

EDN: YUKQOS

УДК 504.455:627.157:630*43–022.58

Macro-Charcoal in Sediments of Lake Suzdalevo (Krasnoyarsk Krai, Siberia) as a Proxy of Natural Fires: on the Problem of the Tunguska 1908 Event

**Denis Yu. Rogozin^{*a},
Leonid A. Burdin^{a, b} and Artur V. Meydus^c**

*^aInstitute of Biophysics SB RAS,
Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center SB RAS”
Krasnoyarsk, Russian Federation*

*^bSiberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

*^cV.P. Astafyev Krasnoyarsk State Pedagogical University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 23.03.2023, received in revised form 02.05.2023, accepted 19.06.2023

Abstract. The study analyzes distributions of macro-charcoal particles >100 µm and charcoal accumulation rate in the bottom sediments of a small shallow lake Suzdalevo, located in the southern part of the Evenkiysky District of Krasnoyarsk Krai, within the Tungusky Nature Reserve. These parameters are indicators of forest fires in the surrounding area. This lake is located in the zone of massive forest fall, which occurred on June 30, 1908, as a result of a powerful atmospheric explosion of unknown nature, called the “Tunguska catastrophe of 1908” (“Tunguska meteorite”). The sediments contained two major types of macro-charcoal particles. The first type included flat particles of various irregular shapes, interpreted as the remains of burnt leaves and, partially, wood. The second type included thin long particles, which were the remains of burnt grasses, leaves, and needles. The distribution and accumulation rate of the first type particles showed an increase in the deepest layers, corresponding to a time period older than 250 years ago. The accumulation rate of the second type particles noticeably increased in layers older than 180 years, while in younger layers it was insignificant. In sediments corresponding to 1908, no anomalies were found in the contents of macro-charcoal particles of both types. Thus, in the Lake Suzdalevo sediments, we did not find any traces of a vast fire that occurred at the time of the “Tunguska catastrophe of 1908”. A possible explanation may be that the fire did not spread as far as the lake, and the direction of the wind was not favorable for the coal particles to fall into

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: rogozin@ibp.ru

ORCID: 0000-0002-9350-2936 (Rogozin D.); 0000-0003-4974-7909 (Meydus A.)

the lake. In addition, there was no increase in the particle flux characteristic of a number of regions in the modern period, obviously because of the lack of economic activity and the extremely low presence of humans in this region.

Keywords: forest fires, charcoal, lake sediments, Tunguska 1908 Event.

Acknowledgments. The authors are grateful to Evgenia Moroz, Pavel Goncharov, Vladimir Bazhenov, and Alexander Kukharev for their help in the field work. This study was supported by Russian Science Foundation, Grant No. 22–27–00398, <https://rscf.ru/project/22–27–00398>. The sediment core of Lake Suzdalevo was collected by Meydus A. V. in 2019.

Citation: Rogozin D. Yu., Burdin L. A., Meydus A. V. Macro-charcoal in sediments of Lake Suzdalevo (Krasnoyarsk Krai, Siberia) as a proxy of natural fires: on the problem of the Tunguska 1908 Event. *J. Sib. Fed. Univ. Biol.*, 2023, 16(3), 271–281. EDN: YUKQOS



Угольные макрочастицы в донных отложениях озера Суздалево (Красноярский край, Эвенкия) как индикатор природных пожаров: к проблеме Тунгусской катастрофы 1908 г.

Д. Ю. Рогозин^а, Л. А. Бурдин^{а, б}, А. В. Мейдус^в

*^аФИЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения РАН»,
обособленное подразделение Институт биофизики СО РАН*

Российская Федерация, Красноярск

^бСибирский федеральный университет

Российская Федерация, Красноярск

*^вКрасноярский государственный педагогический университет
имени В. П. Астафьева*

Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. В донных отложениях небольшого мелководного озера Суздалево, расположенного в южной части Эвенкийского района Красноярского края на территории заповедника «Тунгусский», проанализированы распределения и скорости поступления угольных макрочастиц размером более 100 мкм, являющихся индикаторами лесных пожаров на окружающей территории. Данное озеро расположено в зоне массового вывала леса, произошедшего 30 июня 1908 г. в результате мощного атмосферного взрыва неизвестной природы, получившего название «Тунгусской катастрофы 1908» («Тунгусский метеорит»). В отложениях преобладали частицы преимущественно двух типов. К первому типу относились плоские частицы различной неправильной формы, интерпретируемые как остатки сгоревших листьев и частично древесины. Ко второму типу относились тонкие длинные частицы, как правило, являющиеся остатками сгоревших трав, листьев, а также хвои.

Скорость поступления частиц первого типа демонстрировала увеличение в наиболее глубоких слоях, соответствующих периоду времени старше 250 лет назад. Скорость поступления частиц второго типа заметно повышалась в слоях старше 180 лет, тогда как в более молодых слоях она была незначительной. В отложениях, соответствующих 1908 г., не было обнаружено каких-либо аномалий содержания угольных частиц обоих типов. Таким образом, в отложениях оз. Суздалево мы не обнаружили следов обширного пожара, возникшего в момент «Тунгусской катастрофы 1908». Возможно, границы распространения пожара не достигали данного озера, и направление ветра не способствовало попаданию угольных частиц в озеро. Также не было зарегистрировано характерного для ряда регионов увеличения потока частиц в современный период, что очевидно объясняется отсутствием хозяйственной деятельности и крайне малым присутствием человека в данном регионе.

Ключевые слова: лесные пожары, угольные частицы, донные отложения, Тунгусская катастрофа 1908 г.

Благодарности. Авторы благодарны Евгению Мороз, Павлу Гончарову, Владимиру Баженову и Александру Кухареву за помощь в полевых работах. Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда, грант № 22–27–00398, <https://rscf.ru/project/22–27–00398>. Керн донных отложений озера Суздалево был отобран в 2019 г. Мейдусом А. В.

Цитирование: Рогозин Д. Ю. Угольные макрочастицы в донных отложениях озера Суздалево (Красноярский край, Эвенкия) как индикатор природных пожаров: к проблеме Тунгусской катастрофы 1908 г. / Д. Ю. Рогозин, Л. А. Бурдин, А. В. Мейдус // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2023. 16(3). С. 271–281. EDN: YUKQOS

Введение

Тунгусская катастрофа 1908 г. («Тунгусский метеорит») является одним из наиболее загадочных явлений на памяти человечества, и природа данного явления до сих пор остается неизвестной (Gladysheva, 2020; Kavková et al., 2022). Атмосферный взрыв, прогремевший 30 июня 1908 г. в районе среднего течения р. Подкаменная Тунгуска, в южной части современного Эвенкийского района Красноярского края, получивший название «Тунгусской катастрофы 1908» (Tunguska Event, TE), до сих пор является самым мощным из документированных явлений подобного рода в истории Земли (Kavková et al., 2022). Ни одна из существующих гипотез о причинах данного явления не получила четкого подтверждения на сегодняшний день (Kavková et al., 2022). Ре-

зультатом данной катастрофы явились гибель как минимум трех человек, вывал леса на территории около 2000 км² и обширный лесной пожар (Васильев, Львов, 2003; Gladysheva, 2020; Kavková et al., 2022). Малое число жертв обусловлено лишь крайне малой заселенностью данной территории и отсутствием здесь крупных поселений, в противном случае жертв и разрушений могло быть гораздо больше. Очевидно, что явления подобного рода не исключены и в будущем (Kletetschka et al., 2019), поэтому любые новые сведения об истории Тунгусской катастрофы и её последствиях представляют фундаментальный интерес и могут быть полезны для выяснения природы этого загадочного явления.

Донные отложения озер являются одними из лучших архивов природных событий,

в том числе пожаров. Макрочастицы древесных углей, попадающие в атмосферу во время пожаров, оседают на поверхность водоемов и хорошо сохраняются в донных отложениях, где служат палеоиндикатором периодичности пожаров в прошлом (Conedera et al., 2009). Было показано, что частицы угля размером менее 100–125 мкм характеризуют фоновый уровень пожаров на обширной территории, тогда как макрочастицы (более 100 мкм) отражают скорее локальную пожарную обстановку в окрестности радиусом несколько километров вокруг данного озера (Anderson, Wahl, 2016).

Соответственно, в водоемах, расположенных в районе Тунгусской катастрофы, макрочастицы древесных углей могут являться маркерами слоев донных отложений, соответствующих 1908 г., а следовательно – указывать, в каких слоях отложений возможен целенаправленный поиск геохимических следов катастрофы, в том числе частиц взвешенного происхождения (при наличии таковых) (Darin et al., 2020).

Лесные пожары являются характерным явлением в таежной зоне центральной Сибири, где они наносят значительный ущерб природным биоценозам и существенно ухудшают условия жизни местного населения из-за задымления атмосферы (Rogozin et al., 2022). Предположительно основной естественной причиной возгораний здесь являются «сухие» грозы в период летней засухи, которая является регулярным явлением в данном регионе. Кроме того, причины антропогенного характера (случайные и умышленные поджоги) в современный период существенно усиливают частоту и интенсивность пожаров во многих регионах Земли (Marlon, 2020), в том числе и на территории Сибири (Feurdean et al., 2020; Novenko et al., 2022). Сравнение количества угольных частиц в современных

отложениях с таковыми в более глубоких датированных слоях позволяет оценить вклад человека в пожарную обстановку в индустриальный период (Feurdean et al., 2020; Novenko et al., 2022).

На обширной территории Сибири данные по палеопожарным обстановкам очень малочисленны. Имеется ряд работ по реконструкции палеопожаров, сделанных по древесным кольцам (Knorre et al., 2019; Kirduyanov et al., 2020), а также по торфяным колонкам (Feurdean et al., 2020; Grenaderova et al., 2021) и озерным отложениям (Novenko et al., 2022). Центральное-Тунгусское плато, на котором расположено исследуемое в настоящей работе озеро Суздалево, находится прямо в центре большой территории, почти не изученной с точки зрения палеоклимата, а соответственно – нет опубликованных данных по индикаторам пожаров, за исключением одной нашей работы (Rogozin et al., 2022). В недавнем обзоре по палеопожарам (Marlon, 2020) упоминания о Сибири вообще отсутствуют.

Таким образом, выявление динамики пожаров в таежной зоне центральной Сибири чрезвычайно актуально как для выявления возможных следов Тунгусской катастрофы 1908 г., так и для прогнозирования будущих пожарных обстановок, обусловленных климатическими изменениями и деятельностью человека, а также для более равномерного наполнения мирового массива данных по палеопожарам, необходимого для уточнения глобальных прогнозов.

Целью настоящей работы явился анализ вертикального распределения угольных макрочастиц размером свыше 100 мкм в донных отложениях небольшого мелководного озера Суздалево, расположенного на Центральное-Тунгусском плато (Эвенкийский район, Красноярский край), на границе территории, подвергшейся действию обширного лесно-

го пожара в момент Тунгусской катастрофы 1908 г.

Материалы и методы

Объект исследования

Озеро Суздалево (60°39'30" СШ, 102°00'02" ВД) расположено в южной части Эвенкийского района, на территории государственного природного заповедника «Тунгусский», примерно в 60 км к северо-западу от ближайшего населенного пункта п. Ванавара. Озеро расположено в пойме небольшой реки Чамба, являющейся притоком крупной реки Подкаменная Тунгуска (рис. 1). Озеро отделено от реки естественной полосой суши шириной около 45 м и высотой до 4 м. Озеро пресноводное, имеет округлую форму около 120 м в диаметре и максимальную глубину

около 2,3 м (Kavková et al., 2022). Окружающая озеро территория покрыта лесом, преобладающими видами являются сосна (*Pinus*), береза (*Betula*), ель (*Picea*), ива (*Salix*) и лиственница Гмелина (*Larix gmelini*) (Kavková et al., 2022). Существующая среди местных жителей легенда о том, что данное озеро возникло во время Тунгусской катастрофы, была опровергнута на основе датировок донных отложений: было показано, что озеро существовало задолго до 1908 г. (Kavková et al., 2022).

Отбор донных отложений

Керн донных отложений длиной 76 см был отобран в сентябре 2019 г. в центральной части оз. Суздалево с помощью ударно-гравитационного устройства UWITEC (Австрия). Керн в вертикальном положении



Рис. 1. Географическое положение озера Суздалево. Пунктирной линией показана предполагаемая граница пожара, возникшего в результате Тунгусской катастрофы 1908 г. (по Абрамов и др., 2003)

Fig. 1. Study site and geographical position of Lake Suzdalevo. Dashed line indicates the estimated boundary of the Tunguska 1908 fire (Abramov et al., 2003)

транспортировали в лабораторию, где разрезали вдоль вертикальной оси, фотографировали с миллиметровой линейкой и разделяли на поперечные образцы (слайсы) с шагом 1 см. Слайсы помещали в герметичные полиэтиленовые пакеты с выдавленным воздухом и хранили до обработки в темноте при температуре – 20 °С.

Донные отложения представляли собой темно-коричневый (бурый) однородный полужидкий ил с мелкими остатками растений. Отложения гомогенны, без видимых слоистых структур. В самой нижней части керна, глубже 65–70 см, ил был более плотный, количество растительных остатков снизилось. В самых нижних двух сантиметрах керна появляется песок.

Датировка донных отложений

В настоящем исследовании мы использовали оценку возраста, сделанную Кавковой с соавторами на основе измерений активности изотопов ^{137}Cs , ^{210}Pb для керна глубиной 46 см, отобранного в этой же части озера в мае 2019 г. (Kavková et al., 2022). Поскольку литологическое описание и методы отбора нашего керна и керна вышеупомянутых авторов совпадают, мы полагаем, что датировка Кавковой с соавторами применима и к нашему керну.

В работе Кавковой с соавторами (2022) предложены три возрастные модели, значительно отличающиеся друг от друга. Для иллюстрации наших результатов мы выбрали наиболее простую модель (CFCS, Constant Flux Constant Supply), использующую постоянную скорость осадконакопления 2,88 мм год⁻¹ (Kavková et al., 2022). Поскольку наш керн длиннее на 30 см, в слоях нашего керна глубже 46 см мы оценивали возраст, исходя из этих же значений скорости осадконакопления. Таким образом, исследуемый нами

керн охватывает возрастной диапазон около 260 лет (2019–1760 гг н.э.). Применение двух других возрастных моделей с непостоянной скоростью осадконакопления к нашим результатам не повлияло на выводы нашей работы (см. Обсуждение).

Анализ угольных частиц

Анализ угольных частиц проводили по методикам, описанным в работах (Unkelbach et al., 2018; Anderson, Wahl, 2016). Известный объем влажных донных отложений помещали в центрифужную пробирку с дефлокулирующим раствором (6 % гексаметафосфат натрия). 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 состояние частиц не менялось. Подсчет угольков проводили в камере Богорова 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, а также сравнивались с опубликованными фотографиями типичных форм (Mustaphi, Pisaric, 2014; Unkelbach et al., 2018). Анализ частиц проводили с шагом в 1 см по всему керну.

Количественный анализ проводили с помощью программы 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 $\text{см}^2 \text{год}^{-1}$) рассчитывается умножением концентрации угольков в образце (частиц см^{-3}) на скорость осадконакопления ($\text{см} \text{год}^{-1}$). Полученный ряд данных (CHAR) интерполируется через равные промежутки времени, затем выделяется фоновый уровень (Cbackground), который отражает усредненную интенсивность горения в регионе, а также процессы переотложения и привноса материала смывом с территории водосбора (Higuera et al., 2009).

Результаты

В исследованных образцах мы распознали частицы двух основных морфотипов. К первому типу (Группа 1) принадлежали плоские частицы различной неправильной формы, среди которых встречались как сплошные, так и пористые (рис. 2 А, Б). Данный тип частиц соответствует морфотипу А по классификации Мустафи с соавторами (Mustaphi, Pisaric, 2014) и интерпретируется как остатки сгоревших листьев деревьев, листьев злаков, в некоторых случаях – коры деревьев и древесины (Mustaphi, Pisaric, 2014; Unkelbach et al., 2018).

Ко второму типу (Группа 2) принадлежали продолговатые частицы в виде тонких па-

лочек или иголок (рис. 2 В), соответствующие морфотипам С и D по той же классификации. Эти частицы интерпретируются как остатки сгоревших травянистых растений, хвои, а также части сгоревших листьев (Mustaphi, Pisaric, 2014; Unkelbach et al., 2018).

Динамика обоих типов частиц характеризовалась заметной неоднородностью (рис. 3). В глубинных слоях, соответствующих периоду 1750–1850 гг., скорость аккумуляции частиц первого типа была относительно высокой, тогда как после 1850 г. снизилась и оставалась на низком уровне вплоть до верхней границы отложений (рис. 3). Аналогичную динамику демонстрировали и частицы второго типа. Скорость их аккумуляции была также заметно выше в слоях старше 1820 г., затем резко снизилась и оставалась низкой на протяжении всего керна вплоть до границы вода-отложения (рис. 3). В средней части керна, соответствующей концу XIX – началу XX в., в некоторых образцах частицы второго типа вообще отсутствовали. В слоях, соответствующих 1908 г., явных аномалий содержания частиц обоих типов не было обнаружено (рис. 3). Согласно второй возрастной модели (CIC, Constant Initial Concentration), предложенной в статье Кавковой с соавторами (Kavková et al., 2022), положение слоя 1908 г. должно быть глубже на 1–2 см, тогда как согласно третьей модели (CRS, Constant

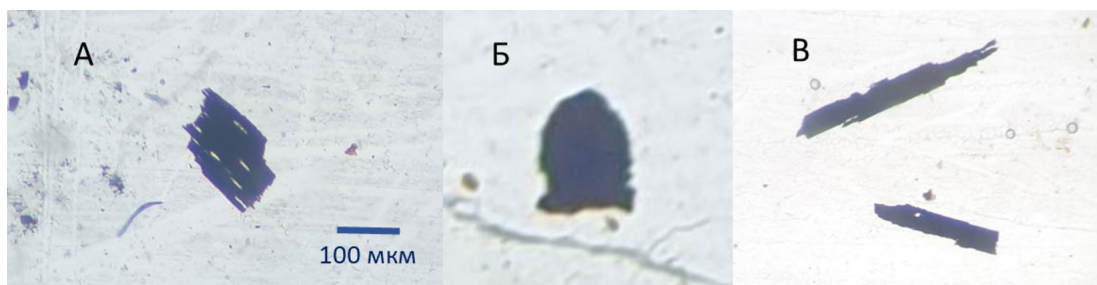


Рис. 2. Типичные формы угольных частиц, обнаруженные в донных отложениях озера Суздалево

Fig. 2. Typical forms of charcoal particles from Lake Suzdalevo sediments

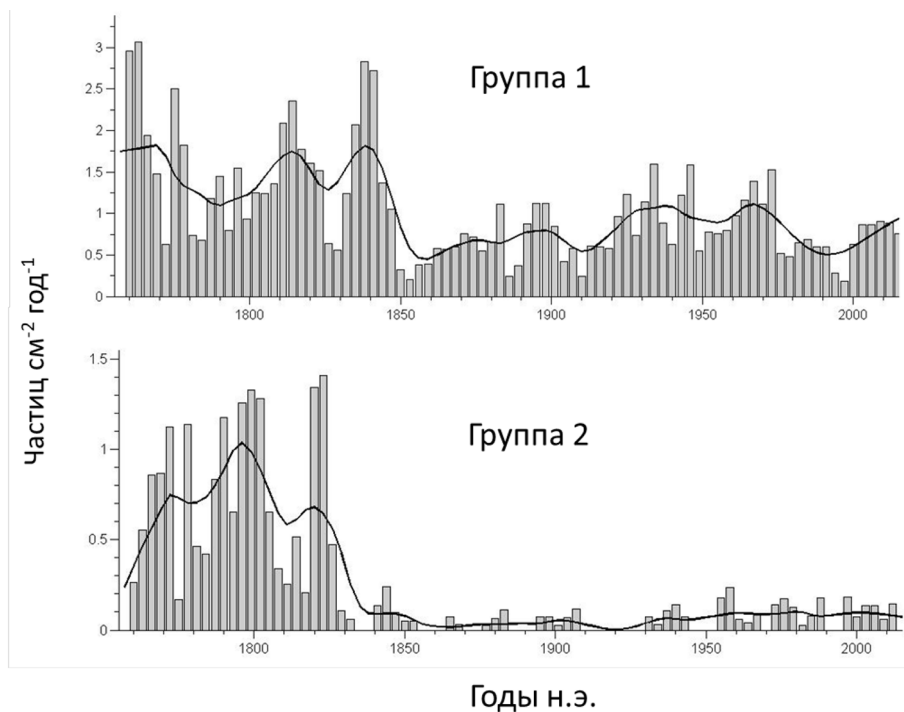


Рис. 3 Динамика аккумуляции угольных макрочастиц в донных отложениях озера Суздалево. Интерполяция через 3 года

Fig. 3. Dynamics of charcoal accumulation rate in bottom sediments of Lake Suzdalevo. Interpolated by 3 years

Rate of Supply) этот слой должен располагаться на 5 см выше (на рисунках не показано). В обоих случаях в слоях на соответствующих глубинах никаких явных пиков аккумуляции угольных частиц не наблюдается.

Обсуждение

По данным Абрамова с соавторами (2003), южная граница распространения обширного пожара, возникшего в момент Тунгусской катастрофы 1908 г., оцененная по наличию пожарных подсушин в структуре древесных колец на срезах деревьев, проходит недалеко от озера Суздалево, либо даже включает в себя это озеро (Абрамов и др., 2003) (рис. 1). Тем не менее следов сильного пожара в виде повышенного содержания угольных макрочастиц в донных отложениях мы не обнаружили. Аналогичный результат был получен нами

и для глубокого озера Заповедное (Rogozin et al., 2022), которое расположено еще дальше от предполагаемой границы пожара 1908 г., примерно в 30 км к юго-западу от оз. Суздалево (рис. 1). Однако в озере Чеко, расположенном рядом с эпицентром Тунгусского взрыва (рис. 1), нами была выявлена незначительная аномалия содержания угольных макрочастиц в слоях, примерно соответствующих 1908 г. (Rogozin et al., 2022). Другими исследователями озера Чеко также был обнаружен слой с аномальным содержанием угольных частиц размером свыше 500 мкм в отложениях на глубине около 50 см (Gasperini et al., 2009). Авторы интерпретировали это как след крупного пожара, однако не отождествляли данный слой с Тунгусской катастрофой 1908 г., поскольку, согласно их датировке, данный слой соответствовал примерно 1950–1960 гг.

(Gasperini et al., 2009). Однако, согласно нашей датировке, которую мы считаем более корректной (Rogozin et al., 2017), данный слой в оз. Чеко достаточно хорошо соответствует 1908 г. (Rogozin et al., 2022).

Отсутствие следов пожара 1908 г. в озере Суздалево, возможно, объясняется тем, что направление ветра в момент катастрофы не благоприятствовало распространению угольных частиц в сторону озера. Однако оценка азимутов пожарных подсушин на срезах деревьев свидетельствует, что во время пожара 1908 г. дул преимущественно северный ветер (Абрамов и др., 2003). В таком случае в озеро должны были попадать частицы от этого пожара. Причина отсутствия следов аномального пожара 1908 г. в отложениях оз. Суздалево пока не ясна. Возможно, оценка границ пожара и направления ветра также не являются достаточно точными.

Нами не было выявлено заметного увеличения скорости накопления угольных частиц в современный период, которое достаточно часто наблюдается в озерах других регионов в последнее столетие (Marlon, 2020), в том числе и в Сибири (Feurdean et al., 2020; Novenko et al., 2022; Rogozin et al., 2023a, b), и обусловлено человеческой деятельностью. Территория в окрестностях озера Суздалево является незаселенной, здесь никогда не велась вырубка леса, охотничий и рыболовный промысел также не ведется, поскольку данная территория является заповедной. Этим, по-видимому, объясняется отсутствие признаков современного увеличения потока угольных частиц в озерные отложения. Аналогичный результат был получен нами для двух других озер данного региона – Заповедное и Чеко, которые также находятся на труднодоступной незаселенной территории (рис. 1), практически не подверженной хозяйственной деятельности человека (Rogozin et al., 2022).

Причины увеличения скорости аккумуляции углистых частиц в слоях озера глубже 50 см (древнее 1850 г., рис. 3) (в особенности – частиц Группы 2) остаются неизвестными. Возможно, интерпретацию можно будет дать на основе анализа других палеоиндикаторов, анализ которых делается нами в настоящее время. Наличие следов песка в самых нижних слоях керна, а также незначительное уплотнение отложений свидетельствуют об изменениях характеристик озера. Предположительно, данное озеро имеет термокарстовое происхождение (Kavková et al., 2022), поэтому его глубина, следовательно, и скорость осадконакопления, могли быть меньше в тот период. Кавковой с соавторами в керне оз. Суздалево проводились исследования нескольких палеоиндикаторов, а именно: элементного состава, магнитных свойств, диатомей и останков водных беспозвоночных (Kavková et al., 2022), однако никаких неоднородностей в нижних слоях не было обнаружено. Однако слишком малая длина этого керна (46 см) не позволяет использовать его для объяснения неоднородностей, обнаруженных в нашем керне на глубине более 50 см.

Заключение

В данной работе нам не удалось выявить след сильного пожара Тунгусской катастрофы 1908 г. в отложениях озера Суздалево, несмотря на то, что оно расположено на предполагаемой границе территории, охваченной этим пожаром. Тем самым мы добавили еще один интересный факт в массив данных о Тунгусской катастрофе 1908 г. и ее последствиях. Вместе с тем наши исследования подтвердили, что в данном регионе в современный период отсутствует увеличение скорости аккумуляции угольных макрочастиц, характерное для ряда других регионов и обусловленное

влиянием человека на увеличение количества природных пожаров. Выявлено резкое увеличение скорости аккумуляции угольных частиц в отложениях возрастом ориентировочно старше 1850 г., для выяснения причин этого явления требуются дальнейшие исследова-

ния с использованием других палеоиндикаторов, а также исследование более длинных кернов. Полученные сведения будут полезны для реконструкции пожарных режимов голоцена и прогноза пожарных обстановок при различных климатических сценариях.

Список литературы / References

Абрамов Н. Г., Аркаев Е. А., Русских А. Г. (2003) Исследование пожара 1908 года в районе падения Тунгусского метеорита. *Тунгусский заповедник. Биоценозы северной тайги и влияние на них экстремальных природных факторов. Труды ГПЗ «Тунгусский». Выпуск 1.* Томск, Издательство Томского университета, с. 275–288 [Abramov N. G., Arkaev E. A., Russkikh A. G. (2003) Study of the 1908 fire in the area where the Tunguska meteorite fell. *Tunguska Nature Reserve. Biocenoses of the northern taiga and extreme natural impacts on them. Proceedings of the Tunguska State Nature Reserve. Issue 1.* Tomsk, Tomsk University, p. 275–288 (in Russian)]

Васильев Н. В., Львов Ю. А. (2003) Программа научных работ в Государственном природном заповеднике «Тунгусский» 2000–2020 гг (проект). *Тунгусский заповедник. Биоценозы северной тайги и влияние на них экстремальных природных факторов. Труды ГПЗ «Тунгусский». Выпуск 1.* Томск, Издательство Томского университета, с. 14–32 [Vasiliev N. V., Lvov Yu. A. (2003) Program of scientific research in Tunguska State Nature Reserve 2000–2020 (project). *Tunguska Nature Reserve. Biocenoses of the northern taiga and extreme natural impacts on them. Proceedings of the Tunguska State Nature Reserve. Issue 1.* Tomsk, Tomsk University, p. 14–32 (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

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

Darin A. V., Rogozin D. Yu., Meydus A. V., Babich V. V., Kalugin I. A., Markovich T. I., Rakshun Ya. V., Darin F. A., Sorokoletov D. S., Gogin A. A., Senin R. A., Degermendzhi A. G. (2020) Traces of the Tunguska Event (1908) in sediments of Zapovednoe Lake based on SR–XRF data. *Doklady Earth Sciences*, 492(2): 442–445

Feurdean A., Florescu G., Tanțau I., Vannière 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

Gasperini L., Bonatti E., Albertazzi S., Forlani L., Accorsi C. A., Longo G., Ravaioli M., Alvisi F., Polonia A., Sacchetti F. (2009) Sediments from Lake Cheko (Siberia), a possible impact crater for the 1908 Tunguska Event. *Terra Nova*, 21(6): 489–494

Gladysheva O. (2020) The Tunguska Event. *Icarus*, 348: 113837

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

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

Kavková R., Vondrák D., Chattová B., Svecova E., Takac M., Golias V., Štorc R., Stanghellini C., Kletetschka G. (2022) Suzdalevo Lake (Central Siberia, Russia) – A Tunguska Event-related impact crater? *Frontiers in Earth Science*, 10: 777631

Kirilyanov 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

Kletetschka G., Kavková R., Navrátil T., Takáč M., Prach J., Vondrák D., Stuchlík E., Štorc R., Švecová E., Hořická Z., Klokočník J., Kostecký J., Bezděk A., Rogozin D. Yu., Meydus A., Krivobokov L., Mukhortova L., Darin A. V., Serra R., Stanghellini C., Gladysheva O.G. (2019) New implications for Tunguska explosion based on magnetic, dendrological, and lacustrine records. *Meteoritics and Planetary Science*, 54(S 2). Proceedings of 82nd Annual Meeting of the Meteoritical-Society (MetSoc), Sapporo, Japan, 7–12 July 2019. LPI Contribution No. 2157, ID 6506

Knorre A. A., Kirilyanov 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

Marlon J.R. (2020) What the past can say about the present and future of fire. *Quaternary Research*, 96: 66–87

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. Yu., 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

Rogozin D. Yu., Darin A. V., Kalugin I. A., Melgunov M. S., Meydus A. V., Degermendzhi A. G. (2017) Sedimentation rate in Cheko Lake (Evenkia, Siberia): New evidence on the problem of the 1908 Tunguska Event. *Doklady Earth Sciences*, 476(2): 1226–1228

Rogozin D. Yu., 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

Rogozin D. Yu., Burdin L. A., Bolobanshchikova G.N., Degermendzhy A.G. (2023a) The unprecedented current increase in the amount of charcoal particles in sediments of lakes of the North Minusinsk Basin (southern Siberia): possible evidence of anthropogenic influence. *Doklady Earth Sciences*, 511(2): 748–752

Rogozin D. Yu., Burdin L. A., Bolobanshchikova G. N. (2023b) Macrocharcoal in upper sediments of the lakes of North-Minusinsk Valley (southern Siberia) as a proxy of fires on the surrounding territory. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 16(2): 252–266 (in Russian)

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