

УДК 574, 551.583

## БЕСПРЕЦЕДЕНТНОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА УГЛИСТЫХ ЧАСТИЦ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР СЕВЕРО-МИНУСИНСКОЙ КОТЛОВИНЫ (ЮГ СИБИРИ) В СОВРЕМЕННЫЙ ПЕРИОД КАК ВОЗМОЖНОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО АНТРОПОГЕННОГО ВЛИЯНИЯ

© 2023 г. Д. Ю. Рогозин<sup>1,\*</sup>, Л. А. Бурдин<sup>1</sup>,  
Г. Н. Болобанщикова<sup>1</sup>, академик РАН А. Г. Дегерменджи<sup>1</sup>

Поступило 21.03.2023 г.  
После доработки 14.04.2023 г.  
Принято к публикации 25.04.2023 г.

В донных отложениях озер Шира и Учум, расположенных на юге Сибири в степной зоне Северо-Минусинской котловины (Республика Хакасия и Красноярский край), проанализированы распределения углистых размером более 100 мкм, являющихся индикаторами горения растительности на окружающих озера территориях. Возраст исследованных отложений двух озер составил до 1400 и 500 лет назад соответственно. В отложениях обоих озер обнаружены углистые частицы трех типов. Первая группа частиц имеет вытянутую форму и интерпретируется как остатки травянистых растений и/или хвои. Вторая группа имеет вид тонких плоских пластинок и интерпретируется как остатки листьев и коры деревьев. Третью группу составляют объемные частицы различной неправильной формы, являющиеся предположительно остатками от горения древесины и угля. Частицы первого типа в основном являются индикаторами природных пожаров, и их поток не демонстрирует заметного увеличения в современный период. Поток угольных частиц второй и в наибольшей степени третьей групп резко возрастает в последние около ста лет, что отражает увеличение количества сжигаемых людьми древесины и угля в окрестностях исследованных озер в современный индустриальный период. Таким образом, впервые для данного региона выявлено увеличение поступления углистых частиц в донные отложения озер за последние около ста лет, являющееся беспрецедентным на протяжении периода, охваченного нашим исследованием. Тем самым получено свидетельство антропогенного воздействия на динамику углистых частиц в донных отложениях. Полученные сведения могут быть полезны для реконструкции динамики природных пожаров и палео-климата в данном регионе юга Сибири в позднем голоцене.

*Ключевые слова:* угольные частицы, озерные отложения, пожары, южная Сибирь, Минусинская котловина, палеоклимат, антропогенное влияние

DOI: 10.31857/S2686739723600534, EDN: WFCJZJ

Пожары в природных экосистемах являются серьезной угрозой как для целостности самих экосистем, так и для населения, проживающего на этих территориях. В настоящее время во многих регионах мира значительно возросла доля пожаров, вызванных деятельностью человека [1, 2]. Кроме того, количество и интенсивность пожаров зависят от климатических факторов, поэтому в условиях современных климатических измене-

ний требуется адекватный прогноз пожарных обстановок для всех регионов Земли. В свою очередь, для адекватного прогноза необходима информация о динамике пожаров в прошлом. Сравнение современных пожарных обстановок с таковыми в доиндустриальный период позволяет оценить вклад антропогенного фактора в этот процесс [2]. Одним из лучших “архивов” информации о пожарах могут служить донные отложения озер, где количественным индикатором пожаров являются частицы древесных углей (charcoal particles), которые попадают в атмосферу в результате горения растений и оседают на дно водоемов, где сохраняются в течение тысячелетий

<sup>1</sup>Институт биофизики Сибирского отделения  
Российской академии наук, Красноярск, Россия  
\*E-mail: rogozin@ibp.ru

[2, 3]. Показано, что частицы древесных углей размером менее 100–125 мкм характеризуют региональный фон пожаров, тогда как более крупные частицы (более 100 мкм) характеризуют пожарную обстановку в окрестности данного озера [4].

На степных и лесостепных территориях юга Сибири пожары являются регулярным явлением. Часто они вызваны умышленными или случайными поджогами сухой травы весной и осенью. В частности, на территории Минусинской котловины активность пожаров составляет 1–10 пожаров/1000 км<sup>2</sup> день<sup>-1</sup> (NASA Observatory, данные 2015 г.). Пожары регулярно наносят ущерб жилым и хозяйственным постройкам, бывали и человеческие жертвы [5]. Кроме того, степная полоса юга Сибири подвержена значительным колебаниям влажности, и испытывала периоды длительных засух и увлажнений на протяжении голоцена [6], что вероятно отражается на колебаниях природного фона пожаров. В частности, Минусинская котловина представляет особый интерес с точки зрения палеоклимата. Это равнинная территория, окруженная горными хребтами, которые препятствуют проникновению влажных воздушных масс, в результате чего здесь формируется полуаридный микроклимат, более мягкий по сравнению с окружающей территорией. Данная территория уникальна большим количеством археологических памятников, оставленных несколькими последовательно сменяющимися и частично проникающими друг в друга культурами каменного, бронзового и железного веков. Предположительно, именно благоприятный климат является причиной относительно высокого уровня развития древнего населения, поэтому связь человеческой деятельности с климатическими вариациями, например, смена основы хозяйства с животноводства на земледелие, может здесь проявляться особенно четко [7]. Выяснению закономерностей климатических изменений и антропогенных воздействий может помочь реконструкция динамики пожаров по озерным отложениям. На сегодняшний день обширная территория Сибири недостаточно изучена с точки зрения палео-пожаров. Имеющиеся реконструкции по древесным кольцам [8], торфяным колонкам [9] и озерным отложениям [3] проведены для лесных экосистем в более высоких широтах, тогда как по степным и лесостепным регионам юга Сибири на сегодняшний день работ явно недостаточно [3]. В недавних литературных обзорах по палео-пожарам [1, 2] упоминания о Сибири вообще отсутствуют, поэтому новая информация о динамике палео-пожаров в ранее неизученном регионе представляет фундаментальный интерес.

В настоящей работе мы впервые проанализировали содержание углистых частиц размером свыше 100 мкм в донных отложениях двух озер,

расположенных на юге Сибири в лесостепной зоне Северо-Минусинской котловины (Республика Хакасия и Красноярский край), и выявили, что в обоих озерах значительно возрастает поток частиц в последние около ста лет, что вероятнее всего вызвано усилением хозяйственной деятельности человека, в том числе сжиганием топлива в прилегающих к озерам населенных пунктах. Наши данные в целом подтвердили тенденцию к беспрецедентному увеличению потока углистых частиц, характерную для многих регионов мира в индустриальный период, и показали, что ранее неисследованный в этом отношении степной регион юга Сибири подвержен этой же тенденции.

Озеро Ши́ра (54°30′ с.ш., 90°11′ в.д.) расположено в Ширинском районе Республики Хакасия, в 15 км от районного центра п. Ши́ра. Озеро имеет овальную форму, размерами 5.3 × 9.3 км, площадью 35.9 км<sup>2</sup>, максимальная глубина 24.5 м (2021). Озеро Ши́ра обладает бальнеологическими свойствами, на его юго-западном берегу круглогодично функционирует известный курорт “Озеро Ши́ра” и расположен поселок Жемчужный. К поселку примыкают дачные массивы и базы отдыха.

Озеро Учум (55°05′ с.ш., 89°43′ в.д.) расположено в 70 км к северо-западу от озера Ши́ра, на территории Ужурского района Красноярского края, в 30 км к югу от г. Ужур. 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°C, января около –19°C. Потенциальное испарение на данной территории (600 мм год<sup>-1</sup>) превышает среднегодовое количество осадков (300 мм год<sup>-1</sup>) [10]. Полуаридный климат способствует формированию степного ландшафта, зимой на озерах формируется ледовый покров толщиной около одного метра. В летнее время озера являются популярным местом отдыха, здесь располагается большое количество палаточных кемпингов и неорганизованных стоянок отдыхающих.

Керны донных отложений были отобраны из озера Ши́ра 4 марта 2021 г. в точке с координатами 54°30.387′ с.ш., 090°11.652′ в.д., из озера Учум 16 марта 2022 г. в точке с координатами 55°05.670′ с.ш., 089°43.406′ в.д.. Длина кернов составила 110 и 70 см соответственно. Отбор кернов осуществляли в центральной глубоководной части озер, на ледовой поверхности через отверстие во льду. Керны отбирали с помощью ударно-гравитационного

устройства UWITEC (Австрия), затем транспортировали в лабораторию в вертикальном положении, где разрезали вдоль вертикальной оси, фотографировали с миллиметровой линейкой и разделяли на поперечные образцы с шагом 1 см. В образцах проводили подсчет угольных частиц на основе методик, описанных в работах [4, 11]. А именно, известный объем влажных донных отложений помещали в дефлокулирующий раствор (6% гексаметафосфат натрия) на три часа, затем просеивали мокрым способом через ткань с размером ячеек 100 мкм (мельничный газ). Полученный остаток выдерживали 1 ч в 6% гипохлорите натрия для отбеливания и снова просеивали через ту же ткань. Остаток помещали в камеру Богорова и угольки подсчитывали под стереомикроскопом в отраженном свете при 25-кратном увеличении. 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>), [12], с помощью которой полученные значения содержания угольков в образцах интерполировали через равные промежутки времени, и проводили сглаживание для выявления фона, отражающего усредненную интенсивность горения в регионе, а также процессы переотложения и привноса материала смывом с территории водосбора [12].

Оценка возраста донных отложений оз. Ши́ра была проведена ранее по другим кернам, отобраным в этой же точке, на основе измерений активности изотопов  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{14}\text{C}$ , в сочетании с подсчетом годовых слоев (варв), и опубликована в работе [13]. В качестве репера для стыковки разных кернов оз. Ши́ра использовали четко визуально различимый светлый слой на глубине около 13 см. Возраст отложений озера Учум был ранее оценен по активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{210}\text{Pb}$  для верхней части отложений [10]. В настоящей работе мы скорректировали оценку возраста с учетом уменьшения толщины годовых слоев (варв) с глубиной. Для этого количество варв подсчитывалось на нескольких участках керна двумя людьми и средние значения толщины годовых слоев принимались для оценки возраста. На участках, где варвы были визуально плохо различимы, толщина годового слоя принималась как среднее значение между прилегающими с обеих сторон участками с визуально различимыми варвами.

Анализ углистых частиц позволил выделить три типичные группы, различающиеся по форме, и соответствующие описанным ранее в литературе [11, 14]. Первая группа углистых частиц имеет вытянутую форму, предположительно это остатки травянистых растений, тонких корней, хвои,

жилок листьев т.п. [11, 14], эти объекты условно названы нами “травинки”. Вторая группа имеет вид тонких плоских “чешуек”, интерпретируется в литературе как остатки листьев, а также в некоторых случаях коры и древесины [11, 14]. Третью группу составляли объемные частицы различной неправильной формы, предположительно являющиеся остатками от горения древесины, угля и прочих горючих твердых материалов [11, 14]. Вышеуказанные морфотипы частиц соответствовали ранее выявленным нами в седиментационных ловушках озера Ши́ра [5].

В отложениях обоих озер углистые частицы всех трех типов обнаруживались на всех глубинах, однако, распределение по глубине отложений было неоднородным (рис. 1, 2). Наиболее заметные неоднородности были выявлены в слоях, соответствующих последнему столетию, а именно — резкое увеличение скорости накопления частиц 2 и 3 типов (рис. 1, 2). Поток частиц первого типа в современный период не демонстрирует заметного увеличения в современный период (рис. 1, 2).

Присутствие углистых частиц размером более 100 мкм интерпретируется в литературе как остатки растений, сгоревших в непосредственной близости от озера, в радиусе около 10 км [4, 11]. Наиболее вероятной причиной возрастания скорости накопления углистых частиц второго и третьего типов в исследованных озерах в современный период является человеческая деятельность. На берегах обоих водоемов источниками таких частиц являются трубы котельных и частных домов, а также костры, разводимые людьми на берегах во время летнего отдыха. Нами ранее была проанализирована сезонная динамика потока углистых частиц в отложения озера Ши́ра с помощью седиментационных ловушек в течение нескольких лет, и убедительно показано, что эти потоки возрастают ежегодно именно в холодное время года [5]. В ловушках во все сезоны преобладали объемные частицы, тогда как “травинки” и “листки” в большинстве ловушек вообще отсутствовали, либо встречались единично, и их количество было недостаточным для выявления сезонной динамики [5]. Эти данные в сочетании с нашими данными из кернов свидетельствуют о прямом антропогенном влиянии в виде сжигания дров и угля для обогрева и прочих хозяйственных нужд, очевидно сильно возросшем именно в период с начала 20 века и до наших дней. Вместе с тем пожары в природных экосистемах, вызванные человеческой деятельностью, также могут вносить вклад в наблюдаемое нами увеличение. Однако индикаторами природных пожаров являются частицы первого типа, а их поток в современный период не увеличивался (рис. 1, 2). Вероятно, интенсивность степных и лесных пожаров в окружающих озера экосистемах не столь заметно увеличилась по сравнению с прошлым.

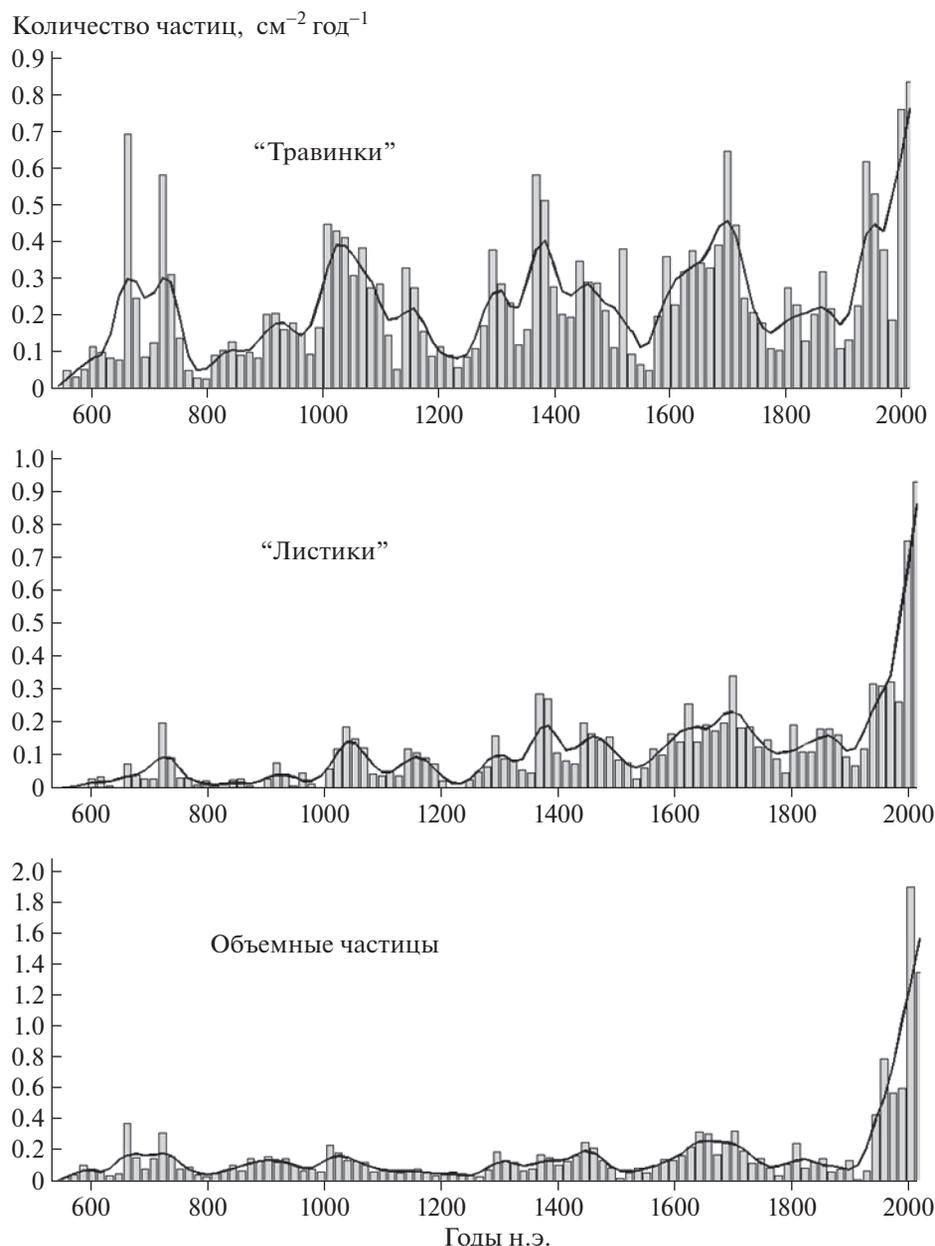


Рис. 1. Скорость накопления углистых частиц в донных отложениях озера Ширы.

Рост потока углистых частиц в отложениях последних десятилетий был зарегистрирован во многих регионах мира, в том числе и в Сибири [6, 9], включая такой малонаселенный район как плато Путорана [3]. Вместе с тем в другом малонаселенном районе Сибири — на Центрально-Тунгусском плато (Красноярский край, Эвенкия) — в отложениях трех исследованных озер нами не было выявлено аналогичного увеличения [15], что свидетельствует о неоднородности антропогенной нагрузки на различных территориях, и соответственно, порождает интерес к оценке этой неоднородности в масштабе всей Сибири.

Стоит отметить, что несмотря на схожую динамику, абсолютные значения для частиц второго и третьего типа в оз. Учум на порядок выше, чем в оз. Ширы (рис. 1, 2). Возможно, это объясняется тем, что оз. Учум окружено высокими холмами со стороны преобладающих в зимнее время западного и юго-западного ветров. В результате частицы от поселка, расположенного на юго-западном берегу, не разносятся ветром на далекие расстояния, а оседают в большем количестве на поверхность озера. Озеро Ширы, наоборот, открыто для всех ветров, и поэтому частицы разносятся на

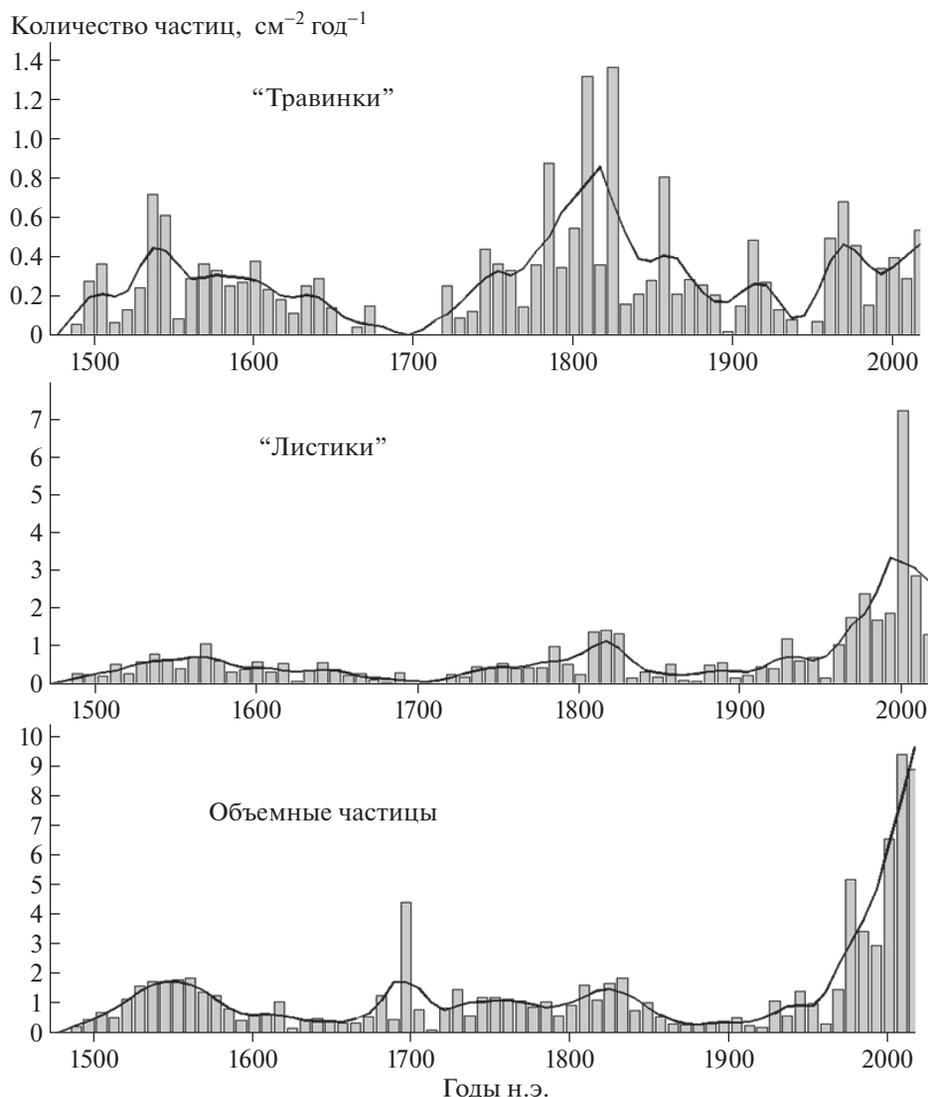


Рис. 2. Скорость накопления углистых частиц в донных отложениях озера Учум.

большие расстояния, в результате чего поток на поверхность озера меньше.

Таким образом, нами впервые для данного региона выявлено увеличение поступления углистых частиц в донные отложения озер за последние около ста лет, являющееся беспрецедентным на протяжении позднего голоцена. Тем самым получено свидетельство антропогенного воздействия на динамику углистых частиц в донных отложениях именно для данного региона.

Кроме того, полученная нами информация может быть полезна для интерпретации профилей угольков в кернах более древних озерных отложений, и соответственно, реконструкции палео-климата данного региона. Бессточные озера в аридных и полу-аридных регионах чутко реагируют на изменения влажности климата изменением объема, соответственно соленость меняется в об-

ратной зависимости от объема. В свою очередь, изменения солености отражаются на геохимическом и биохимическом составе донных отложений, а также на составе пыльцы и спор, захороненных в донных отложениях. В настоящее время ведутся исследования донных отложений озер Шира и Учум с целью реконструкции влажности климата по геохимическим и биохимическим палео-индикаторам, а также по спорово-пыльцевым спектрам. Полученные нами распределения угольных частиц будут сопоставлены с профилями пыльцы и спор растений, элементного и минерального состава, липидами и пигментами фотосинтезирующих микроорганизмов, тем самым будет повышена надежность реконструкций влажности климата.

Сопоставление состава угольков в кернах с таковым в седиментационных ловушках дает осно-

вание для дифференциации различных типов частиц по их информативности. А именно, нами показано, что в современный период “травинки” в большей степени отражают природный фон пожаров, тогда как объемные частицы – антропогенные поступления. Следовательно, и в более древних отложениях на тех участках кернов, где разные типы частиц не коррелируют друг с другом, “травинки” в большей степени будут отражать климатические изменения, и будут более информативны для реконструкции климата. В свою очередь, объемные частицы на таких участках могут отражать динамику населения, и в меньшей степени зависеть от климата. Соответственно, локальные пики объемных частиц могут указывать на эпизоды массового присутствия древних обитателей в окрестностях исследуемых озер.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Ф.Ф. Козлову за помощь во время полевых работ на озерах в зимнее время.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Leys B.A., Marlon J.R., Umbanhowar C., Vannièrè B.* // Global fire history of grassland biomes. *Ecology and Evolution*. 2018, V. 8. P. 8831–8852.
2. *Marlon J.R.* What the past can say about the present and future of fire // *Quaternary Research*. 2020. V. 96. P. 66–87.
3. *Novenko E.Y., Kupryanov D.A., Mazei N.G., Prokushkin A.S., Phelps L.N., Buri A., Davis B.A.S.* Evidence that modern fires can be unprecedented during the last 3400 years in permafrost zone of Central Siberia, Russia // *Environmental Research Letters*. 2022. V. 17. P. 025004.
4. *Anderson S., Wahl D.* Two Holocene paleofire records from Peten, Guatemala: Implications for natural fire regime and prehispanic Maya land use // *Global and Planetary Change*. 2016. V. 138. P. 82–92.
5. *Бурдин Л.А., Rogozin Д.Ю., Дегерменджи А.Г.* Сезонная динамика современного потока углистых частиц в донные отложения озера Ши́ра (юг Сибири), оцененная с помощью седиментационных ловушек // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 147–151. <https://doi.org/10.31857/S2686739722601119>
6. *Rudaya N., Krivonogov S., Stowinski M., Cao X., Zhilich S.* Postglacial history of the Steppe Altai: Climate, fire and plant diversity // *Quaternary Science Reviews*. 2020. V. 249. P. 106616.
7. *Tarasov P.E., Pankova S.V., Long T., Leipe C., Kalinina K.B., Panteleev A.V., Brandt L.O., Kyzlasov I.L., Wagner M.* New results of radiocarbon dating and identification of plant and animal remains from the Oglakhty cemetery provide an insight into the life of the population of Southern Siberia in the early 1st millennium CE // *Quaternary International*. 2022. V. 623. P. 169–183.
8. *Kirryanov A.V., Saurer M., Siegwolf R., Knorre A.A., Prokushkin A.S., Churakova (Sidorova) O.V., Fonti M.V., Büntgen U.* Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia // *Environmental Research Letters*. 2020. V. 15. P. 034061.
9. *Feurdean A., Florescu G., Tant I., Vannièrè B., Diaconu A.-C., Pfeiffer M., Warren D., Hutchinson S.M., Gorina N., Gałka M., Kirpotin S.* Recent fire regime in the southern boreal forests of western Siberia is unprecedented in the last five millennia // *Quaternary Science Reviews*. 2020. V. 244. P. 106495.
10. *Рогозин Д.Ю., Бульхин А.О., Зыков В.В., Иванова Е.А., Дарьин А.В., Калугин И.А., Батурина О.А., Кабилов М.Р.* Длинноцепочечные алкеноны в соленых меромиктических озерах Северо-Минусинской котловины (юг Сибири): первые сведения и возможная связь с динамикой уровня // Сибирский экологический журнал. 2020. V. 6. P. 768–782.
11. *Unkelbach J., Dulamsuren C., Punsalpaamuu G., Saindovdon D., Behling H.* 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*. 2018. V. 27. P. 665–677.
12. *Higuera P., Brubaker L., Anderson P., Hu F., Brown T.* Vegetation mediated the impacts of postglacial climate change on fire regimes in the south-central Brooks Range, Alaska // *Ecol. Monogr.* 2009. V. 79. P. 201–219.
13. *Kalugin I., Darin A., Rogozin D., Tretyakov G.* Seasonal and centennial cycles of carbonate mineralisation during the past 2500 years from varved sediment in Lake Shira, South Siberia // *Quaternary International*. 2013. V. 290–291. P. 245–252.
14. *Mustaphi C.J.C., Pisaric M.F.J.* A classification for macroscopic charcoal morphologies found in Holocene lacustrine sediments // *Progress in Physical Geography*. 2014. V. 1–21.
15. *Рогозин Д.Ю., Болобанщикова Г.Н., Бурдин Л.А., Мейдус А.В.* Угольные макрочастицы в донных отложениях озер Центрально-Тунгусского плато (Сибирь, Эвенкия) как индикатор динамики лесных пожаров и возможный след Тунгусской катастрофы 1908 г. // Сибирский экологический журнал. 2022. V. 4. P. 404–414.

## UNPRECEDENTED INCREASE IN THE CHARCOAL MACROPARTICLES IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF THE LAKES OF THE NORTH- MINUSINSK VALLEY (SOUTH OF SIBERIA) IN THE RECENT TIME AS A POSSIBLE EVIDENCE OF ANTHROPOGENIC INFLUENCE

D. Y. Rogozin<sup>a,#</sup>, L. A. Burdin<sup>a</sup>, G. N. Bolobanshchikova<sup>a</sup>,  
and Academician of the RAS A. G. Degermendzhy<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: rogozin@ibp.ru*

In the bottom sediments of lakes Shira and Uchum, located in the south of Siberia in the steppe zone of the North Minusinsk depression (Republic of Khakassia and Krasnoyarsk Territory), distributions of charcoal particles >100 µm. The age of the studied sediments of the two lakes was up to 1400 and 500 years ago, respectively. Charcoal particles of three types were found in the sediments of both lakes. The first group has an elongated shape and is interpreted as the remains of herbaceous plants and/or needles. The second group looks like thin flat blades and is interpreted as the remains of leaves. The third group consists of bulk particles of various irregular shapes, which are presumably the remains of the combustion of wood and coal. Particles of the first type are mainly indicators of natural fires, and their flux does not show a noticeable increase in the modern period. The flow of coal particles of the second and, to the greatest extent, the third groups has increased sharply in the last about a hundred years, which reflects an increase in the amount of wood and coal burned by people in the vicinity of the studied lakes in the modern industrial period. The data obtained reflect an increase in the amount of wood and coal burned by people in the modern industrial period, as well as a possible increase in the number of wildfires, which may also be due to human activities in the form of accidental or deliberate arson. Thus, for the first time for this region, an increase in the influx of charcoal particles into the bottom sediments of lakes over the past about a hundred years has been revealed, which is unprecedented over the period covered by our study. Thus, evidence of the anthropogenic impact on the dynamics of charcoal particles in bottom sediments has been obtained. The information obtained can be useful for reconstructing the dynamics of natural fires and paleo-climate in this region of southern Siberia in the Late Holocene.

*Keywords:* charcoal particles, lake sediments, fires, South Siberia, paleoclimate, anthropogenic influence