

УДК 574, 551.583

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА СОВРЕМЕННОГО ПОТОКА УГЛИСТЫХ ЧАСТИЦ В ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ОЗЕРА ШИРА (ЮГ СИБИРИ), ОЦЕНЕННАЯ С ПОМОЩЬЮ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ ЛОВУШЕК

© 2022 г. Л. А. Бурдин^{1,2}, Д. Ю. Рогозин^{1,2,*}, академик РАН А. Г. Дегерменджи¹

Поступило 10.06.2022 г.

После доработки 15.07.2022 г.

Принято к публикации 19.07.2022 г.

Лесные и степные пожары несут угрозу природным экосистемам и существенно ухудшают условия жизни людей, населяющих прилегающие территории. Углистые частицы, поступающие в атмосферу при пожарах, попадая в водоемы, сохраняются в донных отложениях и служат индикаторами интенсивности и частоты пожаров при палео-лимнологических реконструкциях. Исследования современных процессов формирования состава озерных отложений методами прямых наблюдений достаточно редки, несмотря на то, что только такие исследования позволяют проверить адекватность интерпретации содержимого древних слоев донных отложений. С помощью цилиндрических ловушек, инкубируемых в глубине озера Шира в период с 2012 по 2019 г., впервые была оценена сезонная динамика седиментационного потока углистых частиц размером свыше 100 микрон в донные отложения озера. Показано, что поток частиц возрастает ежегодно в период с октября по май, что объясняется двумя факторами: сжиганием топлива жителями окружающих поселков для отопления жилищ в холодный период года и весенними степными пожарами, происходящими в апреле–мае. В теплый период года поток существенно снижается, следовательно, костры, разводимые отдыхающими, являются менее значимым источником поступления углистых частиц в озеро. Наши данные показывают значительный вклад антропогенных факторов в седиментационный поток углистых частиц, как в виде следов от сжигаемого топлива, так и в виде следов от пожаров. Оцененный нами ежегодный поток углистых частиц в ловушки совпадает по порядку с величиной, оцененной для других озер по содержанию углистых частиц в современных донных отложениях. Полученные данные позволят более точно интерпретировать распределения углистых частиц в ядрах донных отложений и реконструировать динамику пожаров на юге Сибири в позднем голоцене.

Ключевые слова: угольные частицы, озерные отложения, пожары, седиментационные ловушки, южная Сибирь, палеоклимат

DOI: 10.31857/S2686739722601119

В настоящее время во многих регионах мира наблюдается усиление частоты и интенсивности природных пожаров, что вызвано как антропогенной деятельностью, так и климатическими изменениями [1]. Лесные и степные пожары несут угрозу природным экосистемам и существенно ухудшают условия жизни людей, населяющих прилегающие территории. Для степных районов умеренного пояса характерны пожары, вызванные умышленными или случайными поджогами сухой прошлогодней травы в весеннее время (конец апреля – начало мая). Степные регионы юга

Сибири и, в частности, территория Минусинской котловины (Красноярский край и Республика Хакасия) в значительной степени страдают от таких пожаров. Здесь по данным обсерватории NASA активность пожаров варьирует в диапазоне 1–10 пожаров/1000 км² день (данные за 2015 г.) [2]. Ежегодно от пожаров страдают жилые и хозяйственные постройки. Например, 12 апреля 2015 г. сильный пожар уничтожил жилые дома одновременно в нескольких поселках Ширинского района Республики Хакасия, в том числе десятки домов в районном центре п. Шира, были человеческие жертвы.

С другой стороны, пожары, вызванные естественными причинами (например, возгорания от молний), часто являются необходимым фактором существования природных экосистем и ускоряют круговорот углерода в биосфере [2]. Поскольку частота и интенсивность пожаров зави-

¹ Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

*E-mail: rogozin@ibp.ru

сят от вариаций климатических факторов, в первую очередь температуры и влажности, прогноз пожарных обстановок в условиях возможных климатических изменений представляет собой чрезвычайно актуальную задачу для данной территории. В свою очередь для адекватного прогноза необходима информация о частоте и интенсивности пожаров в прошлом. Оценка вклада климатических и антропогенных факторов в современную пожарную обстановку может быть сделана на основе сравнения с динамикой пожаров в прошлом, реконструированной по природным архивам [1].

Одним из лучших архивов являются донные отложения глубоких озер. Углистые частицы, выпадающие в атмосферу в результате горения растений, сохраняются в озерных отложениях и широко используются для палеореконструкций в качестве количественного индикатора интенсивности пожаров [1]. Показано, что микрочастицы угля (менее 100–125 мкм) отражают региональный фон пожаров на обширной территории, тогда как макрочастицы (более 100 мкм) отражают скорее локальную пожарную обстановку в окрестности данного озера [3]. Очевидно, что для верной интерпретации данных, полученных из ядер древних озерных отложений, необходимы прямые наблюдения за динамикой современных потоков углистых частиц в водоемы. Такая информация может быть получена только в ходе прямых наблюдений за седиментационным процессом с помощью ловушек, устанавливаемых на дне водоемов [4, 5]. В период с 2012 по 2019 г. в озере Ши́ра устанавливались седиментационные ловушки с целью анализа наличия углистых макрочастиц углей и оценки сезонной динамики поступления этих частиц в донные отложения озера Ши́ра. В настоящей работе мы исследовали современную сезонную динамику седиментационного потока углистых частиц в донные отложения озера, расположенного на населенной территории, и выявили существенный вклад антропогенных факторов в этот поток. Полученные данные позволят более точно интерпретировать распределения углистых частиц в ядрах донных отложений и реконструировать динамику пожаров на юге Сибири в позднем голоцене.

Озеро Ши́ра (54°30' с.ш., 90°11' в.д.) находится в Ширинском районе Республики Хакасия, в 15 км от районного центра п. Ши́ра. Озеро овальной формы, размерами 5.3 × 9.3 км, площадью 35.9 кв. км, максимальная глубина 24 м (2019) [6]. Озеро расположено 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⁻¹) превышает среднегодовое количе-

ство осадков (300 мм год⁻¹) [7]. Полуаридный климат способствует формированию степного ландшафта и многочисленных бессточных озер. Озеро Ши́ра обладает бальнеологическими свойствами, на его берегу круглогодично функционирует известный курорт “Озеро Ши́ра” [6], который является основным градообразующим предприятием для поселка Жемчужный, расположенного на юго-западном берегу озера. К поселку примыкают дачные массивы и базы отдыха. В летнее время озеро является популярным местом отдыха, здесь функционирует большое количество кемпингов и неорганизованных стоянок отдыхающих.

Седиментационные ловушки устанавливали в период с 2012 по 2019 г. в различные сезоны в центральной глубоководной части озера вблизи точки с координатами (GPS 54.30.350 с.ш., 90.11.350 в.д.). Точные даты установки и извлечения ловушек приведены в табл. 1. Ловушки представляли собой открытые с верхнего конца полипропиленовые цилиндры длиной 580 мм, диаметром 103 мм. Ловушки размещались на расстоянии около 4 м от дна (на глубине 20 м) на одном капроновом шнуре, установленном на якоре, с буюм на верхнем конце для придания шнуру вертикального положения. После извлечения из воды и транспортировки на берег ловушки выдерживали в вертикальном положении 4 ч, затем сливали верхнюю часть воды через сливные отверстия, расположенные на уровне 100 мм от дна. Остаток тщательно размешивали в оставшемся объеме воды, равном 900 мл, полученную суспензию переливали в пластиковые емкости, герметично закрывали без пузырька воздуха и хранили в темноте при +4°C до обработки [8].

Летом 2017 г. не удалось извлечь ловушку, установленную в мае 2017, поэтому в августе 2017 г. была установлена еще одна ловушка. Обе ловушки были извлечены одновременно в октябре 2017 (табл. 1), поэтому поток в период с мая по август для 2017 г. был рассчитан по разности содержимого обеих ловушек (рис. 2).

Осадочный материал каждой ловушки, хранимый в виде суспензии в герметичных пластиковых бутылках, тщательно перемешивали и отливали 100 мл для анализа углистых частиц. Анализ проводили на основе методик, описанных в работах [3, 9]. Осадочный материал ловушек просеивали мокрым способом через ткань с размером ячеек 100 мкм. Полученный остаток выдерживали 1 ч в 6% гипохлорите натрия для отбеливания и снова просеивали через ту же ткань. Остаток помещали в камеру Богорова и просматривали под стереомикроскопом в отраженном свете при 25–40-кратном увеличении. В качестве объектов для сравнения использовали измельченный древесный и активированный уголь. Углистые частицы

распознавались по наличию металлического блеска, острых граней и хрупкости. Седиментационный поток рассчитывали по формуле:

$$F = \frac{NV}{v\Delta tS},$$

где F – поток углистых частиц (шт см^{-2} сут^{-1}), N – количество подсчитанных углистых частиц в анализируемом образце (шт), V – исходный объем суспензии осадочного материала, извлеченный из ловушки (мл), v – объем анализируемого образца суспензии (мл), Δt – время экспозиции ловушки в озере (сут), S – площадь открытой части ловушки (см^2).

Во всех ловушках были обнаружены углистые частицы различной формы (рис. 1), которые, согласно литературным данным, были интерпретированы как следствия пожаров в непосредственной близости от озера, на окружающей территории в радиусе менее 10 км [3]. При подсчете все углистые частицы были разделены на три типичные группы, различающиеся по форме. Первая группа частиц имела вытянутую форму, которая интерпретируется как остатки травянистых растений, тонких корней и т.п. [9], это объекты условно названы “травинки” (рис. 1 а). Вторая группа имела вид тонких плоских “чешуек” (рис. 1 б), и условно была названа “листки”, поскольку интерпретируется в литературе как остатки листьев [9]. Третью группу составляли объемные “частицы” (рис. 1 в), предположительно являющиеся остатками от горения древесины, угля и прочих горючих твердых материалов. Во всех ловушках количество углистых частиц было небольшим, что объясняется малым количеством анализируемого материала. Преобладали “частицы”, причем в зимних ловушках их было заметно больше. “Травинки” и “листки” в большинстве ловушек вообще отсутствовали. Поэтому сезонную динамику потока углистых частиц мы оценивали по суммарному количеству без деления на группы. Динамика потоков демонстрировала четко выраженную сезонность с максимумами в

Таблица 1. Перечень седиментационных ловушек

Дата установки	Дата извлечения	Длительность экспозиции
27 мая 2012	7 июля 2012	41
8 июля 2012	4 сентября 2012	58
4 сентября 2012	24 октября 2012	50
24 октября 2012	31 мая 2013	219
31 мая 2013	8 июля 2013	39
10 июля 2013	3 сентября 2013	55
4 сентября 2013	23 октября 2013	49
24 октября 2013	26 мая 2014	214
28 мая 2014	9 июля 2014	41
25 мая 2016	3 августа 2016	70
6 августа 2016	16 октября 2016	71
16 октября 2016	27 мая 2017	223
27 мая 2017	24 октября 2017	150**
4 августа 2017	24 октября 2017	81**
24 октября 2017	30 мая 2018	218
30 мая 2018	4 августа 2018	66
4 августа 2018	21 октября 2018	78
21 октября 2018	28 мая 2019	219
29 мая 2019	23 июля 2019	55

**Поток за период с мая по август 2017 г. рассчитывали по разности двух ловушек (пояснения в тексте).

период с октября по май и минимумами летом и в начале осени (рис. 2). Очевидно, что в зимнее время существенно возрастает поступление угольков от сжигаемого топлива (уголь, дрова) для отопления жилищ в окрестных поселках. Помимо частных жилищ, в поселке Жемчужный расположены угольные котельные с высокими трубами, которые, вероятно, служат источником поступления несгоревших угольков на ледовую поверхность озера.

В свою очередь, в период конца апреля – начала мая после схода снега здесь наблюдается наи-

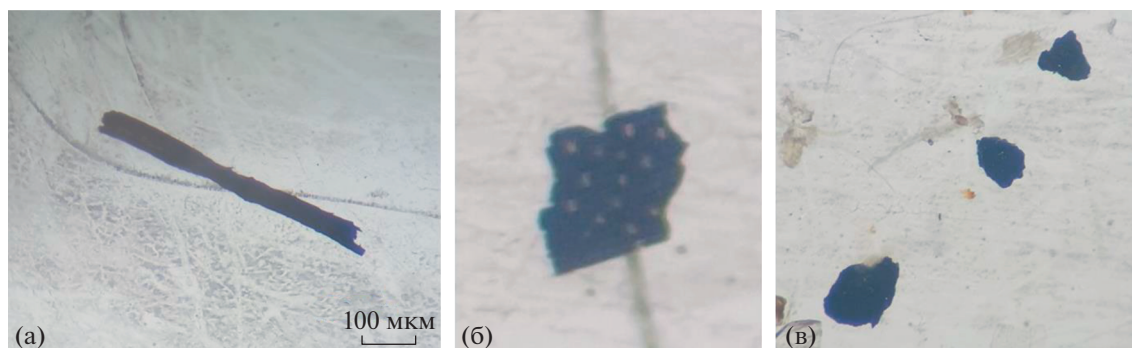


Рис. 1. Типичные формы углистых частиц, обнаруженные в седиментационных ловушках в озере Шира.

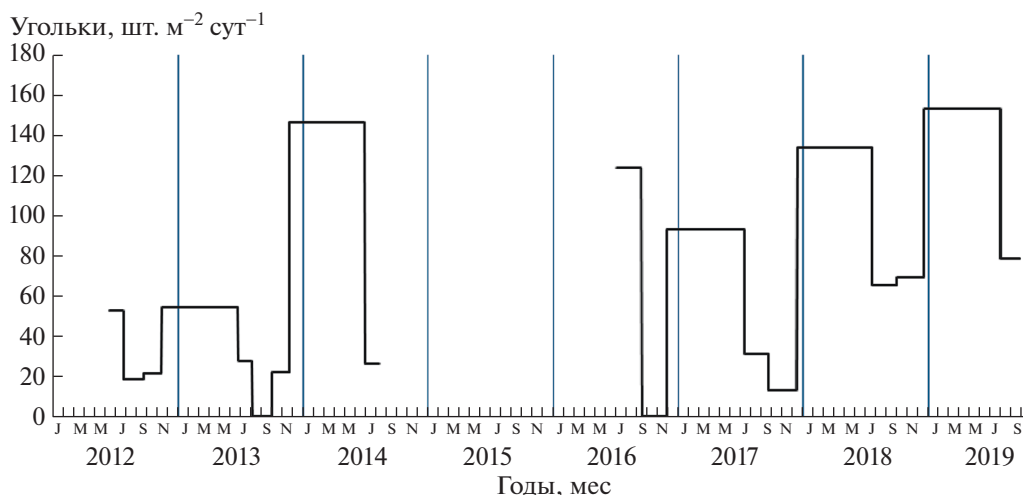


Рис. 2. Поток углистых частиц в седиментационные ловушки в озере Шира.

большее количество степных пожаров, обусловленных наличием сухой прошлогодней травы, поджигаемой людьми случайно или целенаправленно. Таким образом, угольки от двух разных источников — зимнего сжигания топлива и весенних пожаров — попадают в одни и те же ловушки “октябрь–май”, поэтому оценить вклад каждого из источников в отдельности невозможно без специальных исследований. Однако преобладание угольков типа “частицы”, показывает, что основной вклад дает сжигание топлива. При горении степной растительности следовало бы ожидать преобладания угольков типа “травинки” и “листки”, чего в нашем случае не наблюдается.

Интегрирование кривой на рис. 2 на участках непрерывной экспозиции ловушек позволяет оценить годовой поток углистых частиц. Для периодов май 2012–май 2014 и октябрь 2016–октябрь 2018 г. эта величина составила около 2.5 и 3 шт. см⁻² год⁻¹ соответственно. Данные величины по порядку сопоставимы с потоками, оцененными в ядрах озерных отложений в разных частях мира [1, 9]. По нашим предварительным оценкам, в ядрах современных донных отложений озера Шира эта величина составляет около 1–1.5 шт. см⁻² год⁻¹, тогда как в более древних отложениях возрастом более ста лет поток заметно ниже — порядка 0.1–0.2 шт. см⁻² год⁻¹. Таким образом, поток, измеренный методом ловушек, совпадает по величине с таковым, оцененным по современным донным отложениям, что говорит об адекватности применения метода ловушек и доказывает хорошую сохранность угольков в древних отложениях. Оцененная нами величина современного потока превышает таковую для более древних отложений, что подтверждает вывод об увеличении седиментационного потока углистых частиц

в современный период за счет антропогенных факторов.

Исследования современных процессов формирования состава озерных отложений методами прямых наблюдений достаточно редки, несмотря на то, что только такие исследования позволяют проверить адекватность интерпретации содержимого древних слоев донных отложений. Ценность данной работы заключается в том, что на протяжении нескольких лет выявлена повторяющаяся сезонная периодичность потока углистых частиц, которая показала, что основной вклад в этот поток вносят антропогенные факторы. Полученная нами информация будет полезна для интерпретации профилей углистых частиц в ядрах более древних озерных отложений данного региона.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Полевые работы осуществлялись в рамках Государственного задания № 0287-2021-0019 Института биофизики СО РАН. Лабораторные исследования, анализ всех данных и написание статьи выполнены за счет средств Российского научного фонда, грант № 22-27-00398, <https://rscf.ru/project/22-27-00398/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Marlon J.R. What the past can say about the present and future of fire // *Quaternary Research*. 2020. V. 96. P. 66–87.
2. 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.
3. 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.

4. *Ojala A.E.K., Kosonen E., Weckström J., Korkonen S., Korhola A.* Seasonal formation of clastic-biogenic varves: the potential for palaeoenvironmental interpretations // *GFF*. 2013. V. 135. P. 237–247.
5. *Apolinarska K., Pleskot K., Pelechata A., Migdalek M., Siepak M., Mariusz Pelechaty M.* The recent deposition of laminated sediments in highly eutrophic Lake Kierskie, western Poland: 1 year pilot study of limnological monitoring and sediment traps // *Journal of Paleolimnology*. 2020. V. 63. P. 283–304.
6. *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.* Disturbance of meromixis in saline Lake Shira (Siberia, Russia): possible reasons and ecosystem response // *Limnologica*. 2017. V. 66. P. 12–23.
7. *Ямских Г.Ю.* Растительность и климат голоцена на территории Минусинской котловины. Красноярск: Изд-во Красноярского университета, 1995. 180 с.
8. *Rogozin D.Y., Zykov V.V., Bulkhin A.O., Degermendzhi A.G.* Okenone in lake sediments as a proxy of water surface level of saline stratified lake // *Doklady Earth Sciences*. 2020. V. 493. P. 565–568.
9. *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.

RECENT SEASONAL DYNAMICS OF CHARCOAL PARTICLES FLUX INTO THE SEDIMENTS OF LAKE SHIRA (SOUTH SIBERIA) ESTIMATED BY SEDIMENTATION TRAPS

L. A. Burdin^{a,b}, D. Y. Rogozin^{a,b,#}, and Academician of the RAS A. G. Degermendzhi^a

^a *Institute of Biophysics, Siberian Division of Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia*

^b *Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

[#] *E-mail: rogozin@ibp.ru*

Forest and steppe fires pose a threat to natural ecosystems and significantly worsen the living conditions of people living in the surrounding areas. Charcoal particles released into the atmosphere during fires, are stored in lake sediments and used in paleo-limnological reconstructions as a proxy of the intensity and frequency of fires. Direct observations of formation of recent lake sediments are quite rare, despite quite necessary for adequate interpretation of ancient layers of bottom sediments. Using cylindrical traps incubated at the bottom of Lake Shira (South Siberia, Khakassia) from 2012 to 2019, the seasonal dynamics of the sedimentation flow of charcoal particles >100 μm into the bottom sediments of the lake was estimated for the first time. It is shown that the charcoal flux increases annually from October to May, which is explained by burning of fuel by the inhabitants of the surrounding villages during the cold season and by steppe fires occurring in April–May. In summer, the flow decreases significantly, therefore, campfires made by vacationers are a less significant source of coal particles entering the lake. We show a significant anthropogenic contribution to the sedimentation flow of charcoal particles, both from burning fuel and from fires. The value of annual flux of charcoal particles into traps is similar to the value estimated for recent sediments of other lakes in the world. Our data will be useful for more accurately reconstruction the dynamics of fires in southern Siberia in the late Holocene.

Keywords: charcoal particles, lake sediments, fires, sedimentation traps, South Siberia, paleoclimate