

На правах рукописи

Шатунов Антон Евгеньевич

История лесных пожаров в Приенисейской Сибири в голоцене

Специальность 1.6.14 – Геоморфология и палеогеография

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Лаборатории эволюционной географии Отдела палеогеографии четвертичного периода ФГБУН Института географии Российской академии наук

Научный руководитель:

Новенко Елена Юрьевна

доктор географических наук, профессор РАН
г.н.с. Лаборатории эволюционной географии
Отдела палеогеографии четвертичного периода,
Института Географии РАН

Официальные оппоненты:

Янина Тамара Алексеевна

доктор географических наук, заведующая научно-исследовательской лабораторией новейших отложений и палеогеографии плейстоцена, Географического факультета, Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Гренадерова Анна Валентиновна

кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры экологии и природопользования Института экологии и географии Сибирского федерального университета

Ведущая организация:

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской академии наук

Защита состоится «20» ноября 2026 года в 11 час. 00 мин в конференц-зале на заседании диссертационного совета 24.1.049.04. при Институте географии РАН по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный переулоч, д. 29; тел./факс (495) 959-00-33; E-mail: d00204603@igras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института географии РАН и на интернет-сайте <http://igras.ru/4519>

Приглашаем Вас принять участие в обсуждении диссертации на заседании диссертационного совета и присылать отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по указанному адресу секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета, кандидат
географических наук



Белоновская Елена Анатольевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Лесные пожары представляют собой один из важнейших факторов, определяющих структуру, динамику и эволюцию ландшафтов, а также способствующих поддержанию биоразнообразия (Bond et al., 2005; Pausas, Keeley, 2009). Пирогенный фактор выступает ключевым в функционировании лесных сообществ, определяя постпирогенные сукцессии на обширных территориях (Фурьев, 1996). Информация о палеопожарах позволяет реконструировать климатические обстановки прошлого и оценивать реакцию экосистем на климатические флуктуации (Whitlock, Bartlein, 2003; Sayedi et al., 2024). Анализ долгопериодных изменений пожарного режима в голоцене имеет не только фундаментальное, но и прикладное значение. Понимание долгосрочной динамики пожаров необходимо для разработки эффективных стратегий управления лесными (Finsinger et al., 2017; Słowiński et al., 2019) и болотными экосистемами (Kotze, 2013; Feurdean et al., 2022).

Особую актуальность подобные исследования приобретают для территории Средней Сибири. Современная пожарная обстановка в регионе характеризуется крайне высокими показателями: за период с 1999 по 2019 гг. здесь зафиксировано 325 000 пожаров на площади порядка 200 млн га (Kharuk et al., 2021). Непосредственно в Красноярском крае за последние 6 лет (2019–2024 гг.) общая площадь территорий, пройденных огнем, составила более 3.2 млн га (Рослесхоз, 2026). Наблюдается рост числа верховых пожаров и увеличение эмиссии парниковых газов, причем на долю Средней Сибири приходится около 20% общероссийских выбросов от них (Ponomarev et al., 2023).

Несмотря на высокую значимость изучения пожаров в голоцене для палеоклиматических реконструкций, история лесных пожаров на территории Средней Сибири, в особенности в её западной Приенисейской части, изучена недостаточно. Имеющиеся данные фрагментарны, немногочисленны и охватывают, как правило, лишь последние 3000–2000 лет, концентрируясь преимущественно в районе плато Путорана (Харук и др., 2005; Novenko et al., 2022) и в бассейне р. Подкаменной Тунгуски (Рогозин и др., 2022). Это определяет необходимость проведения комплексных исследований для восполнения существующего пробела в палеогеографических знаниях.

Цель исследования – реконструкция динамики лесных пожаров в Приенисейской Сибири в голоцене и выявление основных факторов, ее определяющих.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработать и валидировать метод автоматического подсчета макрочастиц угля в торфяных и озерных отложениях для ускорения и повышения эффективности обработки большого количества образцов.
2. Реконструировать хронологию пожарной активности, выявить периоды ее роста и спада, а также определить общие и специфические черты пожарных режимов для разных частей Приенисейской Сибири в сравнении с сопредельными территориями.
3. Выявить и проанализировать комплекс природных и антропогенных факторов, определяющих долговременную динамику пожаров в Приенисейской Сибири.

Объект и предмет исследования. *Объектом* исследования выступают голоценовые отложения болот Приенисейской Сибири. *Предметом* исследования стали содержание и характеристики макроскопических частиц угля, как индикатора пожарной активности, свойства торфа (потери при прокаливании, гумификация), а также связь пожарных режимов с динамикой климата и растительности.

Фактический материал и личный вклад автора. В основу диссертации положены материалы, полученные в ходе полевых работ на четырех ключевых участках в Приенисейской Сибири, расположенных в окрестностях населенных пунктов Туруханск, Тура, Ванавара и Игарка, в которых автор принимал личное участие. Всего было детально изучено 11 разрезов, что позволило получить непрерывные записи скоростей аккумуляции макрочастиц угля за последние 8000 кал. л. н. (калиброванных лет назад). Автором лично выполнены камеральная обработка, интерпретация полученных данных, включая статистический анализ. Диссертантом лично были выполнены подсчет микрочастиц угля автоматическим методом для 1910 образцов, ручным для 311, анализ, анализ гумификации торфа для 65 образцов, анализ потерь при прокаливании для 154 образцов, анализ ботанического состава торфа под руководством к.б.н. Н.Г. Мазей для 463 образцов. Остальные данные для анализа были предоставлены коллегами, которым автор

глубоко признателен. Надёжная хроностратиграфическая основа реконструкций обеспечена 88 радиоуглеродными датами. Анализ и обобщение всего материала выполнены лично автором.

Методология и методика. Методологической основой работы послужили принципы сравнительно-географического и системного анализа. Для решения поставленных задач применялся комплекс стандартных методов палеогеографических исследований. Основным методом получения первичных данных являлся макроскопический антракологический анализ (подсчет частиц угля размером >100–150 мкм). Значительная часть работы посвящена разработке и апробации нового метода автоматического подсчета макрочастиц угля на основе анализа изображений, что позволило существенно увеличить объем обрабатываемого материала. Помимо этого, использовались традиционные методы изучения торфяных отложений: определение потерь при прокаливании, анализ степени гумификации. Хронология событий устанавливалась на основе радиоуглеродного датирования (AMS-метод) с последующей калибровкой дат с использованием шкалы IntCal20 (Reimer et al., 2020) в Bacon версия 2.3.9.1 в программной среде R (Blaauw, Christen, 2011). Статистическая обработка данных выполнялась на языках Python и R с применением соответствующих пакетов.

Выбор ключевых участков (Туруханск, Тура, Ванавара, Игарка) обусловлен необходимостью охвата различных природных зон и подзон Приенисейской Сибири (от средней тайги до лесотундры) для выявления пространственно-временных закономерностей динамики пожаров. Исследования проводились в пределах Эвенкийского и Туруханского районов Красноярского края, в бассейнах рек Енисей, Нижняя Тунгуска (участок Тура) и Подкаменная Тунгуска (участок Ванавара). Участок в районе Туры расположен в подзоне северной тайги, Ванавара – в средней тайге в бассейне Подкаменной Тунгуски, тогда как Туруханск и Игарка характеризуют подзоны северной тайги и лесотундры на правом берегу Енисея, что позволило охватить широкий спектр ландшафтов.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Разработан и валидирован новый автоматизированный метод подсчета макрочастиц угля, позволяющий значительно ускорить процесс анализа

макрочастиц угля в отложениях и получать дополнительную информацию о морфологии частиц.

2. Впервые для обширной территории Приенисейской Сибири создана непрерывная и детально датированная реконструкция пожарных режимов на протяжении большей части голоцена (последние 8000 лет), устраняющая существовавший ранее пробел.
3. Выявлены основные этапы и региональные особенности динамики пожаров, а также установлена их связь с климатическими изменениями. Выявлено, что повышение частоты пожаров и рост скорости аккумуляции макрочастиц угля приходится на периоды 7700-5700, 5100-4200, 2000-1000 кал. л. н. (калиброванных лет назад) и в течение последних 500 лет.
4. Выделены выраженные региональные различия в параметрах пожарного режима. Максимальные значения частоты пожаров и скоростей накопления макрочастиц угля приходятся на ключевой участок Тура (Центральная Эвенкия), для которого, кроме того, установлен дополнительный этап усиления пожарной активности в интервале 3700–2700 кал. л. н., не отмеченный на других изученных участках.

Научная и практическая значимость. Выявленные закономерности пожарного режима могут быть учтены при построении долгосрочных прогнозов пожарных рисков в условиях меняющегося климата. Материалы диссертации могут использоваться в учебном процессе в курсах «Палеогеография» и «Ландшафтоведение». Разработанный метод автоматического подсчета макроуглей может быть использован в лабораторной практике для ускорения обработки образцов при палеогеографических и георхеологических исследованиях.

Основные защищаемые положения:

1. В Приенисейской Сибири выявлены четыре интервала роста пожарной активности в голоцене (7700–5700, 5000–4200, 2000–1000 кал. л. н. и с 500 кал. л. н. до настоящего времени), разделенные фазами резкого ослабления пожаров. Установлено, что изменения пожарной активности обусловлены климатическими колебаниями: росту пожаров способствовали потепление и снижение увлажненности климата, а ослаблению – похолодание и увеличение количества осадков.

2. Долгопериодные изменения пожарных режимов в Приенисейской Сибири в голоцене демонстрируют согласованность с соседними регионами (Западная Сибирь, Якутия) и частичное совпадение по времени с некоторыми районами Европы, что свидетельствует о влиянии крупномасштабных атмосферных процессов на пожарные режимы континентальных районов Евразии.
3. Разработанный автоматический метод подсчета макрочастиц угля в торфе и озерных отложениях на основе анализа изображений обеспечивает существенное ускорение обработки при приемлемой точности и позволяет получать морфометрические характеристики углей для дифференциации травяных и древесных морфотипов.

Степень достоверности результатов обеспечивается репрезентативностью фактического материала: проведён количественный анализ макрочастиц угля в 2878 образцах торфа из 11 разрезов с применением ручного и автоматического методов подсчёта. В работе использованы результаты анализа потерь при прокаливании (1425 образцов), определения гумификации торфа (631 образец) и ботанического состава торфа (более 500 образцов). Хронологическая основа построена на сериях из 88 радиоуглеродных дат с использованием Байесовского подхода (Bacon) для создания возрастных моделей, а также на корректном применении статистических методов анализа и сопоставлении полученных результатов с опубликованными данными по сопредельным территориям.

Апробация и публикация результатов работы. По теме диссертации опубликовано 6 статей в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science, RSCI, в том числе 3 на английском языке, а также 10 работ в сборниках материалов конференций.

Результаты работы были доложены и обсуждены на всероссийских и международных конференциях, а также на семинарах Института географии РАН. Доклады сделаны в рамках: VII Всероссийской конференции с международным участием «Динамика экосистем в голоцене» (Пермь, 2025), XVI Всероссийской палинологической конференции, посвящённой 145-летию В.Н. Сукачёва (Москва, 2025), Всероссийской конференции с международным участием «Марковские чтения 2025 года» (Москва, 2025), международной конференции PAGES 2025 7th Open Science Meeting (Шанхай, 2025), VI Международной конференции

«Палеолимнология Северной Евразии 2024» (Красноярск, 2024), X Международного симпозиума «Степи Северной Евразии» (Оренбург, 2024), XV Всероссийской молодежной научной школы-конференции «Меридиан» (Москва, 2023), I Всероссийского форума «GeoExpedition» (Москва, 2022), VI Всероссийской научной конференции с международным участием «Динамика экосистем в голоцене» (Санкт-Петербург, 2022).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Основной текст изложен на 157 страницах, включает 74 рисунка и 9 таблиц. Список литературы содержит 204 наименований, в том числе 153 – на иностранных языках.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю д.г.н. Е.Ю. Новенко за помощь и поддержку на всех этапах работы. Автор глубоко признателен к.б.н. Н. Г. Мазей за обучение методам лабораторных исследований и помощь в освоении ботанического состава торфа, Д.А. Куприянову – за помощь в освоении метода и предоставление данных по разрезам болота Игарка. Автор благодарит к.г.н. О.В. Руденко и К.А. Бородину за предоставленные данные спорово-пыльцевого анализа, а также Р.А. Андреева и Е.А. Макарову – за содействие в проведении анализов потерь при прокаливании и гумификации торфа. Автор искренне благодарен д.г.н. О.К. Борисовой, к.г.н. С.В. Харченко и к.б.н. А.С. Прокушкину за ценные замечания к работе.

Автор выражает признательность коллективу кафедры физической географии и ландшафтоведения географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и отдела четвертичной палеогеографии ИГ РАН за формирование комплексного научного подхода. Отдельная благодарность адресована всем участникам полевых работ и коллегам, чье содействие сделало возможным выполнение настоящего исследования. Автор также признателен родным и близким за неизменную моральную поддержку на протяжении всей работы.

Работа выполнена в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Глобальные климатические вызовы на территории России: ретроспективный анализ, прогноз и механизмы адаптации» (Соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Метод реконструкции палеопожаров на основе анализа макроскопических частиц угля в болотных и озерных отложениях.

Метод ведёт отсчёт с 1941 г., когда Й. Иверсен (Iversen, 1941) впервые связал изменения в спорово-пыльцевых спектрах болот Дании с присутствием угольных частиц и обосновал использование последних для реконструкции подсечно-огневого земледелия. В 1950-1960-е гг. были сформулированы базовые подходы к анализу угольных частиц: в рамках первого подхода исследователи предлагали учитывать только общее количество частиц (Davis, 1967), в рамках второго – измерять площадь угольков и разделять их на размерные классы (Waddington, 1969). Уже тогда обозначились две линии интерпретации результатов: связь углей с антропогенной деятельностью (Davis, 1967; Hutchinson et. al., 1966) и с климатическими изменениями (Waddington, 1969).

В 1970–1990-е гг. основное внимание исследователей было сосредоточено на изучении механизмов переноса угольных частиц. В работах (Clark, 1983; Blong, Gillespie, 1978; Patterson et. al., 1987) были детально исследованы воздушный и водный перенос, установлено, что крупные частицы оседают вблизи источника (первые километры), тогда как мелкие могут распространяться на десятки и сотни километров. В этот же период была предложена химическая обработка образцов для дифференциации угля от других темных частиц (Singh et. al., 1981), а Tallis (1975) впервые разделил угли на микро- и макроскопические, что легло в основу последующих реконструкций. К концу этапа сложилось представление, что макроуголь (размером $>100\text{--}150$ мкм) отражает локальные и экстралокальные пожары, а микроуголь – региональный фон.

В 1990–2010-е гг. исследования были направлены на уточнение дальности переноса и создание количественных методов выделения пожарных событий. Натурные наблюдения после пожаров в Йеллоустоне (Whitlock, Millspragh, 1996) и на Каскадном хребте в Северной Америке (Whitlock, Larsen, 2001), а также численное моделирование (Clark, Patterson, 1997) подтвердили, что частицы размером >125 мкм преимущественно связаны с пожарами в радиусе 5–20 км. В 1998 г. К. Лонг с соавторами (Long et. al., 1998) предложил разделять временной ряд скорости накопления угля (CHAR – Charcoal accumulation Rates) на фоновую и

пиковую составляющие, что позволило количественно выделять пожарные события. Этот подход был реализован в программе CharAnalysis (Higuera, 2009), ставшей стандартным инструментом реконструкций палеопожаров.

Современный этап (2010-е гг. – настоящее время) характеризуется окончательным разделением методик пробоподготовки для микро- и макроуглей (Mooney, Tinner, 2011) и активным внедрением цифровых технологий. Анализ изображений (Feurdean et. al., 2021; Snitker, 2020) и нейросетевые алгоритмы (Rehn, Rehn, 2019) позволяют не только ускорить подсчёт, но и определять морфометрические характеристики частиц для дифференциации сгоревшей биомассы (травяные или древесные угли). Несмотря на применение анализа изображений, методы, описанные в публикациях – трудоемки и требуют больших вычислительных ресурсов. В то же время дискуссионным остаётся вопрос о дальности переноса: обобщающие работы (Adolf et. al., 2018; Vachula, 2020) показывают, что даже крупные частицы (до 500–600 мкм) могут перемещаться на 40–50 км, и для уверенной локализации пожара необходимы дополнительные критерии (например, наличие мегауглей >500 мкм, данные о нарушении растительности и др.).

Глава 2. Физико-географическая характеристика и история освоения территории исследования

В главе дана подробная физико-географическая характеристика территории исследования, приведены данные о современных пожарных режимах ключевых участков и рассмотрена история освоения региона.

Район исследований охватывает Енисейское правобережье Западной Сибири и Среднесибирское плоскогорье. Изучение проведено на четырёх ключевых участках, расположенных вблизи населённых пунктов Игарка, Туруханск, Тура и Ванавара (рис. 1); в работе ключевые участки именовются по названиям этих населённых пунктов. Ключевые участки Игарка и Туруханск расположены на Западно-Сибирской равнине, Верхнетазовская ландшафтная провинция, высоты 20–50 м н.у.м. (над уровнем моря), а Тура и Ванавара – в пределах Среднесибирского плоскогорья, Тунгусская ландшафтная провинция, до 550 м н.у.м. (Гвоздецкий, Михайлов, 1978).

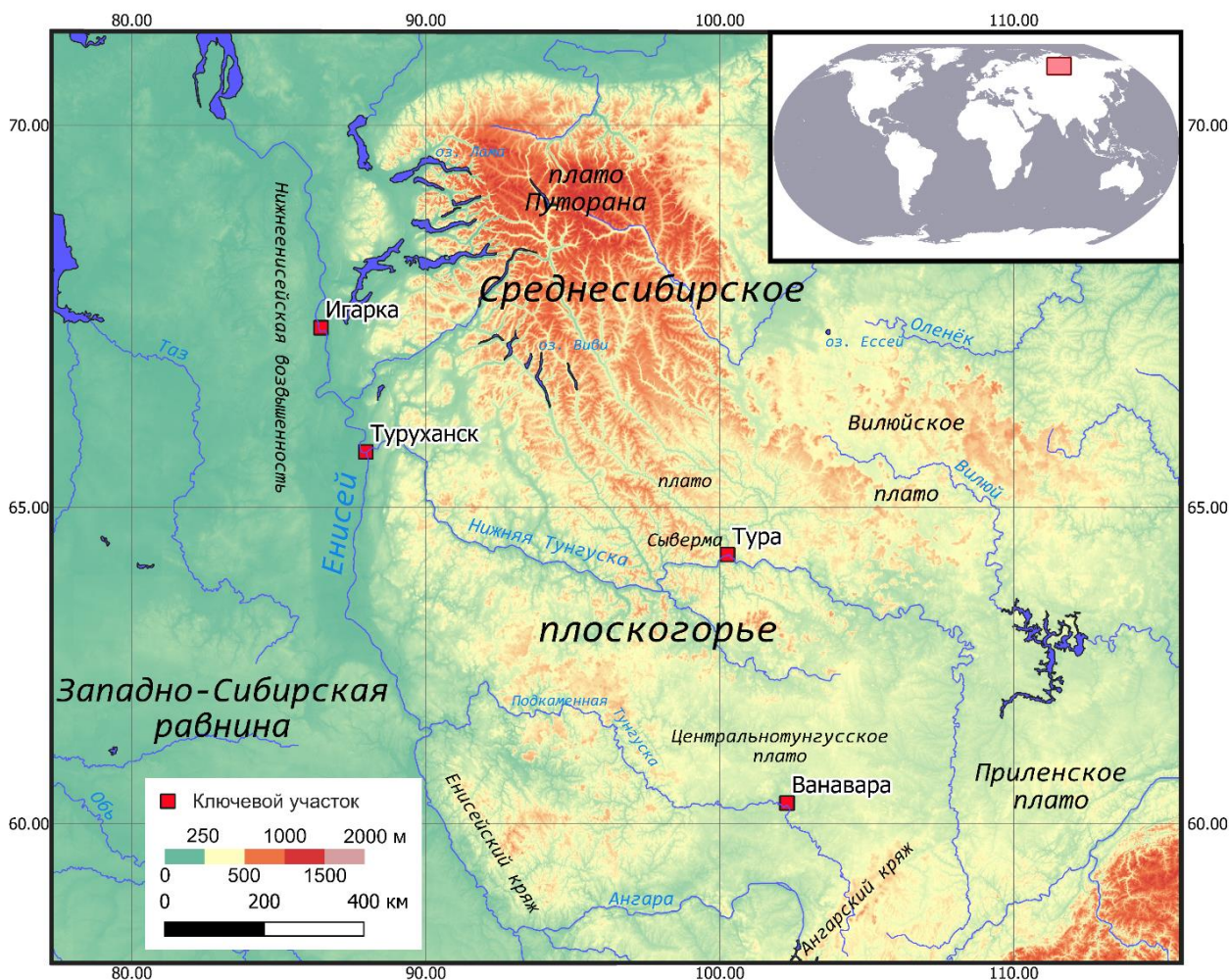


Рисунок 1. Положение ключевых участков исследования в районе населенных пунктов Игарка, Туруханск, Тура, Ванавара

Климат изучаемой территории умеренный от континентального до резко континентального: среднегодовое количество осадков уменьшается с запада на восток (от 630 до 377 мм), среднегодовая температура – от $-5,3$ до $-7,8$ °С. Тип распространения многолетней мерзлоты варьирует от сплошного (район Туры) до островного (районы Туруханска и Ванавары). В растительном покрове Приенисейской Сибири повсеместно преобладают лиственничные леса. На севере (Игарка) они формируют лесотундровые редколесья, в северной тайге (Туруханск) лиственнично-елово-кедровые леса (хотя значительные площади на ключевом участке заняты вторичными берёзовыми лесами). В горной части (Тура) распространены горнотаёжные лиственничные леса, а в средней тайге (Ванавара) – смешанные лиственнично-сосновые леса.

Пожарный режим лиственничных лесов характеризуется межпожарными интервалами от 80–90 лет на широте 60° с.ш. до более 200 лет у полярного круга

(Харук, Пономарев, 2017). Преобладают низовые пожары в июне–июле (Иванов, Иванова, 2020). За последние десятилетия наибольшая частота пожаров отмечена в Ванаваре, наименьшая – в Игарке (Dvornikov et. al., 2022), что согласуется с распределением грозовой активности (Разуваев и др., 2020).

Освоение региона началось в IV тыс. до н.э. (самодийцы), в XII–XIII вв. пришли тунгусы (Макаров, 2013). Русское освоение – с XVII в. (основание Мангазеи в 1601 г., затем Туруханска) (Гайдин, Бурмакина, 2022). Интенсивное антропогенное воздействие на ландшафты началось с 1930-х гг. (Материалы приполярной переписи..., 1928; Середкина, 2023; Бураева, Бураева, 2020).

Глава 3. Методы исследования

Основным методом реконструкции пожарных режимов выступает анализ макрочастиц угля (размером >125 мкм) в отложениях. Для подготовки проб для анализа образцы торфа объёмом 1 см^3 выдерживали в 5–6% растворе H_2O_2 в течение 24 ч, промывали через сито с ячейей 125 мкм, перемещали чашку Петри и придавливали прессом и переворачивали, после чего все угольные частицы в образце подсчитывали под биноклем (Mooney, Tinner, 2011). Для выделения пожарных событий полученные данные о концентрации макроуглей в торфе были обработаны с использованием пакета *tapas* (Finsinger, Vonnici, 2022), реализующий алгоритм CharAnalysis (Higuera, 2009): передискретизацию записи, разделение на фоновую и пиковую составляющие, фильтрацию пиков с учётом отношения сигнал/шум ($\text{SNI} > 3$).

В рамках диссертации было выполнено специальное методическое исследование, в результате которого разработан новый метод автоматического подсчёта макрочастиц угля по цифровым изображениям. Алгоритм анализа заключается в следующем. Подготовленная для анализа проба помещается в чашку Петри, разделённую на 6 сегментов красной краской для исключения повторного учёта. При наличии торфа используется специальный пресс с сеткой (ячейя 125 мкм), который прижимает растительные остатки, минимизируя перекрытие угольных частиц. Каждый сегмент фотографируется через бинокляр (увеличение $7.5\times$, разрешение 3456×4608 пикселей). Обработка изображений выполняется в среде R с использованием библиотек *imager*, *EImage*, *spatstat.geom*. После медианной фильтрации (радиус 5 пикселей) изображение обрезается по красной разметке;

границы сегментов выделяются по условию: интенсивность красного канала >115 , зелёного <76 , и зелёный канал в 2.5 раза менее интенсивен, чем красный. Бинаризация проводится по порогу, определённом методом Оцу на основе гистограмм красного и зелёного каналов. Связанные области (частицы) нумеруются, для каждой вычисляются площадь (в пикселях), длина, ширина, радиусы вписанной и описанной окружностей.

Точность метода оценена на специально приготовленных 72 тестовых образцах, первая половина из которых содержала только уголь, во вторую были добавлены растительные остатки. В каждом образце ручным и автоматическим способом было подсчитано количество угольных частиц. Коэффициент корреляции Спирмена между ручным и автоматическим подсчётом количества частиц составил 0.85 ($R^2=0.71$) (рис. 2), средняя абсолютная ошибка (MAPE) – 31,6%. Для образцов без торфа точность выше ($R=0.90$, MAPE=28,7%), для образцов с торфом – ниже ($R=0.77$, MAPE=34,4%), что связано с перекрытием частиц растительными остатками.

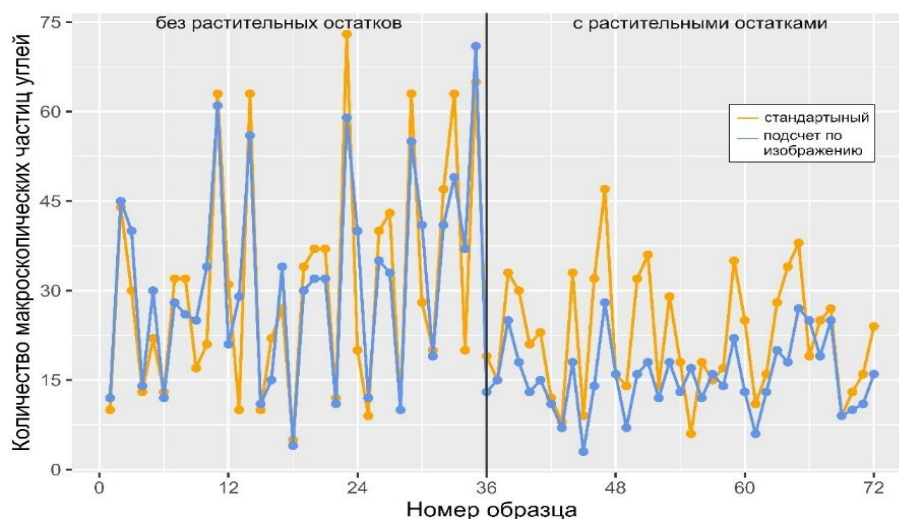


Рисунок 2. Сравнение количества макрокопических частиц угля в тестовых образцах, подсчитанных стандартным методом и по изображению.

Оценка площади частиц показала высокую точность: коэффициент корреляции Пирсона 0.99 ($R^2=0.98$), MAPE=21,5%, причём ошибка снижается с увеличением размера частиц (от 31,9% для мелких до 8,6% для крупных). Время обработки одного образца (6 фотографий) составляет около 4 мин в однопоточном режиме и 2 мин 10 с при параллельных вычислениях, что обеспечивает 5–10-кратное ускорение по сравнению с ручным подсчётом. Автоматический метод позволяет не

только ускорить подсчёт, но и получать морфометрические характеристики частиц, что даёт возможность дифференцировать травяные и древесные угли.

Помимо изучения макроскопических частиц угля в торфе были выполнены определения потерь при прокаливании (ППП) и гумификации торфа по стандартным протоколам (Chambers et. al.,2010). Степень гумификации торфа измерена колориметрическим методом с коррекцией на ППП.

Радиоуглеродное датирование выполнено в ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» ИГ РАН и в Центре ускорительной масс-спектрометрии Института окружающей среды Земли АН КНР (Сиань). Калибровка дат проведена в программе Calib 8.20, возрастные модели построены с использованием пакета Bacon (Blaauw, Christen, 2011) в среде R.

Статистическая обработка всего массива полученных данных включала корреляционный анализ, расчёт z-оценки (пакет paleofire), анализ главных компонент, выявление цикличности в данных в неравномерных временных рядах с использованием алгоритма REDFIT (Schulz, Mudelsee, 2002), вейвлет-анализ (непрерывное вейвлет-преобразование с вейвлетом Морле, 1000 симуляций Монте-Карло) (Torrence, Compo, 1998).

Глава 4. Результаты исследования и их обсуждение

4.1. Ключевой участок Игарка. На ключевом участке были изучены разрезы трех болот, названных Игарка, Малая Гравийка и Кутузовская тундра. В крупнобугристом болоте Игарка были изучены две скважины, первая из которых заложена на вершинной поверхности мерзлого торфяного бугра (скв. Игарка-2, рис. 3А), отложения которого охватывают временной интервал от 6300 до 1350 кал. л. н. Вторая скважина приурочена к талой мочажине (скв. Игарка-3), возраст вскрытой торфяной залежи соответствует интервалу от 4700 кал. л. н. до настоящего времени. В плоскобугристом болоте Малая Гравийка была изучена скважина, заложённая в талой мочажине. Торфяная залежь и подстилающие ее озерные отложения имеют возраст базального горизонта около 7200 кал. л. н. Во всех изученных объектах макроугли отсутствовали в большей части разрезов, встречаясь лишь в верхних слоях, где их концентрация достигала сотен и тысяч частиц. В последнем крупнобугристом болоте Кутузовская Тундра была изучена скважина. Пробуренная на поверхности из мерзлого торфяного бугра с возрастом торфа от

10000 до 6300 кал. л. н. Макрочастицы угля отсутствовали в большей части скважины, кроме нескольких отдельных образцов с максимальной концентрацией до 8 частиц.

Проведенное исследование позволило выделить пять этапов изменения скорости аккумуляции макрочастиц угля в отложениях (рис. 3 А). Первый этап (6300–5700 кал. л. н.) – высокие скорости аккумуляции угольных частиц (пики >100 частиц/см²×год). Второй этап (5700–4700 кал. л. н.) – прекращение аккумуляции углей. Третий этап (4700–3400 кал. л. н.) – низкие скорости накопления угля (до 1,9 частиц/см²×год), пик около 3500 кал. л. н. Четвёртый этап (3400–600 кал. л. н.) – скорости аккумуляции угольных частиц близки к нулю, лишь единичные пики, вероятно, от удалённых пожаров. Пятый этап (600 кал. л. н. – н. в.) – резкий рост скоростей накопления макрочастиц угля (до 45 частиц/см²×год в болоте Малая Гравийка).

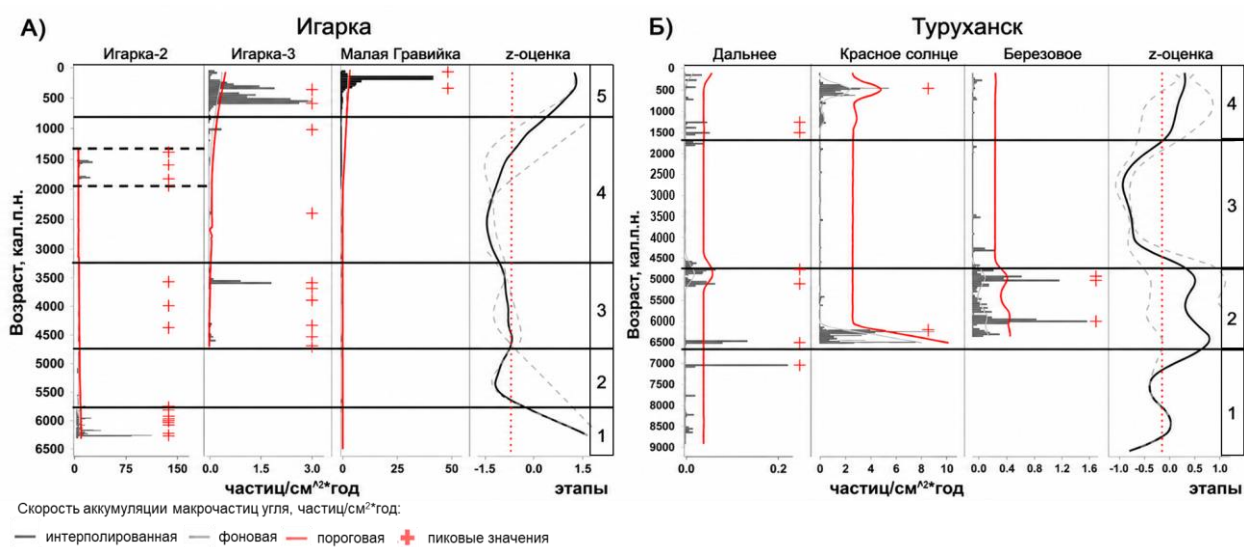


Рисунок 3. Этапы изменения скорости аккумуляции макрочастиц угля в отложениях: А) Скорости аккумуляции макрочастиц угля в торфе для разрезов на ключевом участке Игарка: болота Игарка (Игарка-2, Игарка-3) и Малая Гравийка; Б) Скорости аккумуляции макрочастиц угля в торфе для разрезов на ключевом участке Туруханск: болота Дальнее, Красное Солнце и Берёзовое.

4.2. Ключевой участок Туруханск. На ключевом участке Туруханск было изучено 3 болота, названные в ходе полевых работ Дальнее, Красное солнце и Берёзовое. Все болота талые и находятся на мезотрофной стадии развития. В болоте Дальнее, торфяная залежь которого начала формироваться около 8400 кал. л.н.,

концентрации макроуглей были как правило нулевые с редкими пиками до 10 частиц/см³. Торфяные залежи болот Березовое и Красное Солнце имеют возраст около 6200 и 6400 кал. л. н. соответственно. В обоих болотах наибольшие концентрации макроуглей обнаружены в основании залежей (40-100 частиц/см³ и более), а также в их верхних слоях (от 0-5 частиц/см³ в Березовом до 150 частиц/см³ в Красном Солнце). В разрезе болота березовое выделен пик концентрации макрочастиц угля до 46 частиц/см³ возрастом 4500 кал. л. н.

На основании полученных данных четыре этапа изменений скорости аккумуляции угольных частиц в разрезах (рис. 3 Б). В интервале 8600–6500 кал. л. н. скорости аккумуляции макроуглей ничтожно малы (менее 0,1 частиц/см²×год), пожары отсутствовали. С 6500 до 4500 кал. л. н. зафиксированы максимальные за голоцен скорости аккумуляции (до 8 частиц/см²×год) и наибольшее число пожарных событий (до 8 событий). При этом в интервале 5000–4500 кал. л. н. отмечено кратковременное увеличение привноса макрочастиц только в болотах Дальнее и Березовое, тогда как в болоте Красное солнце угли отсутствуют. С 4500 до 1500 кал. л. н. накопление макрочастиц угля в болотах прекратилась. В последние 1500 лет вновь выделены пики, особенно выраженные в болоте Красное солнце (скорость до 5 частиц/см²×год), что совпадает с приходом русских поселенцев в XVII в.

4.3. Ключевой участок Тура. На ключевом участке было изучено два болота, названные Горное и Нижняя Тунгуска и заболоченный берег небольшого озера на окраине поселка тура (далее оз. Тура). Болото Горное имеет возраст торфяной залежи 8650 кал. л.н. Макроугли представлены во всей скважине, их фоновая концентрация колеблется от единиц до в среднем 15 частиц/см³, пиковые значения не превышают 200 частиц/см³. В Болоте Нижняя Тунгуска в разрезе выделяется перерыв осадконакопления. Нижняя часть разреза охватывает интервал 7600-4500 кал. л. н., пиковые концентрации составляют 40-70 частиц/см³. Верхняя часть разреза имеет возраст 850 кал. л. н. – настоящее время. Пики аккумуляции угольных частиц, как правило, достигают первых десятков частиц, а максимальный 93 частицы/см³. В разрезе заболоченного берега озера Тура были получены данные для временных интервалов 2150-1400 кал. л. н. и последние 600 кал. л.н., разделённых перерывом осадконакопления. В первой части фоновые концентрации изменяются от единичных до первого десятка, пиковые колеблются от 50 до 200 частиц/см³. В

верхней части после хиатуса фоновые концентрации выше – первые десятки частиц, в то время как пиковые 50 до 200 частиц/см³.

Выделено семь этапов изменения скорости аккумуляции макрочастиц в отложениях (рис. 4 А). Первый этап (8600–7700 кал. л. н.) – низкие фоновые скорости (0,1–0,7 частиц/см²×год) без выраженных пиков. Второй этап (7700–4200 кал. л. н.) – возрастание скоростей до 1,5 частиц/см²×год; в интервале 5700–5200 кал. л. н. скорости снижаются до 0,2–0,3 частиц/см²×год.

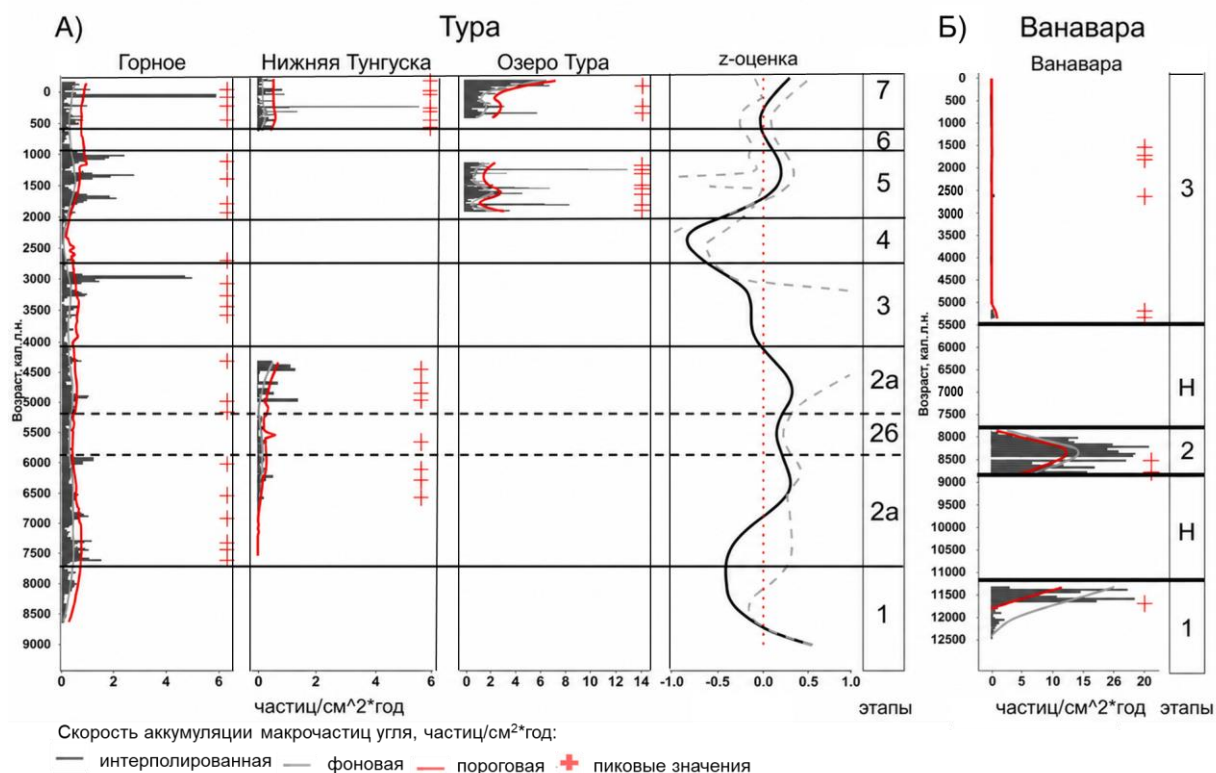


Рисунок 4. Этапы изменения скорости аккумуляции макрочастиц угля в отложениях: А) Скорости аккумуляции макрочастиц угля в торфе на участке тура для разрезов болот Горное, Нижняя Тунгуска и озера Тура; Б) Скорости аккумуляции макрочастиц угля в торфе для разреза Ванавара.

Третий этап (4200–2700 кал. л. н.) – пиковые скорости до 5 частиц/см²×год; на этом этапе выделяются два мощных пика (1 и 5 частиц/см²×год) в интервале 3300–2700 кал. л. н. Четвёртый этап (2700–2000 кал. л. н.) – полное отсутствие пожаров. Пятый этап (2000–1000 кал. л. н.) – рост привноса макрочастиц угля: в болоте Горное до 2–3 частиц/см²×год, в озере Тура до 13 частиц/см²×год (три пика). Шестой этап (1000–500 кал. л. н.) – снижение до фоновых значений (0,1–0,3 частиц/см²×год). Седьмой этап (500 кал. л. н. – н. в.) – новый рост: в болоте Горное пики до 6 частиц/см²×год, в озере Тура до 7 частиц/см²×год.

С помощью вейвлет анализа алгоритма REDFIT (Schulz, Mudelsee, 2002) удалось выявить 1400-лентный цикл по данным скорости аккумуляции макрочастиц угля и гумификации торфа в болоте Горное (P value > 75% и 80% соответственно).

4.4. Ключевой участок Ванавара. На ключевом участке удалось изучить только одно болото, названное Ванавара. Разрез болота содержит два перерыва в осадконакоплении. Первый этап осадконакопления (суглинки, 12600–11300 кал. л. н.) характеризуется концентрациями макроуглей: до 11700 кал. л. н. — десятки частиц (макс. 119 частиц/см³), в интервале 11700–11300 кал. л. н. — сотни, с максимумом 1341 частица/см³. После хиатуса отложения представлены суглинком, сменяющимся гиттией возрастом 8800–7700 кал. л. н. с такими же высокими концентрациями макрочастиц угля. Начало торфонакопления в болоте датируется около 5300 кал. л. н. Торфяная залежь характеризуется нулевыми концентрациями макроуглей, кроме 30 частиц/см³ в интервале 5300–5200 кал. л. н. и 36 частиц/см³ около 2600 кал. л. н.

Выделено три этапа изменений скорости аккумуляции макрочастиц угля в отложениях (рис. 4 Б): 12600–11700 кал. л. н. – низкие скорости (<2 частиц/см²×год); 11700–11300 кал. л. н. – резкий рост до 19 частиц/см²×год; 8700–7700 кал. л. н. – скорости до 17 частиц/см²×год. Начиная с 5300 кал. л. н. и до настоящего времени скорости аккумуляции ничтожно малы (<1 частиц/см²×год), что не соответствует современной высокой частоте пожаров в регионе (Dvornikov et. al., 2022). Однако, результаты анализа макрочастиц угля в отложениях озера Чеко (Рогозин и др., 2022), расположенного в этом же районе, скорости аккумуляции сопоставимы с другими регионами Сибири (до 15 частиц/см²×год в последние 200 лет).

Глава 5. Пожары в Приенисейской Сибири в голоцене

5.1. Особенности пожарного режима Приенисейской Сибири в голоцене.

По данным интегральных z-оценок скоростей аккумуляции макрочастиц угля в голоцене в Приенисейской Сибири выделены пять этапов роста скоростей накопления угля в отложениях, увеличения частоты пожаров и повышенного сгорания биомассы: 11 700–9700 кал. л. н. (только болото Ванавара), 7700–5700, 5000–4200, 2000–1000 кал. л. н. и с 500 кал. л. н. до настоящего времени. Они чередуются с фазами резкого ослабления или полного прекращения пожаров (5700–5000 и 4200–2000 кал. л. н.) (рис. 5). Наибольшие z-оценки и скорости аккумуляции

характерны для участка Тура (Центральная Эвенкия) как наиболее континентального района; в Туруханске и Игарке, расположенных западнее, сигнал ниже, с преобладанием фонового компонента.

Наибольший привнос макрочастиц угля для раннего голоцена зафиксирован в Ванаваре (9200–8700 кал. л. н., до 1000 и более частиц/см³), что согласуется с тенденциями по всему северному полушарию (Sim et al., 2023). Этот пик совпадает с потеплением на севере Западной и Средней Сибири (Andreev et al., 2002; Andreev et al., 2004), а также с началом потепления в Северной Азии в целом (Herzschuh et al., 2023). В Туре скорости аккумуляции угольных частиц в интервале 8700–7700 кал. л. н. не превышают фоновых значений. В Якутии пожары фиксируются с 8300 кал. л. н. с устойчивым нарастанием (Katamura et al., 2009; Glückler et al., 2022); в Западной Сибири значения в целом ниже (Feurdean et al., 2022; Pupysheva, Blyakharchuk, 2024).

В интервале 7700–5700 кал. л. н. региональный сигнал устойчиво положителен. Повышенная пожарная активность обусловлена сочетанием высоких летних температур (Andreev et al., 2002; Nazarova et al., 2013; Klemm et al., 2016; 2004) и пониженной влагообеспеченности. Та, например, данные по спелеотемам из района Красноярска указывают на сухие условия в интервале 7000–6000 кал. л. н. (Columbu et al., 2023), а реконструкция по озёрным отложениям Южной Сибири – на снижение влагообеспеченности с 7000 до 5100 кал. л. н. (Dirksen et al., 2007). Аналогичная картина изменения поступления макроуглей в отложения установлена в Якутии (Katamura et al., 2009; Glückler et al., 2022) и Западной Сибири (Feurdean et al., 2022; Pupysheva, Blyakharchuk, 2024; Ryabogina et al., 2024).

В интервале 5700–5000 кал. л. н. на всех участках зафиксирован период прекращения пожаров. Его длительность составила: 500 лет в Туре, 1000 лет в Туруханске и до 2000 лет в Игарке (в Ванаваре из-за неполноты данных интервал не выявлен). Различия в длительности, возможно, связаны со степенью континентальности климата. Увеличение межпожарного интервала совпадает с похолоданием и ростом увлажнения: палинологические данные указывают на увеличение осадков в приполярных районах Сибири (Andreev et al., 2002; 2004; Nazarova et al., 2013; Klemm et al., 2016). Реконструкции по спелеотемам из района Красноярска также отражают повышение влажности в 6000–5000 кал. л. н. (Columbu et al., 2023), а по палинологическим данным из Южной Сибири рост увлажнения

начался с 5100 кал. л. н. (Dirksen et al., 2007). Аналогичное снижение пожарной активности в этот период отмечено в Якутии (Katamura et al., 2009; Glückler et al., 2022).

Эпизод активизации пожаров выявлен в интервале 5000–4200 кал. л. н. Затем, в период 4200–2000 кал. л. н. согласно полученным данным, пожарная активность была крайне низкой или пожары отсутствовали на всех участках, кроме Туры. Где установлен интервал роста накопления угля в болотах между 3700 и 2700 кал. л. н. Этот этап совпадает по времени с похолоданием климата после термического максимума голоцена (Andreev et al., 2002; 2004; Nazarova et al., 2013; Klemm et al., 2016). Сходное снижение частоты пожаров зафиксировано также на плато Путорана (Novenko et al., 2022) и в Якутии (Katamura et al., 2009; Glückler et al., 2022).

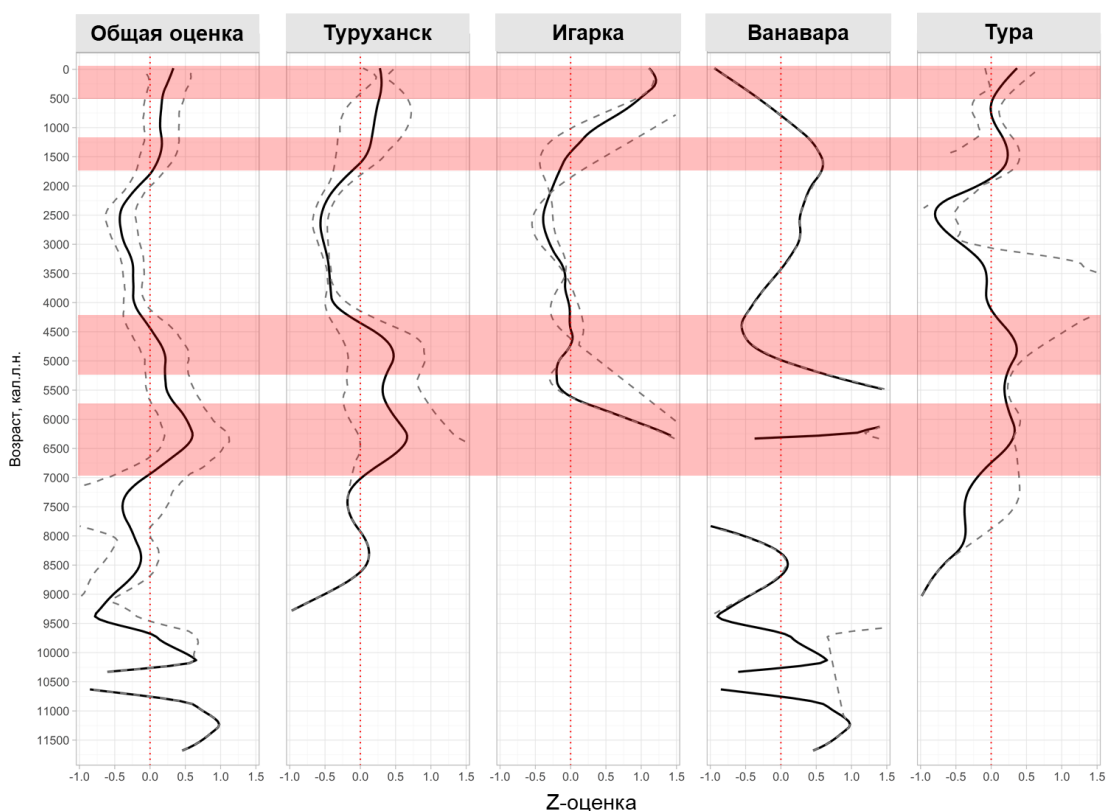


Рисунок 5. Тенденции аккумуляции макрочастиц угля на ключевых участках и в общем по региону на основании z-оценки, с 500-летним сглаживающим окном и 95% доверительными интервалами бутстрапа (500 циклов). Пунктирными линиями указан 95% доверительный интервал. Красными полосами отмечены периоды с наибольшим сгоранием биомассы

В интервале 2000–1000 кал. л. н. выявлен умеренный рост пожарной активности, наиболее выраженный в Туре, совпадающий с потеплением климата

согласно ряду реконструкций (Nazarova et al., 2013; Klemm et al., 2016). Увеличение поступления угля в отложения и рост частоты пожаров в это время установлено на плато Путорана (Novenko et al., 2022) и в Западной Сибири (Feurdean et al., 2022; Pupyshcheva, Blyakharchuk, 2024). В интервале 1000–500 кал. л. н. частота пожаров и привнос марокчастиц угля вновь ослабевали, как на изучаемой территории, так и в сопредельных регионах, например в Якутии (Katamura et al., 2009; Glückler et al., 2022), плато Путорана (Novenko et al., 2022) и Западной Сибири (Feurdean et al., 2022; Pupyshcheva, Blyakharchuk, 2024; Ryabogina et al., 2024).

Начиная с 500 кал. л. н. на всех изученных ключевых участках выявлен устойчивый рост поступления макрочастиц угля. В Туруханске, Игарке и Ванаваре он преимущественно связан, вероятно, с освоением Сибири. В Туре возобновление пожаров около 500 кал. л. н. хорошо согласуется с дендрохронологической реконструкцией (Харук и др., 2005) и опережает приход казаков в регион, что указывает на ведущую роль климатического фактора.

5.2. Сравнение изменения пожарной активности в Приенисейской Сибири в голоцене с Европой и Сибирью.

Для выявления как общих с мировыми тенденциями, так и региональных особенностей динамики пожаров в голоцене был проведён сравнительный анализ, как с сопредельными территориями, так и с отдалёнными регионами. По европейским регионам и Якутии использовались данные Global Charcoal Database (Blarquez et al., 2014); по Западной Сибири были обобщены данные из работ Startsev et al. (2022), Pupyshcheva, Blyakharchuk (2024, 2025), Ryabogina et al. (2024), Трубицына и др. (2025). Принципиальное различие между сибирскими и европейскими z-оценками обусловлено масштабом выборки: европейские кривые, основанные на обширной сети архивов, сглажены, тогда как в Сибири вклад отдельных объектов может создавать резкие амплитудные выбросы.

Якутия и Западная Сибирь наиболее схожи по z-оценке с Приенисейской Сибирью (рис. 6), особенно после 5000 кал. л. н., что отражает общность региональных климатических факторов. Для Западной Сибири характерна выраженное снижение в интервале 7500–5000 кал. л. н., тогда как в Якутии и Приенисейской Сибири в этот период отмечается рост сгораемой биомассы. Европейские регионы отличаются сильнее. Для Центральной и Западной Европы

характерно в общем линейное увеличение значений z-оценки от раннего голоцена к современности.

Особого внимания заслуживает интервал 5700–5100 кал. л. н., когда снижение частоты пожаров и привноса макрочастиц угля в Приенисейской Сибири не совпадает с положительным изменением z-оценки в остальных регионах – то есть ослабление пожаров является специфической региональной особенностью, не имеющей аналогов в соседних и европейских регионах.

Корреляционное сравнение полученных результатов с данными по поступлению угля в отложения в Европе показало, что в Фенноскандии колебания показателей сгораемой биомассы в интервале 9000–4500 кал. л.н. были прямо противоположны наблюдаемым в Приенисейской Сибири, а в последующий период их динамика стала слабо сходной. Напротив, для Средиземноморья характерны преимущественно синхронные изменения до 3000 кал. л.н., хотя в отдельные интервалы (6000–5000, 3000–2000 и 600 кал. л.н.) направленность изменений не совпадала.

Противоположное изменение z-оценки в сравнении с Фенноскандией и схожее с Средиземноморьем требует объяснения, поскольку обе территории значительно удалены от района исследования. Возможным механизмом (скорее всего не единственным) может быть влияние Североатлантического колебания (NAO). Положительная фаза NAO усиливает западный перенос и смещает циклонические траектории к северу, увеличивая увлажнение в Северной Европе и формируя более сухие условия в Средиземноморье (Hurrell, 1995; Hurrell, van Loon, 1997; Trigo et al., 2002; Seager et al., 2020). Эта дипольная структура осадков способна объяснить одновременное усиление пожаров в Средиземноморье и их ослабление в Фенноскандии при условиях, благоприятных для пожаров в Приенисейской Сибири. Такая интерпретация согласуется с результатами Florescu et al. (2019), показавших, что изменение привноса макрочастиц угля в голоцене в Европе была скоррелирована с событиями ледового разноса в Северной Атлантике и крупномасштабными изменениями влагообеспеченности, причём отклик северной и среднеширотной Европы различался по знаку. Аналогичный гидроклиматический механизм предложен Venito et al. (2015): фазы повышенной частоты наводнений в западном Средиземноморье приурочены к отрицательной фазе NAO, а значит, периоды

усиления пожаров там соответствуют более сухим условиям. Важно, что сопоставление данных из Приенисейской Сибири с пиками усиления ледового разноса в Северной Атлантике, показали противоположные тенденции отклика по сравнению с изменениями частоты пожаров в Европе по Florescu et al. (2019), – что свидетельствует о различном региональном отклике на одно и то же крупномасштабное климатическое воздействие.

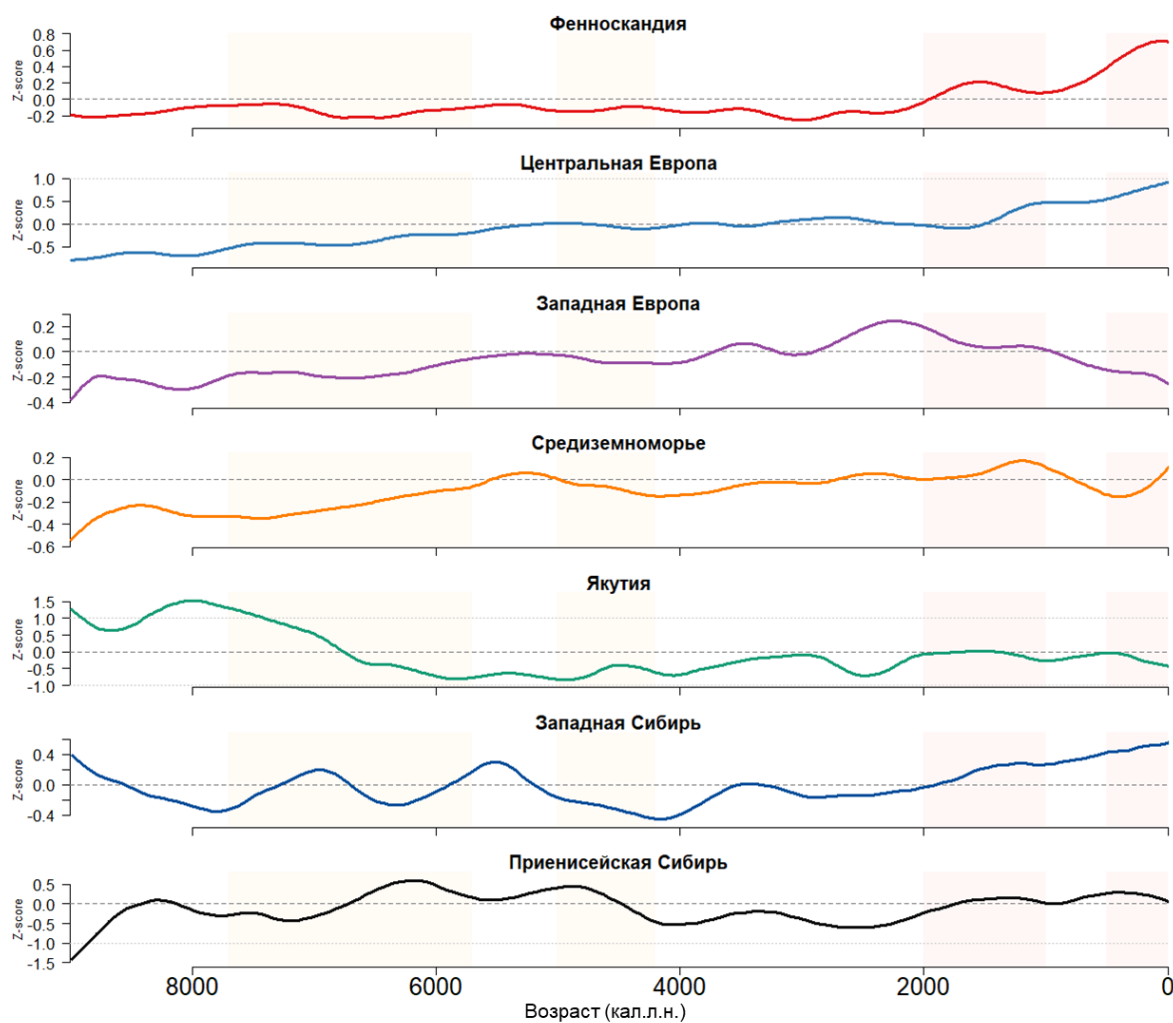


Рисунок 6. Z-оценки для Европы (Фенноскандия, Центральная Европа, Западная Европа, Средиземноморье) и Сибири (Якутия, Западная Сибирь) по данным Global Charcoal Database (Blarquez et al., 2014) и региона исследований. Для Западной Сибири данные взяты из работ (Startsev et al., 2022; Пупышева, Бляхарчук, 2024; Ryabogina et al., 2024; Pupyshova, Blyakharchuk, 2025; Трубицына и др., 2025). Цветом указаны ранее выделенные в Приенисейской Сибири интервалы роста пожарной активности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного исследования впервые для обширной территории Приенисейской Сибири получена непрерывная, детально датированная реконструкция динамики лесных пожаров на протяжении большей части голоцена (последние 8000 лет). Основные выводы диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Разработан и валидирован метод автоматического подсчёта макрочастиц угля в торфяных и озёрных отложениях на основе анализа изображений. Метод обеспечивает существенное ускорение обработки при точности высокой точности (MAE 31.58 %, $R^2 = 0.71$) и позволяет получать морфометрические характеристики частиц для дифференциации древесных и травяных морфотипов. Алгоритм опубликован в открытом доступе.

2. Реконструирована хронология пожарной активности в Приенисейской Сибири в голоцене. Выделены общие для региона интервалы повышения пожарной активности: 7700–5700, 5100–4200, 2000–1000 кал. л. н., а также этап с 500 кал. л. н. по настоящее время. В целом эти периоды сопоставимы с динамикой пожаров в соседних регионах (Западная Сибирь, Якутия) и глобальными тенденциями.

3. Выявлены пространственные особенности пожарных режимов. Наибольшая интенсивность пожаров и максимальные скорости аккумуляции макрочастиц угля зафиксированы на ключевом участке Тура (Центральная Эвенкия), что обусловлено наибольшей континентальностью климата и орографическими особенностями (сильно расчлененный рельеф с сухими лиственничниками на склонах плато).

4. Определена ведущая роль климатических изменений в долговременной динамике пожаров. Периоды повышения пожарной активности совпадают с потеплениями и снижением увлажненности климата (термический максимум голоцена, средневековое потепление), тогда как снижение или полное прекращение пожаров соответствует похолоданиям и увеличению осадков. Антропогенный сигнал уверенно выделяется только для последних 300–100 лет и связан с хозяйственной деятельностью (освоение территории русскими поселенцами, антропогенные пожары).

5. Показано, что пожарный режим Приенисейской Сибири согласуется с общими глобальными и межрегиональными тенденциями изменения пожарной

активности в голоцене, но при этом обладает выраженной региональной спецификой. Выявлена синхронность долгопериодных максимумов и минимумов пожарной активности с крупными климатическими фазами Северной Азии и Европы.

6. Установлено, что наиболее тесная и устойчивая положительная корреляционная связь пожарной активности прослеживается между Приенисейской Сибирью, Западной Сибирью и Якутией, особенно во второй половине голоцена.

7. Для удалённых европейских регионов выявлена сложная, часто знакопеременная динамика связи с Приенисейской Сибирью. Наиболее высокие по модулю корреляции отмечены с Фенноскандией (преимущественно отрицательная связь) и Средиземноморьем (преимущественно положительная связь), что может интерпретироваться как проявление влияния крупномасштабной атмосферной циркуляции в системе Северной Атлантики и западного переноса, а не прямой региональной сопряжённости, и требует дальнейших исследований.

8. Выявлен специфический для Приенисейской Сибири эпизод снижения пожарной активности около 5700–5100 кал. л. н., сопровождающийся отрицательной корреляцией практически со всеми сопоставляемыми регионами. Этот интервал, вероятно, указывает на специфический региональный отклик на климатические перестройки.

В результате выполнения диссертационного исследования установлено, что история лесных пожаров в Приенисейской Сибири в голоцене тесным образом связана с глобальными климатическими изменениями. Полученные данные существенно восполняют существовавший пробел в палеогеографических знаниях о развитии одного из ключевых регионов России и создают основу для дальнейших межрегиональных сопоставлений.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Рецензируемые научные издания:

- 1) **Шатунов А.Е.**, Мазей Н.Г., Новенко Е.Ю. Метод анализа макроскопических частиц угля в озерных и болотных отложениях по цифровому изображению для палеогеографических реконструкций // Геоморфология и палеогеография. – 2025. – Т. 56, № 2. – С. 341-354. – DOI: 10.31857/S2949178925020118.
- 2) **Shatunov A. E.**, Kupriyanov D. A., Prokushkin A. S., Mazei N. G., Novenko E. Yu. The Mid- and Late Holocene history of forest fires in Central Evenkia inferred from macrocharcoal analysis // Limnology and Freshwater Biology. 2024. Vol. 4. P. 636–641. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-a-4-636.
- 3) Novenko E. Yu., Prokushkin A. S., Mazei N. G., Zazovskaya E. P., Kupriyanov D. A., **Shatunov A. E.**, Andreev R. A., Makarova E. A., Kusilman M. V., Serikov S. I., Gu X., Babeshko K. V., Tsyganov A. N., Mazei Yu. A. The mid- and late Holocene palaeoecology and hydroclimatic changes in Yenisei Siberia revealed by a high-resolution peat archive // Quaternary International. 2024. Vol. 682. P. 8–21. DOI: 10.1016/j.quaint.2024.01.013.
- 4) Novenko E., Rudenko O., Mazei N., Kupriyanov D., Andreev R., **Shatunov A.**, Kusilman M., Prokushkin A., Olchev A. Effects of Climate Change and Fire on the Middle and Late Holocene Forest History in Yenisei Siberia // Forests. 2023. Vol. 14. №. 12. P. 2321. DOI: 10.3390/f14122321.
- 5) Novenko E. Yu., Mazei N. G., Prokushkin A. S., Kupriyanov D. A., **Shatunov A. E.**, Andreev R. A., Serikov S. I. The Holocene palaeoecology of the palsa mire near Igarka (Yenisei Siberia) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1093. № 1. P. 012029. DOI: 10.1088/1755-1315/1093/1/012029.
- 6) Новенко Е.Ю., Мазей Н.Г., Куприянов Д.А., **Шатунов А.Е.**, Андреев Р.А., Макарова Е.А., Бородина К.А., Руденко О.В., Прокушкин А.С., Волкова Е.М. Изменения растительности Приенисейской Сибири в последние 4700 лет: новые палеоэкологические данные из района Игарки (Красноярский край) // Геоморфология и палеогеография. – 2022. – Т. 53, № 3. – С. 51-60. – DOI: 10.31857/S0435428122030129.

Публикации в других изданиях:

- 1) **Шатунов А. Е.**, Новенко Е. Ю. Автоматизированный метод анализа макрочастиц угля в палеоэкологических исследованиях // Палинология в XXI веке: материалы XVI Всероссийской палинологической конференции, посвящённой 145-летию В. Н. Сукачёва. – Москва, 2025. – С. 360–362.
- 2) **Шатунов А. Е.**, Мазей Н. Г., Андреев Р. А., Новенко Е. Ю. История лесных пожаров в Приенисейской Сибири (п. Туруханск) в голоцене // Актуальные проблемы палеогеографии плейстоцена и голоцена: Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Марковские чтения 2025 года: материалы Всероссийской конференции с международным участием «Марковские чтения 2025 года». – Москва, 2025. – С. 264–267.
- 3) **Шатунов А. Е.** Ретроспективный анализ частоты пожарных событий на Среднесибирском плато в голоцене // Динамика экосистем в голоцене: сборник материалов VII Всероссийской конференции с международным участием. – Пермь, 2025. – С. 475–479.
- 4) **Шатунов А. Е.**, Новенко Е. Ю. Реконструкция периодичности пожаров в лесных экосистемах среднего Заволжья в голоцене по данным изучения макрочастиц угля в торфе на территории национального парка «Бузулукский бор» // Степи Северной Евразии: материалы X международного симпозиума (Международного степного форума), Оренбург, 27 мая – 02 июня 2024 года. – Оренбург: Институт степи УрО РАН Оренбургского федерального исследовательского центра УрО РАН, 2024. – С. 1498–1502.
- 5) **Шатунов А. Е.**, Новенко Е. Ю. Реконструкция периодичности пожарных событий и их особенностей по данным изучения макрочастиц угля в торфе в голоцене на современной территории национального парка «Бузулукский бор» // Географические исследования в контексте глобальных изменений: сборник материалов XVI всероссийской молодежной научной школы-конференции «Меридиан». – Москва, 2024. – С. 123–127.
- 6) **Шатунов А. Е.**, Новенко Е. Ю., Мазей Н. Г. Влияние пожаров на эволюцию лесных и болотных геосистем Центральной Эвенкии в голоцене // Исследования природы и общества в условиях глобальных трансформаций: сборник материалов

XV всероссийской молодежной научной школы-конференции «Меридиан». – Москва, 2023. – С. 260–267.

7) **Шатунов А. Е.**, Куприянов Д. А., Мазей Н. Г., Прокушкин А. С., Новенко Е. Ю. Реконструкция лесных пожаров в бассейне реки Нижняя Тунгуска (Центральная Эвенкия) в среднем и позднем голоцене по данным изучения макроскопических частиц угля в торфе // Динамика экосистем в голоцене: сборник статей по материалам VI всероссийской научной конференции. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 510–515.

8) **Шатунов А. Е.**, Куприянов Д. А., Мазей Н. Г., Прокушкин А. С., Новенко Е. Ю. Реконструкция лесных пожаров в бассейне реки Нижняя Тунгуска (Центральная Эвенкия) в среднем и позднем голоцене по данным изучения макроскопических частиц угля в торфе // GeoExpedition: сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции. – Москва, 2023. – С. 75–78.

9) Новенко Е. Ю., Мазей Н. Г., Куприянов Д. А., **Шатунов А. Е.**, Прокушкин А. С. История лесных пожаров Среднесибирского плоскогорья в позднем голоцене // Динамика экосистем в голоцене: сборник статей по материалам VI всероссийской научной конференции. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 500–505.

10) **Shatunov A. E.** History of wildfires in the western and central part of the Central Siberian Plateau: long-term fire activity based on peat archives // PAGES 2025 7th Open Science Meeting: Abstract Book. – Shanghai, 2025. – P. 670–671.