинского района Республики Хакасия, были и человеческие жертвы.

Донные отложения озер являются одними из лучших архивов для реконструкций пожарных обстановок прошлого. Частицы древесных углей (charcoal particles), являющиеся продуктом горения растительности, попадая в атмосферу, сохраняются в озерных отложениях и являются количественным индикатором интенсивности пожаров (Marlon, 2020). Показано, что микрочастицы угля (менее 100–125 мкм) характеризуют региональный фон пожаров на обширной территории, тогда как макрочастицы (более 100 мкм) отражают скорее локальную пожарную обстановку в окрестности данного озера (Anderson, Wahl, 2016).

Однако при отборе кернов с помощью гравитационных пробоотборников верхние молодые слои донных отложений, имеющие, как правило, полужидкую консистенцию, часто бывают разрушены и перемешаны либо в процессе отбора, либо при последующей разделке на отдельные образцы, что снижает разрешающую способность реконструкции для современного периода. Для высокоточного неразрушающего отбора верхней части донных отложений наилучшим образом подходит метод замораживания *in situ*, с помощью пробоотборника-намораживателя (freeze-corer) (Renberg, Hansson, 1993).

Цель настоящей работы – анализ количества и состава макрочастиц древесных углей в верхней части донных отложений озер Шири и Учум, расположенных в степной зоне Северо-Минусинской котловины (юг Сибири), и оценка динамики пожаров на окружающей территории за соответствующий период.

## Материалы и методы

### Объекты исследования

Озеро Шири (54°30' СШ, 90°11' ВД) находится в Ширинском районе Республики Хакасия, в 15 км от районного центра п. Шири (рис. 1). Озеро овальной формы, размерами 5,3×9,3 км, площадью 35,9 км<sup>2</sup> (Rogozin et al., 2017), максимальная глубина 24,5 м (2021 г.). Озеро Шири обладает бальнеологическими свойствами, на его берегу круглогодично функционирует известный курорт «Озеро Шири», который является основным градообразующим предприятием для поселка Жемчужный, расположенного на юго-западном берегу озера. К поселку примыкают дачные массивы и базы отдыха.

Озеро Учум (55°05' СШ, 89°43' ВД) расположено в 70 км к северо-западу от озера Шири, на территории Ужурского района Красноярского края, в 30 км к югу от г. Ужур (рис. 1). Озеро имеет форму неправильного овала размером 1,5×4 км, площадь поверхности около 4 км<sup>2</sup>, максимальная глубина 9,2 м (2022 г.). Грязь и вода озера обладают бальнеологическими свойствами, на юго-западном берегу озера функционирует курорт «Озеро Учум» и расположен поселок с одноименным названием.

Оба озера расположены на территории Северо-Минусинской котловины. Климат данной местности резко-континентальный: средняя температура июля около +18 °С, января – около – 19 °С. Потенциальное испарение на данной территории (600 мм год<sup>-1</sup>) превышает среднегодовое количество осадков (300 мм год<sup>-1</sup>) (Parnachev, Degermendzhy, 2002). Полуаридный климат способствует формированию степного ландшафта и многочисленных бессточных озер. Оба озера бессточные, их питание осуществляется за счет притока поверхностных и подземных вод. Зимой на озерах формируется ледовый покров толщиной около одного метра. В летнее время озера



Рис. 1. Географическое положение озер Ширы и Учум

Fig. 1. Geographical location of Lakes Shira and Uchum

являются популярным местом отдыха, здесь функционируют кемпинги, а также располагается большое количество неорганизованных палаточных стоянок отдыхающих.

В настоящее время деревья (в основном береза и лиственница) растут в небольшом количестве на южном и западном берегах озера Ширы. В основном же вдоль береговой линии вокруг озера преобладает степной ландшафт (Игай, Седельников, 2011). На расстоянии 10 км от озера лесные массивы отсутствуют, однако крупные лесные массивы Батенёвского кряжа расположены примерно в 20 км к югу и юго-западу от озера. По рассказам местных жителей, собранным И. Т. Савенковым в 1890 г, в середине 19 века вся юго-западная, южная и частично

юго-восточная часть береговой линии были покрыты березняком, однако уже в 1890 г. этого не наблюдалось (Савенков, 1891). В пылевых спектрах донных отложений оз. Ширы в последние около 100 лет наблюдается увеличение пыльцы березы и снижение пыльцы сосны, тогда как в более древних слоях до 400 лет назад количество пыльцы березы и сосны было примерно постоянным (Hildebrandt et al., 2015). На южном берегу озера Учум также произрастает сосна и береза и есть небольшой массив лиственницы. С запада небольшие лесные массивы подходят довольно близко к озеру, на расстояние порядка одного километра, однако они расположены за окружающими озеро холмами (картографические данные Google,

2023). В основном вокруг озера преобладает степной ландшафт. Данные реконструкций растительного покрова для окрестностей озера Учум в литературе отсутствуют.

#### *Отбор проб*

Отбор донных отложений проводили на озере Шира в марте 2021 года в точке с координатами (54°30.025' СШ, 090°12.122' ВД), на озере Учум в марте 2022 года в точке с координатами (55°05.670' СШ, 089°43.406' ВД). Точки отбора располагались в центральных глубоководных частях обоих озер. Глубина отобранных отложений в озере Шира составила 39 см, в озере Учум – 34 см. Пробы донных отложений отбирали через отверстие во льду с помощью пробоотборника-намораживателя, изготовленного в Институте биофизики СО РАН по образцу, опубликованному в работе Renberg, Hansson (1993). Данное устройство позволяет замораживать донные отложения прямо на дне водоема с помощью хладагента (смесь этанола и твердой углекислоты (сухого льда), –80 °С), циркулирующего внутри погружаемого в осадок металлического клина (Renberg, Hansson, 1993). После извлечения замороженные образцы донных отложений транспортировали при отрицательной температуре в лабораторию в ящиках с сухим льдом и хранили до анализа при –20 °С. Замороженные образцы распиливали пилой на продольные бруски сечением 20×20 мм и фотографировали с закрепленной миллиметровой линейкой. Затем полученные бруски разрезали поперек на отдельные образцы с шагом 1 см с помощью раскаленной нихромовой проволоки толщиной 0,4 мм, подключенной к источнику постоянного тока. Все операции осуществляли при отрицательной температуре. Образцы помещали в полиэтиленовые пакеты с выдавленным воздухом и хранили в темноте при –20 °С до обработки.

#### *Датировка донных отложений*

Оценка возраста и скорости накопления донных отложений оз. Шира была проведена ранее по другим кернам, отобранным в этой же точке, на основе измерений активности изотопов  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  в сочетании с подсчетом годичных слоев (варв), и опубликована в работе (Kalugin et al., 2013). В качестве репера для стыковки разных кернов использовали визуально хорошо различимый светлый слой, расположенный на глубине около 15 см. Данный слой сформирован выпадением в осадок карбонатных минералов в период минимального уровня озера, который наблюдался в период 1926–1930 гг. (Kalugin et al., 2013). В предположении, что выпадение осадка прекратилось с началом подъема озера, верхняя граница данного слоя соответствует интервалу между 1930 и 1936 гг. и условно принята нами за 1933 г.

Оценка возраста отложений озера Учум была сделана ранее для керна 2015 г. на основе распределений  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  (Rogozin et al., 2020). В настоящей работе мы уточнили эту датировку с помощью визуального подсчета годичных слоев. Поскольку годичные слои (варвы) в кернах исследуемых озер проявляются только в результате окисления после выдержки на открытом воздухе, в замороженном керне 2022 г. годичные слои были плохо различимы. Поэтому подсчет слоев проводили по фотографии керна, который был отобран гравитационным пробоотборником UWITEC в 2015 г. (Rogozin et al., 2020), тогда же разрезан вдоль и сфотографирован с миллиметровой линейкой. Каждый видимый слой принимался за один год. Подсчет осуществлялся двумя людьми независимо, при этом выбор интервалов тоже был произвольным для каждого из считающих. За глубину отложений в каждой точке принимали середину интервала, на котором велся подсчет слоев. Корреляцию кернов проводили по визуально различимым в обоих кернах светлым слоям (см. Результаты).

*Анализ угольных частиц*

Анализ угольных частиц в донных отложениях проводили с шагом 1 см по глубине на основе методик, описанных в работах (Unkelbach et al., 2018; Anderson, Wahl, 2016). Для озера Шира было проанализировано 38 образцов, для озера Учум – 33 образца. Влажные донные отложения примерным объемом 2–3 см<sup>3</sup> помещали в центрифужную пробирку с 6 мл дефлокулирующего раствора (6 % гексаметафосфат натрия), тщательно размешивали, после чего определяли точный объем анализируемого образца по делениям на пробирке, как разность между конечным объемом и известным объемом дефлокулирующего раствора (в нашем случае это 6 мл). По прошествии не менее трех часов содержимое пробирки просеивали мокрым способом через ткань с размером ячеек 100 мкм (мельничный газ). Полученный остаток выдерживали в 6 % гипохлорите натрия для отбеливания и снова просеивали через ту же ткань. Экспериментальным путем было выявлено, что выдержки в течение 1 часа достаточно для обесцвечивания всех подверженных этому процессу частиц, тогда как частицы углей оставались черными. После более долгой выдержки внешний вид частиц не менялся, поэтому мы выбрали время выдержки в гипохлорите натрия 1 час.

Остаток помещали в камеру Богорова и угольки подсчитывали под стереомикроскопом в отраженном свете при 25-кратном увеличении. Таким образом подсчитывались все встретившиеся угольные частицы в образце фиксированного объема. В качестве объектов для сравнения использовали измельченный древесный и активированный уголь. Угольки распознавались по наличию металлического блеска, острых граней и хрупкости.

Количественный анализ проводили в программе CharAnalysis (<http://CharAnalysis.googlepages.com>, Higuera et al., 2009). В данной

программе количество подсчитанных угольных частиц в образце нормируется на объем влажного образца, после чего скорость поступления угольков в донные отложения (CHAR, частиц см<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup>) рассчитывается умножением концентрации угольков в образце (частиц см<sup>-3</sup>) на скорость осадконакопления (см год<sup>-1</sup>). Полученный ряд данных (CHAR) интерполируется через равные промежутки времени, затем выделяется фоновый уровень («Фон» на рис. 5, 6), который отражает усредненную интенсивность горения в регионе, так как основным источником поступления частиц угля в водоём является выпадение частиц из атмосферы в результате конвективных процессов, возникающих в ходе пожара (Conedera et al., 2009). Кроме того, процессы переотложения и привноса материала смывом с территории водосбора также вносят вклад в фоновый уровень угольных частиц в донных отложениях (Higuera et al., 2009).

**Результаты***Датировка донных отложений оз. Учум*

Данные подсчета годичных слоев были объединены и на их основе была получена зависимость скорости седиментации (лет мм<sup>-1</sup>) от глубины крена (рис. 2). На участках керна, где слои были неразличимы, подсчет не производили, а при разработке возрастной модели скорость осадконакопления на этих участках считали равной таковой для соседних участков.

Возраст отложений рассчитывали по формуле:

$$T(z) = T_0 - \int_0^z f(z) dz, \quad (1)$$

где  $z$  – глубина отложений (мм),  $f(z)$  – зависимость скорости седиментации от глубины отложений (лет/мм),  $T_0$  – начальная точка отсчета времени (лет). Данные подсчета аппроксимировали линейной функцией вида (рис. 2):

$$f(z) = az + b,$$

на основе чего уравнение (1) было преобразовано в расчетную формулу:

$$T(z) = T_0 - \frac{a}{2}z^2 - bz, \quad (2)$$

где  $T_0 = 2022$  (год отбора керна),  $a = 0,0006$ ,  $b = 0,55$  – коэффициенты линейного уравнения для керна 2015 (рис. 2). Данная модель хорошо соответствует оценке возраста отложений озера Учум, сделанной ранее для этого же керна 2015 г. на основе распределений  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  (Rogozin et al., 2020).

Датировку замороженного керна, исследуемого в настоящей работе, проводили из следующих соображений. В верхних слоях замороженного керна годовые варвы были визуально различимы до 18 мм, их насчитали 6. Таким образом, глубина 18 мм принималась за  $2022 - 6 = 2016$  г., а скорость на этом интервале составила  $3 \text{ мм год}^{-1}$ . Из этих соображений датировали верхние два сантиметра образца. Глубже варвы были визуально неразличимы, однако и в замороженном керне 2022, и в кер-

не 2015 были видны два четко различимых белых прослоя. Их положение в керне 2022 незначительно отличалось по глубине от керна 2015. Эти слои были датированы в керне 2015 по формуле (2), и эти даты приняты для керна 2022. Поэтому глубже 18 мм скорость оценивалась на основании даты первого белого слоя (63 мм, 2000 год), полученной по подсчету варв в керне 2015 г. (см. выше):  $(63 - 18) / (2016 - 2000) = 2,8 \text{ мм год}^{-1}$ . Глубже первого белого слоя (63 мм) возрастная модель принималась аналогичной керну 2015. В результате была получена возрастная модель для замороженного керна 2022 г. (рис. 3).

#### Угольные частицы в донных отложениях

В донных отложениях озер Шира и Учум были обнаружены частицы древесных углей различной формы (рис. 4), которые, согласно литературным данным, могут быть интерпретированы как остатки сгоревших растений в непосредственной близости от озер, на окружающей территории в радиусе менее 10 км (Anderson, Wahl, 2016; Unkelbach et al., 2018). При подсчете все угольные частицы

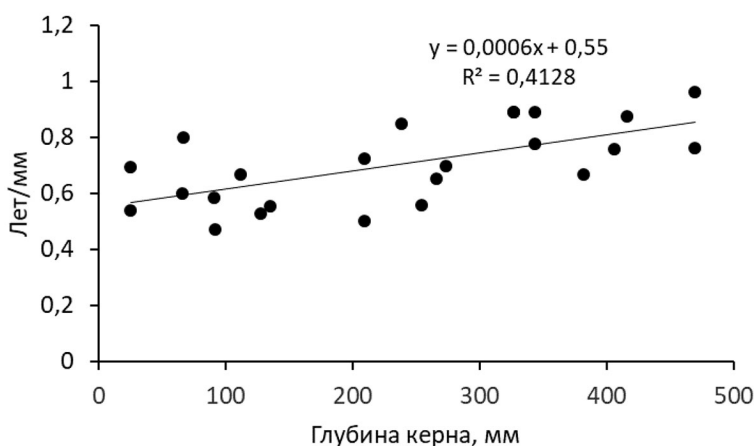


Рис. 2. Скорость седиментации, оцененная визуальным подсчетом числа годовых слоев на отдельных интервалах керна Учум-2015 двумя людьми (точки) и ее линейная регрессия (линия)

Fig. 2. Sedimentation rate estimated by visual calculation of annual layers in certain parts of the Uchum-2015 core by two people (points) and its linear regression (line)



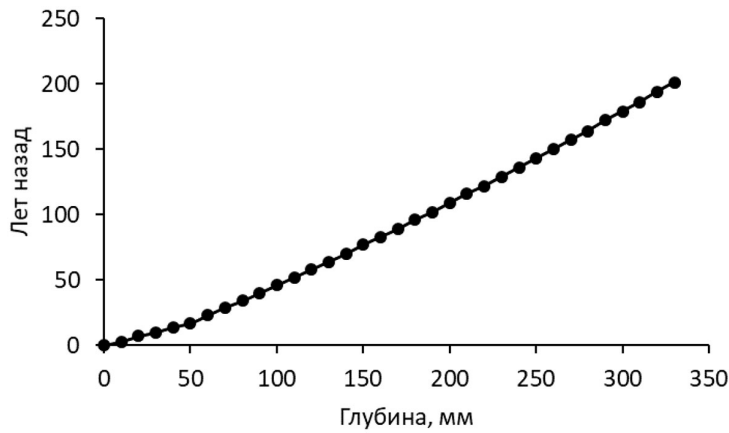


Рис. 3. Возрастная модель замороженного ядра донных отложений озера Учум, отобранного в 2022 году  
 Fig. 3. Age-depth model of a frozen core of Lake Uchum taken in 2022



Рис. 4. Типичные формы угольных частиц, обнаруженные в донных отложениях озер Ширы и Учум (пояснения в тексте)

Fig. 4. Macrocharcoal types from sediment cores of Lakes Uchum and Shira (explanations in the text)

были разделены на три типичных класса: А, В и С, различающиеся по форме (рис. 4). Класс А имеет вытянутую форму и интерпретируется как остатки травянистых растений, тонких корней (Unkelbach et al., 2018), а также может быть остатками хвои и жилок листьев (Mustaphi, Pisaric, 2014) (рис. 4А). Класс В имеет вид тонких плоских «чешуек», иногда с отверстиями (рис. 4В) и интерпретируется в литературе как остатки листьев (Unkelbach et al., 2018), а также как остатки листьев злаков (Mustaphi, Pisaric, 2014) и в некоторых случаях как остатки древесины лиственных (Heidgen et al., 2022). Третий и самый многочислен-

ный класс С составляют объемные частицы различной неправильной формы (рис. 4С), предположительно являющиеся остатками от горения древесины, угля и прочих горючих твердых материалов.

В обоих озерах наблюдается увеличение скорости аккумуляции угольных частиц класса С примерно с начала 20 века и до настоящего времени. В более ранние периоды фоновый уровень этих частиц на порядок ниже, чем в настоящее время, и остается достаточно равномерным (рис. 5, 6). В озере Учум присутствует также локальный минимум частиц класса С в районе 1970-х гг. Скорость аккумуля-

муляции угольков класса А демонстрировала иную динамику: их фонный уровень в обоих озерах в прошлом был в целом не ниже, а иногда выше, чем в современный период. В озере Шира максимум скорости аккумуляции частиц класса А наблюдался в конце 17 века, затем эта

величина снижалась и оставалась на низком уровне вплоть до 1980–1990-х гг., после чего вновь возрастала до максимального уровня. Кроме того, наблюдался локальный максимум в середине 19 века (рис. 5). В этот же период наблюдался и максимум скорости аккумуля-

## Озеро Шира

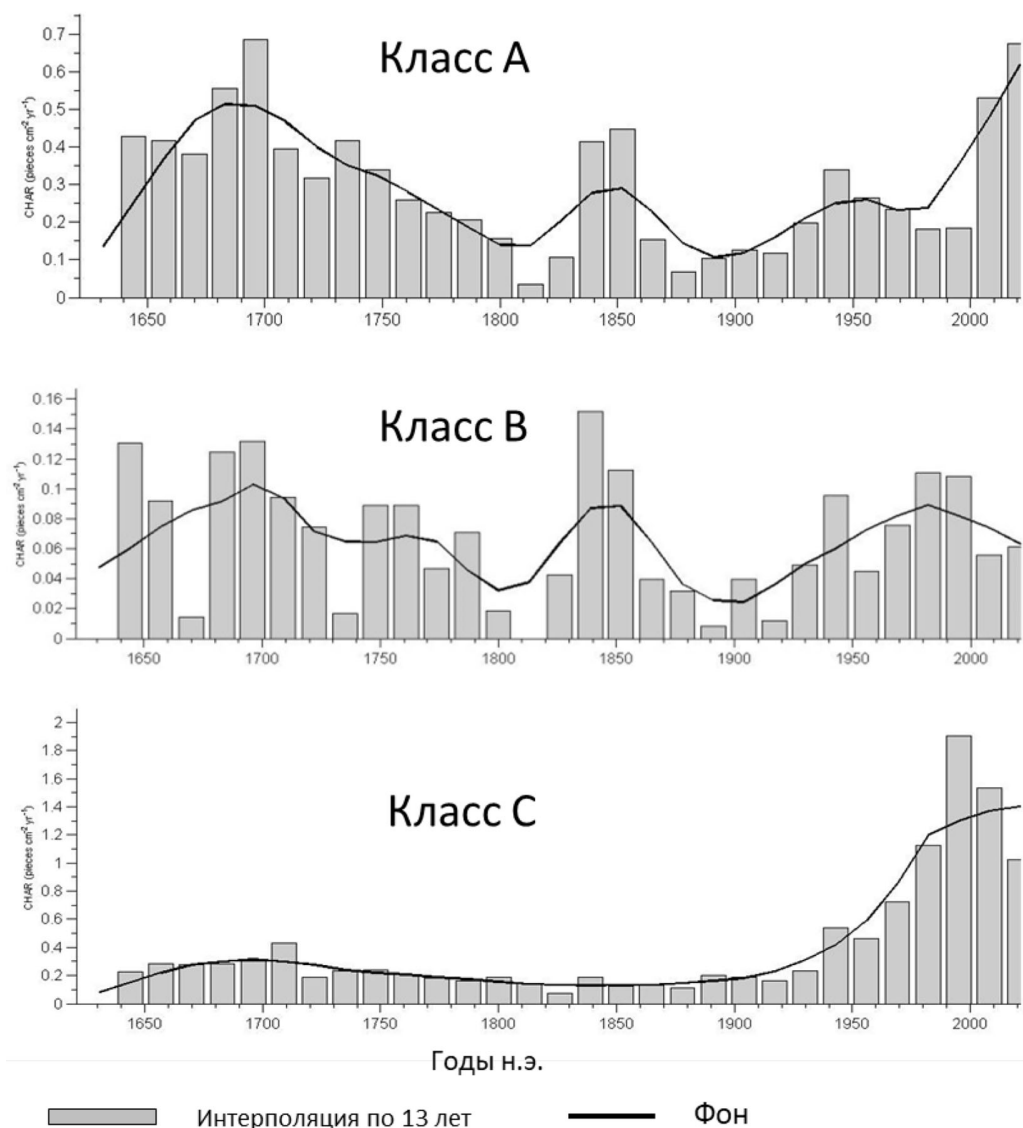


Рис. 5. Седиментационный поток угольных макрочастиц в донные отложения озера Шира. Классы частиц как на рис. 4

Fig. 5. Sedimentary flux of macrocharcoal in Lake Shira sediments. Particle types as in Fig. 4

ции частиц класса А в оз. Учум, тогда как в более молодых слоях 20–21 веков эта величина заметно снижалась и оставалась на низком уровне в современный период (рис. 6). Для частиц класса В также не отмечено значительного увеличения потока в современный период

в обоих озерах. Фоновый уровень потока этих частиц в обоих озерах колебался на протяжении всего периода исследований, однако в целом не демонстрировал явных различий между прошлыми веками и современностью (рис. 5, 6).

## Озеро Учум

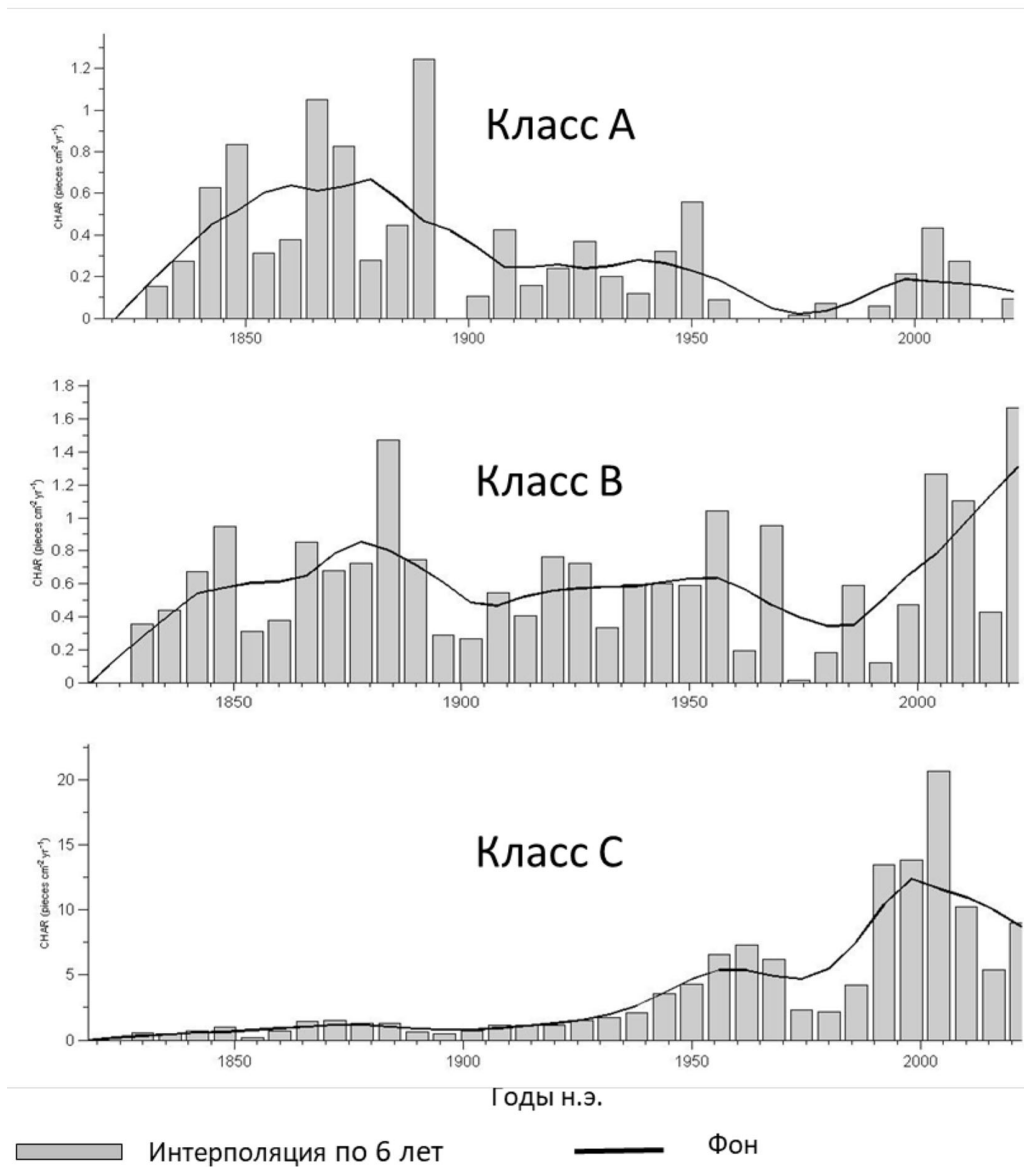


Рис. 6. Седиментационный поток угольных макрочастиц в донные отложения озера Учум. Классы частиц как на рис. 4

Fig. 6. Sedimentary flux of macrocharcoal in Lake Uchum sediments. Particle types as in Fig. 4

## Обсуждение

Резкое увеличение скорости аккумуляции частиц класса С в последнее столетие вероятнее всего объясняется сжиганием твердого топлива (дров, угля) для отопления человеческого жилья, расположенного вблизи исследуемых озер, а также сжиганием дров и древесного угля в летнее время отдыхающими в полевых палаточных лагерях. Однако нельзя исключать, что увеличилась также частота и интенсивность лесных пожаров в окрестностях озер, поскольку в окрестностях исследуемых озер имеются деревья, которые при пожарах могут быть источниками угольных частиц всех трех классов.

Однако частицы классов А и В демонстрируют схожие тренды, отличные от класса С. Если предположить, что угольки классов А и В отражают фон природных пожаров, можно утверждать, что в современный период интенсивность природных пожаров не увеличилась по сравнению с 17–19 веками. Сопоставление динамики угольков с метеорологическими данными, имеющимися для исследуемого региона с 1930-х гг. (данные предоставлены Среднесибирским управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Красноярск), не выявило какой-либо связи с годовым количеством осадков, поскольку временное разрешение нашего анализа и точность датировок не позволяют отслеживать межгодовые различия. Многолетний же тренд осадков за этот период не демонстрирует изменений, которыми можно было бы объяснить резкое увеличение потока угольков класса С в последнее столетие. Аналогичное увеличение угольных частиц в последнее столетие зарегистрировано во многих регионах мира (Kelly et al., 2013; Marlon, 2020; Novenko et al., 2022). Особенно это касается густо населенных территорий Европы и Северной Америки и объясняется как климатическими изменениями, так и деятельностью

человека (Kelly et al., 2013; Marlon, 2020). Вместе с тем показано, например, что в отдаленном регионе Центрально-Тунгусского плато, где хозяйственная деятельность отсутствует, в озерных отложениях отсутствует тренд к увеличению угольных частичек в последнее столетие (Rogozin et al., 2022). Однако в другом отдаленном и незаселенном регионе – плато Путорана, где также отсутствует хозяйственная деятельность, было зарегистрировано увеличение угольных частиц в последнее столетие (Novenko et al., 2022). Таким образом, тренд к современному увеличению угольных частиц присутствует не везде, но данных для обобщений по Сибири очень мало.

Несмотря на отсутствие инструментальных метеоданных, анализ радиального прироста древесных колец, сделанный Бабушкиной с соавторами, позволяет утверждать, что в период с 1850 по 1930-е гг. количество осадков в регионе было ниже среднего (Babushkina et al., 2017). В наших кернах этот период выделяется в виде увеличения потока частиц классов А и В в оз. Учум, что, возможно, указывает на увеличение интенсивности пожаров (рис. 6). Локальный максимум этих частиц в районе 1850-гг. в озере Шира тоже, возможно, обусловлен этим засушливым периодом, с учетом погрешностей датировок. Однако в ряде работ показано, что интенсивность пожаров в степных экосистемах может наоборот положительно коррелировать с влажностью, поскольку во влажные периоды увеличивается биомасса травы, а следовательно – сухого топлива весной и осенью (Leys et al., 2018).

Стоит отметить что в оз. Учум абсолютные значения количества угольков класса С на порядок выше, чем в оз. Шира (рис. 5, 6). Возможно, данный факт объясняется тем, что озеро Учум закрыто высокими холмами со стороны преобладающих в зимнее время года юго-западных и западных ветров, что пре-

пятствует распространению частиц на большие расстояния и способствует их оседанию на поверхность озера. Озеро Шира, напротив, открыто для ветров всех направлений, и, вероятно, угольки разносятся на большие расстояния, в результате чего поток на поверхность озера значительно меньше. Следует заметить, что на обоих озерах жилые массивы (п. Жемчужный и курорт «Озеро Учум») расположены на юго-западных берегах, т.е. со стороны преобладающих ветров, что способствует распространению угольных частиц от печных труб и котельных именно в сторону озер.

Исследованная нами ранее с помощью седиментационных ловушек сезонная динамика потока угольных частиц в оз. Шира за период 2012–2019 (Burdin et al., 2022) убедительно продемонстрировала, что максимум потока угольков приходится на холодный период года (с октября по май), тогда как в летние месяцы поток частиц был значительно меньше. В ловушках во все сезоны преобладали частицы класса С, тогда как частицы А и В в большинстве ловушек вообще отсутствовали, либо встречались единично, и их количество было недостаточным для выявления сезонной динамики. В целом данные ловушек подтверждают, что источником

угольков является главным образом сжигаемое топливо (Burdin et al., 2022). Следует также отметить, что количественный состав угольков в наших кернах в целом соответствует таковому, выявленному ранее в седиментационных ловушках.

### Заключение

Увеличение потока угольных частиц в донные отложения озер Шира и Учум в последнее столетие вероятнее всего отражает возросшее количество сжигаемого людьми топлива в окрестностях исследованных озер. Поток частиц классов А и В не демонстрирует тенденции к возрастанию, следовательно, количество природных пожаров в современный период не увеличилось заметным образом с 17 века. Полученные сведения будут полезны при реконструкциях пожарных режимов по более длинным кернам, охватывающим период в несколько тысячелетий. Настоящая работа является первым исследованием содержания древесных угольков в донных отложениях озер Северо-Минусинской котловины, и поэтому станет ценным вкладом в мировую коллекцию данных для реконструкции пожарных режимов на планете.

### Список литературы / References

Жилич С. В., Рудая Н. А. (2021) Реконструкция палеопожаров Кулундинской степи для последних 3500 лет по данным из донных отложений озера Малое Яровое. *Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий*, 27: 433–440 [Zhilich S. V., Rudaya N. A. (2021) Reconstruction of fire activity in kulunda steppe for the last 3500 years based on the data from the bottom sediments of lake Maloe Yarovoe. *Issues of archeology, ethnography, anthropology of Siberia and adjacent territories* [Problemy arkheologii, etnografii, antropologii Sibiri i sopredel'nykh territorii], 27: 433–440 (in Russian)]

Игай Н. В., Седельников В. П. (2011) Пространственная организация растительности кластера «Озеро Шира». *Природный комплекс и биоразнообразие участка «Озеро Шира» заповедника «Хакасский»*. Абакан, Хакасское книжное издательство, с. 239–243 [Igai N. V., Sedel'nikov V. P. (2011) Spatial organization of the vegetation of the «Lake Shira» cluster. *Natural complex and biodiversity of the site “Lake Shira” of the Reserve “Khakassky”*. Abakan, Khakass Book Publishing House, p. 239–243 (in Russian)]

Савенков И. Т. (1891) *Материалы для медико-топографического описания оз. Шира, собранные в 1890 году*. Красноярск, типография А. Д. Жилина, 62 с. [Savenkov I. T. (1891) *Materials for the medical topographic description of Lake Shira collected in 1890*. Krasnoyarsk, A. D. Zhilin Printing House, 62 p. (in Russian)]

Anderson L., Wahl D. (2016) Two Holocene paleofire records from Peten, Guatemala: Implications for natural fire regime and prehispanic Maya land use. *Global and Planetary Change*, 138: 82–92

Babushkina E. A., Belokopytova L. V., Grachev A. M., Meko D. M., Vaganov E. A. (2017) Variation of the hydrological regime of Bele-Shira closed basin in Southern Siberia and its reflection in the radial growth of *Larix sibirica*. *Regional Environmental Change*, 17(6): 1725–1737

Burdin L. A., Rogozin D. Y., Degermendzhy A. G. (2022) Recent seasonal dynamics of the flux of charcoal particles in the sediments of Shira Lake (southern Siberia) estimated by sedimentation traps. *Doklady Earth Sciences*, 507(1): 977–980

Conedera M., Tinner W., Neff C., Meurer M., Dickens A. F., Krebs P. (2009) Reconstructing past fire regimes: Methods, applications, and relevance to fire management and conservation. *Quaternary Science Reviews*, 28(5–6): 555–576

Feurdean A., Florescu G., Tanțău I., Vanniere B., Diaconu A.-C., Pfeiffer M., Warren D., Hutchinson S. M., Gorina N., Gařka M., Kirpotin S. (2020) Recent fire regime in the southern boreal forests of western Siberia is unprecedented in the last five millennia. *Quaternary Science Reviews*, 244: 106495

Glückler R., Herzsuh U., Kruse S., Andreev A., Vyse S. A., Winkler B., Biskaborn B. K., Pestryakova L., Dietze E. (2021) Wildfire history of the boreal forest of south-western Yakutia (Siberia) over the last two millennia documented by a lake-sediment charcoal record. *Biogeosciences*, 18(13): 4185–4209

Grenaderova A. V., Mandryka P. V., Xiaocun W., Senotrusova P. O., Mikhailova A. B., Quiankun Q. (2021) Comprehensive archaeological and palaeoecological studies of the Holocene chronosequence in the southern taiga of the middle Yenisei. *Stratum Plus*, 6: 299–313

Heidgen S., Marinova E., Nelle O., Ebner M., Rotava T., Tafelmaier Y., Krauß R., Bofinger J., Junginger A. (2022) Palaeoecological signals for Mesolithic land use in a Central European landscape? *Journal of Quaternary Science*, 37(6): 1164–1179

Higuera P. E., Brubaker L. B., Anderson P. M., Hu F. S., Brown T. A. (2009) Vegetation mediated the impacts of postglacial climate change on fire regimes in the south-central Brooks Range, Alaska. *Ecological Monographs*, 79(2): 201–219

Hildebrandt S., Müller S., Kalugin I. A., Dar'in A. V., Wagner M., Rogozin D. Y., Tarasov P. E. (2015) Tracing the North Atlantic decadal-scale climate variability in a late Holocene pollen record from southern Siberia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 426: 75–84

Kalugin I., Darin A., Rogozin D., Tretyakov G. (2013) Seasonal and centennial cycles of carbonate mineralisation during the past 2500 years from varved sediment in Lake Shira, South Siberia. *Quaternary International*, 290–291: 245–252

Kelly R., Chipman M. L., Higuera P. E., Stefanova I., Brubaker L. B., Hu F. S. (2013) Recent burning of boreal forests exceeds fire regime limits of the past 10,000 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(32): 13055–13060

Kirdyanov A. V., Saurer M., Siegwolf R., Knorre A. A., Prokushkin A. S., Churakova (Sidorova) O. V., Fonti M. V., Büntgen U. (2020) Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia. *Environmental Research Letters*, 15(3): 034061

- Knorre A. A., Kirdyanov A. V., Prokushkin A. S., Krusic P. J., Büntgen U. (2019) Tree ring-based reconstruction of the long-term influence of wildfires on permafrost active layer dynamics in Central Siberia. *Science of the Total Environment*, 652: 314–319
- Leys B. A., Marlon J. R., Umbanhowar C., Vanni re B. (2018) Global fire history of grassland biomes. *Ecology and Evolution*, 8(17): 8831–8852
- Marlon J. R. (2020) What the past can say about the present and future of fire. *Quaternary Research*, 96: 66–87
- Mouillot F., Field C. B. (2005) Fire history and the global carbon budget: a 1°x 1° fire history reconstruction for the 20th century. *Global Change Biology*, 11(3): 398–420
- Mustaphi C. J. C., Pisaric M. F. J. (2014) A classification for macroscopic charcoal morphologies found in Holocene lacustrine sediments. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 38(6): 734–754
- Novenko E. Y., Kupryanov D. A., Mazei N. G., Prokushkin A. S., Phelps L. N., Buri A., Davis B. A. S. (2022) Evidence that modern fires may be unprecedented during the last 3400 years in permafrost zone of Central Siberia, Russia. *Environmental Research Letters*, 17(2): 025004
- Parnachev V. P., Degermendzhy A. G. (2002) Geographical, geological and hydrochemical distribution of saline lakes in Khakasia, Southern Siberia. *Aquatic Ecology*, 36(2): 107–122
- Renberg I., Hansson H. (1993) A pump freeze corer for recent sediments. *Limnology and Oceanography*, 38(6): 1317–1321
- Rogozin D. Y., Tarnovsky M. O., Belolipetskii V. M., Zykov V. V., Zadereev E. S., Tolomeev A. P., Drobotov A. V., Barkhatov Y. V., Gaevsky N. A., Gorbaneva T. B., Kolmakova A. A., Degermendzhi A. G. (2017) Disturbance of meromixis in saline Lake Shira (Siberia, Russia): possible reasons and ecosystem response. *Limnologica*, 66: 12–23
- Rogozin D. Y., Bulkhin A. O., Zykov V. V., Ivanova E. A., Darin A. V., Kalugin I. A., Baturina O. A., Kabilov M. R. (2020) Long-chain alkenones in saline meromictic lakes of the North Minusinsk depression (southern Siberia): first knowledge and possible correlation with water-level dynamics. *Contemporary Problems of Ecology*, 13(6): 643–655
- Rogozin D. Y., Bolobanshchikova G. N., Burdin L. A., Meydus A. V. (2022) Macroparticle charcoal in lake sediments of the Central Tunguska Plateau (Siberia, Evenkia) as an indicator of forest fires and a possible trace of the Tunguska Event of 1908. *Contemporary Problems of Ecology*, 15(4): 337–344
- Rudaya N., Krivonogov S., S owinski M., Cao X., Zhilich S. (2020) Postglacial history of the Steppe Altai: Climate, fire and plant diversity. *Quaternary Science Reviews*, 249: 106616
- Unkelbach J., Dulamsuren C., Punsalpaamuu G., Saindovdon D., Behling H. (2018) Late Holocene vegetation, climate, human and fire history of the forest-steppe-ecosystem inferred from core G2-A in the ‘Altai Tavan Bogd’ conservation area in Mongolia. *Vegetation History and Archaeobotany*, 27(5): 665–677
- Wang Z., Huang J.-G., Ryzhkova N., Li J., Kryshen A., Voronin V., Li R., Bergeron Y., Drobyshev I. (2021) 352 years long fire history of a Siberian boreal forest and its primary driving factor. *Global and Planetary Change*, 207: 103653