

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.4

ДРЕВЕСНЫЕ УГЛИ В ПОДЗОЛАХ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ КАК ИНДИКАТОР ИСТОРИИ ГЕОСИСТЕМ¹

© 2022 г. С. В. Лойко^{а, *}, Д. М. Кузьмина^а, А. А. Дудко^б, А. О. Константинов^с,
Ю. А. Васильева^б, А. О. Курасова^{а, с}, А. Г. Лим^а, С. П. Кулижский^а

^аТомский государственный университет, пр-т Ленина, 36, Томск, 634050 Россия

^бИнститут археологии и этнографии СО РАН, пр-т Академика Лаврентьева, 17, Новосибирск, 630090 Россия

^сТюменский государственный университет, ул. Володарского, 6, Тюмень, 625003 Россия

*e-mail: s.loyko@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.02.2021 г.

После доработки 03.08.2021 г.

Принята к публикации 18.08.2021 г.

Проведены исследования среднетаежного подзола иллювиально-железистого (Albic Podzol) на древней дюне в бассейне р. Большой Юган (приток Оби, Сургутское Приобье), вблизи участка проведения масштабных археологических работ. Определен радиоуглеродный возраст 31 морфона с древесными углями и выделено 8 вариантов расположения углистых морфонов относительно мозаик иных морфонов. Показано, что с помощью углей можно датировать время формирования морфонных мозаик, а процессы формирования подзолистого горизонта совпали с активизацией пожаров во второй половине голоцена. Установлено, что в начале пятого тысячелетия в почве стали появляться морфоны с древесными углями. Угли возрастом более 5 тыс. кал. л. н. не встречены. В начале третьего тысячелетия произошло двукратное увеличение частоты пирогенных событий с максимумом в середине третьего тысячелетия. В самом конце второго тысячелетия частота пирогенных событий заметно уменьшилась. Многие пики пирогенных событий последних пяти тысячелетий совпадают с периодами бытования археологических культур. Частично подтверждено предположение о том, что непрерывное существование лесной среды приводит к постоянному погребению древесных углей за счет фитогурбаций.

Ключевые слова: Albic Podzols, педоантракология, почвенные морфоны, генезис почв, радиоуглеродный возраст, археология Сургутского Приобья

DOI: 10.31857/S0032180X22020083

ВВЕДЕНИЕ

Крупные частицы древесного угля являются неотъемлемой частью почвенных профилей лесных почв [42, 44, 46, 53, 66, 67, 72, 76, 85]. Древесный уголь регулярно поступает на поверхность почвы в результате сгорания растений и подстилки, делювиального сноса со склонов, либо из рек, если почвы пойменные. Часть микроскопического древесного угля может поступать на поверхность из воздуха, как это происходит на болотах [24, 71]. Часть углей с поверхности поступает в почву благодаря биотурбациям [8, 44, 47, 52, 53, 86–88], погребению эрозионно-аккумулятивными процессами [4, 34, 38, 59, 60, 82], различным сельскохозяйственным воздействиям [43, 81, 91]. Также угли могут мигрировать с почвенными растородами [32].

Попадая в почву, древесные угли выполняют важные экологические функции, пополняя пул пирогенного углерода [84], способствуют повышению уровня почвенного плодородия, особенно в самых бедных элементами питания почвах, что заметно при их искусственном внесении в почвы лесных биомов [54–56].

Большое диагностическое значение древесные угли имеют для палеоэкологических исследований [34, 45, 85]. Так, по крупным древесным углям (размером более 0.5 см) реконструируют историю локальных пирогенных воздействий на экосистемы [78]. В некоторых понижениях рельефа формируются надежные ловушки для древесных углей, что позволяет с высоким пространственным и временным разрешением реконструировать историю пожаров во времени [69, 72]. Если условия рельефа не позволяют формироваться делювию, то используют угли, погруженные в почву биотурбационными и антропогенными воздействиями [42–44, 81, 91]. Древесные угли

¹ К статье имеются дополнительные материалы, доступные для авторизованных пользователей по doi: 10.31857/S0032180X22020083.

используют для определения возраста почвенных морфологических элементов, связанных с фито- [87, 88] и криотурбациями [70], а также с системой подсечно-огневого земледелия [81, 91].

В последние годы резко увеличилось число работ с применением антракологического метода для анализа торфа и озерных отложений [40, 41, 48–50, 62, 65, 68, 71, 74, 75], а также почв [4, 10, 32, 34, 42, 44, 72, 73, 81, 82]. Для Западной Сибири на данный момент известно лишь 5 работ, где почвенные угли использованы в качестве индикатора истории экосистем [10, 21, 32, 73, 93].

Данное исследование выполнено с целью проверки предположения о том, что непрерывное существование лесной среды приводит к постоянно-му и последовательному погребению древесных углей за счет фитотурбаций, что потенциально может дать непрерывную историю лесных пожаров. Исследовали подзол иллювиально-железистый песчаный в подзоне средней тайги Западно-Сибирской низменности.

Для достижения поставленной цели решали следующие задачи: 1) выявление частоты пирогенных событий; 2) установление времени и механизмов формирования почвенных морфологических элементов с углями; 3) сопоставление частоты пирогенных событий с материалами археологической периодизации, а также имеющимися реконструкциями голоценовой динамики растительного покрова. Данная работа является первой попыткой использовать древесные угли в качестве архива истории экосистем Сургутского Приобья для решения региональных вопросов палеоэкологии, почвоведения и археологии.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Район и объекты исследований. Исследования проводили в центральной части Западной Сибири, неподалеку от пос. Угут Сургутского района Ханты-Мансийского автономного округа (рис. 1), где распространены типичные среднетаежные ландшафты. Климат континентальный, среднегодовая температура -2.2°C , количество осадков 621 мм [30]. Ключевой участок заложен на второй левобережной террасе р. Большой Юган – левого притока Оби, в нижнем течении р. Кулунигый. Отложения террасы песчано-супесчаные с прослоями суглинков. Вблизи рек на поверхности террасы чередуются невысокие дюны: гривы и вытянутые междюнные понижения. В глубине террасы все межгривные пространства заняты болотами. Высокий уровень заболоченности существовал большую часть голоцена [25, 93]. Вслед за Аветовым с соавт. [1] полагаем, что гривный рельеф района исследований имеет эоловой генезис, как это показано для аналогичных форм рельефа юга лесной зоны Западной Сибири [61, 89].

На террасе вблизи рек преобладают подзолы иллювиально-железистые языковатые глубинно-глееватые (Glossic Endogleyic Albic Podzols по WRB [57]) и торфяно-подзолы иллювиально-железисто-гумусовые глеев(ат)ые (Gleyic Histic Albic Carbic Podzols). Выбранная для исследований грива имеет плавные очертания и пологие склоны с перепадом высот к прилегающим межгривным понижениям около 2 м. Фитоценоз – 10-летняя гарь на месте сосняка зеленомошно-брусничного.

Почвенные траншеи закладывали на вершине и склонах гривы за пределами археологических объектов, вблизи нескольких крупных селищ и могильников разного возраста. На них в 2017–2019 гг. Юганским отрядом ИАЭТ СО РАН проведены спасательные археологические раскопки, что позволило привлечь для интерпретации полученных данных археологические материалы [13–17]. В Сургутском Приобье, в частности бассейне р. Юган, наблюдается высокая плотность археологических объектов возрастом от раннего неолита через все археологические эпохи вплоть до позднего средневековья и современности [16, 17], что делает полученные данные репрезентативными для всего обозначенного региона.

Морфологический анализ почв и отбор древесных углей. Древесные угли отбирали из 10 траншей, размером 6×2 м, расположенных на расстоянии 5–10 м друг от друга (координаты: $60^{\circ}24'32.3''\text{N}$; $73^{\circ}56'46.7''\text{E}$). Их глубина составила 70–90 см и достигла почвообразующей породы, что позволило собрать самые глубокие почвенные угли из ветровальных почвенных комплексов (ВПК). Траншеи закладывали послойно с фотофиксацией горизонтальных зачисток через каждые 5–10 см. Каждый уровень сфотографировали общим планом с помощью фотоаппарата, закрепленного на моноподе. Суммарная площадь сфотографированных горизонтальных срезов составила 960 м^2 . На основе полевого и камерального (по фотографиям) морфологического анализа типизировали морфонные мозаики со сходным генезисом. На срезе морфоны выглядят как отдельные пятна в пределах почвенного горизонта.

Морфонные мозаики (или мозаики морфонов) – это парагенетические скопления морфонов, обычно расположенные в нескольких горизонтах. Мозаики осложняют горизонтное строение почвенного профиля и связаны с латеральными, турбационными и антропогенными воздействиями (ВПК, хозяйственные ямы, криотурбации и др.). Для уточнения строения выявленных на вертикальных стенках мозаик рассматривали их и на горизонтальных срезах.

Суммарно обследовали 160 м длины вертикальных стенок траншей, что с учетом глубины дает около 128 м^2 среза. Угли удалось собрать из 31 морфона. Угли с минеральной поверхности почвы не



Рис. 1. Район исследований и расположение ключевого участка.

собирали. Породный состав углей определяли с помощью микроскопа в отраженном свете (40–400×) с использованием атласа анатомии древесины [7].

Радиоуглеродное датирование. Из полевых проб в лабораторных условиях производили отбор почвенных углей, отбрасывая оплавленные, вторично горевшие угли, опираясь на признаки, предложенные Пономаренко с соавт. [34]. Для анализа отобрали 31 пробу из разных углистых морфонов. Из углей отобрали корешки, далее очищали с помощью последовательной кислотной-щелочной обработки. Вначале помещали в 1 М HCl, после чего промывали 0.1 М NaOH, нейтрализовали разбав-

ленной HCl, промывали деионизированной водой и сушили при 105°C [44]. Двенадцать самых крупных образцов древесного угля, массой 3–4 г каждый, датировали жидкостно-сцинтилляционным методом в Центре геофизического мониторинга НАН Беларуси (IGSB). В случае если морфоны с углями содержали только угольную пыль и мелкие угольки, то их датировали методом ускорительной масс-спектрометрии. Десять углей графитизировали в лаборатории радиоуглеродных методов анализа Новосибирского государственного университета (GV) с помощью автоматизированной системы AGE 3 (Ionplus, Цюрих,

Швейцария) и датировали на УМС-установке Института ядерной физики СО РАН (Россия, Новосибирск). Девять углей датировали в Познаньской радиоуглеродной лаборатории (Poz) Университета Адама Мицкевича (Познань, Польша) с аналогичной подготовкой. Для калибровки использовали он-лайн версию программы OxCal 4.4 с калибровочной шкалой IntCal20 [83].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Морфоны и горизонты подзолов. Средняя формула профиля изученных подзолов (рис. 2а): Оруг(0–2)–Е(2–29)–BF1y(29–38)–BF2y(38–45)–BCff(45+). Глубины границ горизонтов сильно варьируют. Средняя глубина нижней границы гор. Е составляет (среднее \pm стандартное отклонение) – 28.7 ± 15.6 , п/гор. BF1 – 38.0 ± 19.8 , п/гор. BF2 – 45.4 ± 9.8 . Ниже рассмотрим изученные морфоны и их мозаики.

Языки – наиболее распространенный тип морфонов в изученных почвах (рис. 2б). Согласно КиДПР-2004 [22], диагностируется подтип языковатых подзолов, типичных для тайги Западной Сибири [1, 11, 12]. Если песчаные отложения подстилаются более плотными суглинками, то языки, опираясь в них, становятся значительно короче [63]. Центры языков заполнены материалом горизонта Е, периферия окаймлена новообразованиями (гидр)оксидов железа, а нижняя часть органо-железистыми и/или марганцево-железистыми соединениями, формирующими оруденелый ореол (рис. 2б). Отношение длины к ширине языка $>3-5$.

Карманы – широкие углубления нижней границы горизонта Е (рис. 2с). Отношение длины к ширине кармана <3 . На горизонтальном срезе выглядят как крупные белесые пятна, часто вытянутой, эллипсоидной формы, протяженностью до нескольких десятков см. Иногда карманы заканчиваются языком. Карманы встречаются реже, чем языки, в плане их размеры больше. В их нижней части, как и у языков, часто встречаются оруденелые ореолы.

Морфоны ВF/BC “подвешенные” в горизонте Е встречаются в большинстве изученных траншей (рис. 2д). В этих морфонах часто встречаются древесные угли. Горизонтальное простираение от десятков сантиметров до 1–2 м.

Пятнистые полиморфоны – на вертикальном срезе выглядят как пятнистые области в пределах горизонтов ВF и BC. Сложены материалом всех имеющихся горизонтов, а также сероватобуро-охристыми морфонами, предположительно являющимися реликтами ранне- и среднеголоценовых гумусовых горизонтов (рис. 2е). Реже встречаются в горизонте Е, где могут быть сложены углистыми и розоватыми прокалами, ма-

териалом [ВF + BC]. Глубина чаще всего до 60 см, реже до 1 м. Происхождение этих полиморфонов связано с ветровалами.

Углистые морфоны – скопления древесного угля в виде серых пятен, состоящие как из крупных угольков, так и мелкодисперсной угольной пыли. Для углей размером более 1 см определен состав пород. В 74% случаев диагностировали *Pinus sylvestris*, 21% углей определен до рода – *Pinus* sp. и лишь 5% определены как *Pinus sibirica*. В настоящее время для гивы *Pinus sibirica* не характерен.

Радиоуглеродный возраст пирогенных событий. Результаты датирования приведены в табл. S1, рис. S1–S21. На рис. 3 показана частота пирогенных событий, на основе которой вторая половина голоцена поделена на 4 временных периода. Первый от 5000 кал. лет и старше, пирогенных событий не зафиксировано. Второй от 5000 до 2800 кал. л. н. Это время характеризуется средним уровнем частоты возгораний лесов, отмечены два пика, приходящиеся на период 4400–4600 и 3400–3600 кал. л. н. Уменьшение пожарной активности отмечено между третьим и четвертым тысячелетиями. Третий период длился с 2800 до 1200 кал. л. н. с максимальным количеством пожаров в период от 2600 до 2400 кал. л. н. Четвертый период – от 1200 кал. л. н. до наших дней. На рис. 4 показаны вероятности и медианы калиброванного возраста древесных углей, примерно отражающих возраст пирогенных событий, в зависимости от глубины отбора угля.

Связь возраста углей с глубиной их залегания и глубиной оподзоливания. 27 из 31 углистых морфонов были встречены до глубины 30 см. Глубже, в диапазоне 30–60 см, встречено лишь 4. Наиболее глубоко расположенные угли имеют возраст более 2500 лет.

Проведено сопоставление возраста углей с глубиной оподзоливания непосредственно под углистыми морфонами. Если под углистым морфоном располагался язык или карман, то глубину измеряли до нижнего края белесой части. Установлено, что связь глубины залегания углей и их возраста имеет слабый положительный тренд ($R^2 = 0.32$) (рис. 5а). На рис. 5 показано распределение глубин для дат двух периодов: 0–2500 и 2500–5000 кал. л. н., в среднем составившие 35.4 ± 12.8 и 54.1 ± 17.8 см соответственно. Языки максимальной глубины приурочены ко второму, более древнему диапазону. Это свидетельствует о том, что тесная связь расположения углей в материале гор. Е имеет генетическую природу.

Возраст углей и варианты их расположение в морфонных мозаиках. Из 31 изученного углистого морфона 24 размещались в материале горизонта Е; 5 встречены в “подвешенных” в горизонте Е морфонах ВF/BC, и лишь один в нижней части пятнистого полиморфона на уровне горизонта BC.

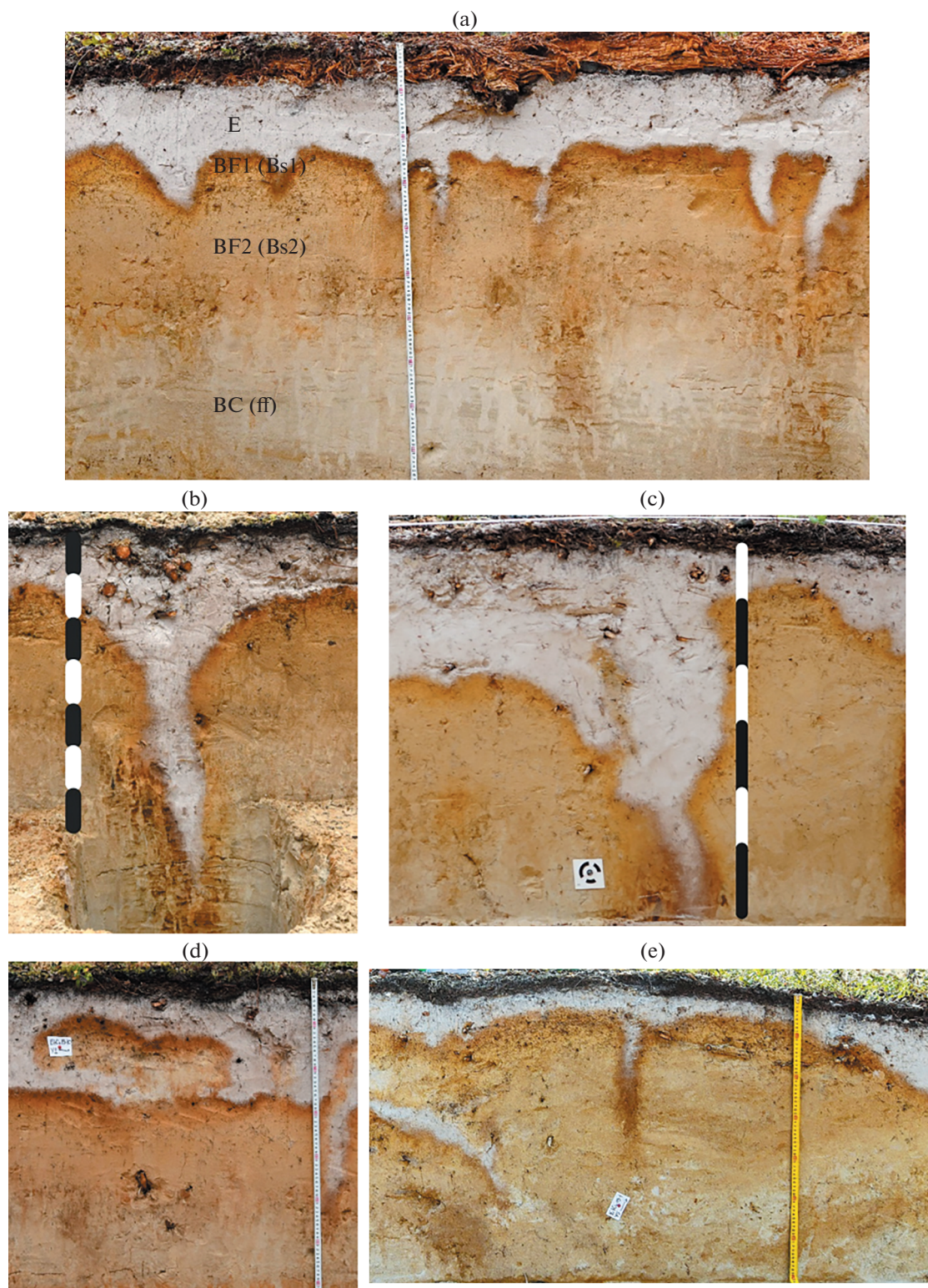


Рис. 2. Подзол иллювиально-железистый и основные морфоны: а – фоновая часть ареала подзола без крупных морфонов с малыми “е” карманами и язычками; б – крупный язык с орудением (до 130 см); с – крупный карман (до 42 см), заканчивающийся языком; д – подвешенный морфон иллювиального горизонта в горизонте Е; е – пятнистый глубокий полиморфон (до 75 см). Индексация горизонтов дана по КиДПР (2004) и ФАО (2006).

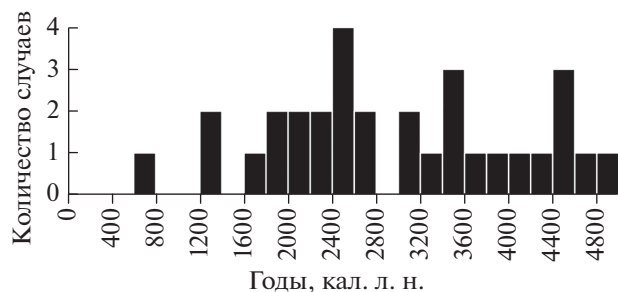


Рис. 3. Количество пироженных событий каждые 200 лет от наших дней до 5000 кал. л. н., согласно архиву древесных углей из исследованных подзолов.

87% изученных углистых морфонов попали в почву благодаря ветровалам. В оставшихся случаях угли засыпались по корневому каналу. Морфологический анализ 10 траншей и фотоматериалов с ближайших археологических раскопов также подтвердил, что основным механизмом погружения углей является их отсыпка в ветровальные западины, а отсыпки углей по корневому каналу менее распространены. Случаи фитильного выгорания корня единичны. Общим для морфонных мозаик по ВПК является наличие двух зон в западине, различающихся материалом отсыпки. Зона I сложена верхними горизонтами (подстилка и угли, подзолистый и, если ветровал древний, серогумусовый горизонты). Зона II сложена материалом срединных и ВС горизонтов.

Выделено 8 вариантов расположения углистых морфонов относительно мозаик иных морфонов (рис. 6 и 7b).

1) Сформирован недавними (500–600 л. н.) ветровалами средней глубины (рис. 6a). Угли расположены в двух зонах западины ВПК (I и II), а значит часть из них переотложена из более древних углистых морфонов.

2) Образован неглубокими вывалами как древними, так и молодыми (рис. 2b, 6b). Угли приурочены к устьевой зоне языка. Если угли древние (>2 тыс. лет), то язык обычно имеет хорошо развитую оруденелую область по периферии.

3) Сформирован древними и глубокими ветровалами, возрастом более 3.5 тыс. лет (рис. 2e, 6c). К зоне I западины ВПК часто приурочены реликты серогумусовых горизонтов и угли.

4) Связан с древними (>4000 лет) ветровалами, нарушившими все горизонты, вплоть до ВС (рис. 6d). Под углистыми морфонами расположены мощные языки (оруденелая зона приглубе 100 см). Сбоку от таких языков, в зоне II былых западин ВПК, расположены “BF-горбы” – участки с альфегумусовым горизонтом, приближающимся к поверхности почвы.

5) Этот вариант схож с предыдущим (рис. 2b, 6f), однако языки не столь глубоки в силу их меньшего возраста.

6) На месте зоны II древних ВПК встречаются угли в BF-морфонах “подвешенных” в горизонте E (рис. 2d, 6e).

7) Связан с неглубокими ветровалами, либо отсыпкой углей по комлям деревьев. Языков нет.

8) Вытянутое скопление углей в языке (рис. 7b) по былому корню.

ОБСУЖДЕНИЕ

Древесные угли и генезис морфонных мозаик подзолов. Ранее для подзолов средней тайги Западной Сибири показано, что характерные времена большинства их свойств укладываются в пять тысячелетий [28]. Изученные угли погружались на длительном временном интервале, составившем почти 5 тыс. лет. Очевидно, что процессы формирования морфонных мозаик во второй части этого интервала отличались от первой, так как за это время дифференциация профиля подзолов, скорее всего, увеличилась. Все изученные в траншеях угли были погружены из скоплений на минеральной поверхности почвы, а значит последние 5 тыс. лет существовала типичная для средне-таежного леса ситуация, когда между подстилкой и минеральным горизонтом залегают угли (Оруг).

Общая схема формирования морфонных мозаик приведена на рис. 7, а ее начальный этап соответствует 2500 кал. л. н. Даже в условиях северной тайги биогенный фактор играет большую роль в формировании морфонов [23, 26], очевидно, что южнее его роль еще более значительна. Как известно, дерево выпадает из древостоя с образованием ветролома, либо ветровала [36]. В первом случае крупные корни остаются на месте (рис. 7b), и образующиеся после их разложения пустоты заполняются материалом вмещающих и поверхностных горизонтов с углями. Корневые каналы служат преимущественными путями миграции воды, за счет чего на месте канала образуется язык с оруденелым ореолом. Во втором случае образуются западина и ветровальный ком (бугор) [9]. Так как вывалы чаще всего частично повернутые, то угли и поверхностные горизонты отсыплются в западину с передней стороны ВПК (рис. 7c). В заднюю часть западины отсыпается преимущественно материал BF и ВС горизонтов. В дальнейшем в зоне II западины, сложенной нижними горизонтами, формируется маломощный оподзоленный горизонт, медленно углубляющийся во времени (рис. 7d). В зоне I западины осветленные горизонты сразу после отсыпки формируют белесый карман. С течением времени в нижней части таких карманов формируются языки с оруденелым морфоном (рис. 7e). Их оподзолен-

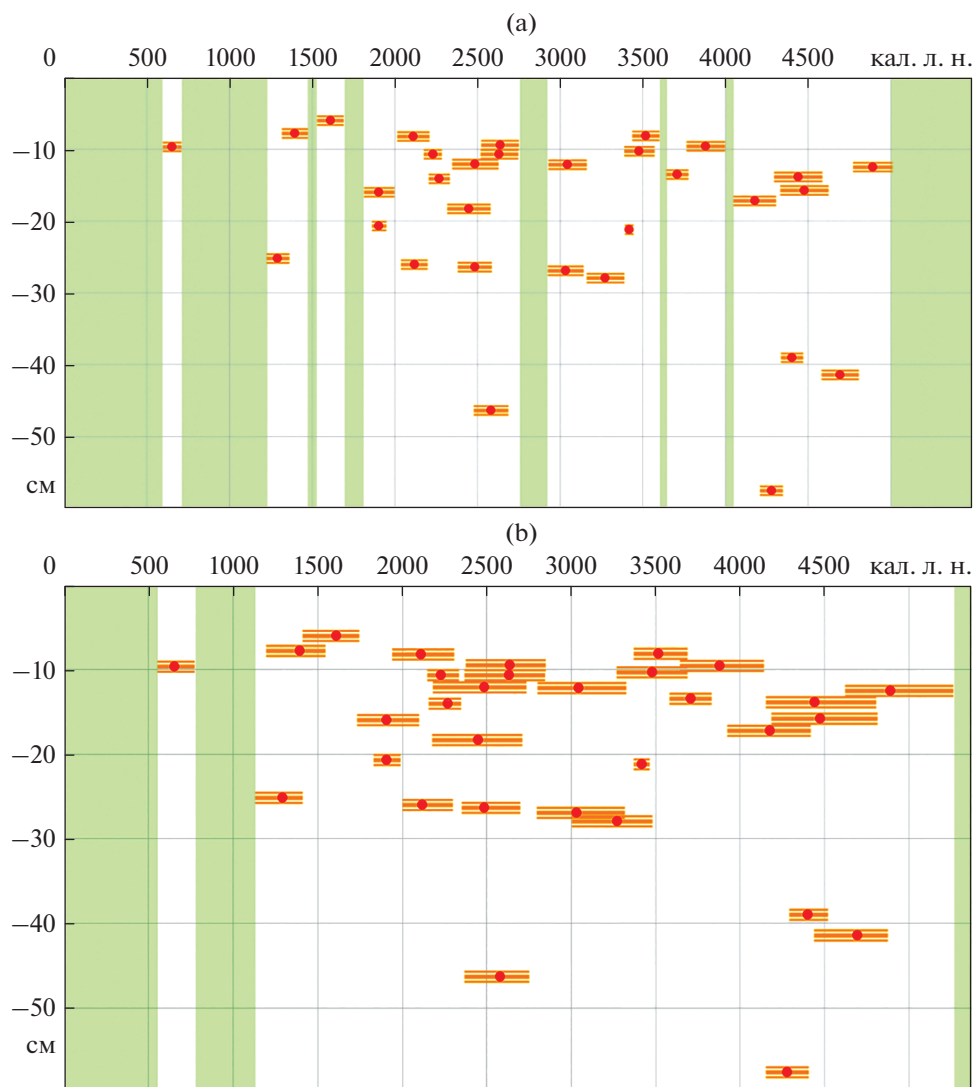


Рис. 4. Радиоуглеродный возраст древесных углей в зависимости от глубины отбора. Красными точками показано среднее значение откалиброванного возраста (с вероятностью 95.4%); а – радиоуглеродный возраст, где в качестве допусков показана погрешность датирования; б – медианный возраст и допуски с 99% вероятностью. Зеленым показаны гипотетически беспожарные периоды.

ная часть разрастается за счет концентрации имеющихся даже в песках [58] латеральных потоков по гор. ВФ [11] в разуплотненные зоны, выступающие как локальные гидрологические “воронки”.

Сопоставление времени бытования археологических культур и пирогенных событий. Значительная плотность археологических памятников на незаболоченных участках, а также этнографические данные [2], позволяют предполагать, что антропогенно-иницированные пожары для района исследований – обычное явление. Последнее подтверждается при сопоставлении археологических материалов [20] с данными по примерному возрасту пирогенных слоев в торфе [93], которые получены для урочища Большое Каюково (Пунси), расположенного в 65 км от ключевого участ-

ка. Центром урочища является грива, окруженная верховым болотом, на которой с начала неолита с перерывами проживали люди. Пожары распространялись на прилегающие болота с гривы. Число пирогенных слоев в торфе закономерно уменьшается по мере удаления от гривы. Пожары в этом урочище фиксируются с начала голоцена, причем их частота была больше в первой половине голоцена [93].

В связи с вышесказанным неожиданно выглядит ограниченность полученной “пожарной хронологии” пятью тысячелетиями, хотя в непосредственной близости к изученным траншеям имеются памятники старше этого времени. К ним относятся промысловый комплекс Кулунигый 66, грунтовый могильник Кулунигый 64 [15], поселе-

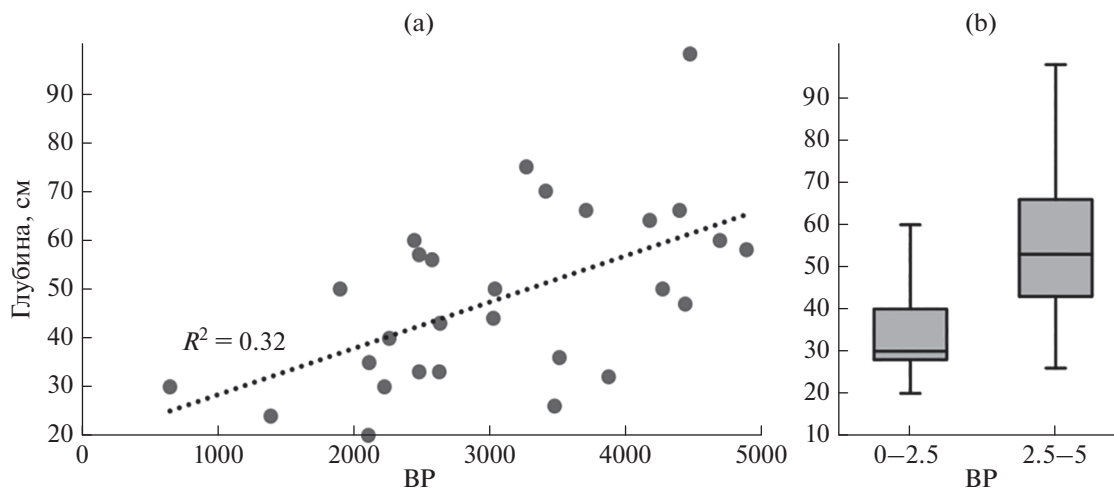


Рис. 5. Зависимость между возрастом углей и глубиной оподзоливания под ними: а — диаграмма рассеяния для всех полученных дат; б — квантили глубин оподзоливания для углей, объединенных в два возрастных диапазона.

ние Кулунигый 71. Радиоуглеродные даты с этих объектов дают фактически непрерываемый ряд протяженностью 2500 лет: с 7840 по 5380 кал. л. н. Отсутствие углей этого промежутка времени в изученных почвах можно объяснить как редкостью ветровальных событий, так и отсутствием на тот момент скоплений углей под подстилкой. Последнее доказывает анализ стратиграфии глубоких (более 2 м) неолитических ям-ловушек комплекса Кулунигый 66 [13]. Ни у одной изученной ямы под материалом выкида не зафиксирован слой погребенных углей. Также не фиксируется и погребенных подзолистых горизонтов. Это значит, что в неолите на гриве были не подзолы, а угли не формировали скопления на поверхности, как в современных среднетаежных сосняках. Причиной этого может быть иной характер растительности, имевшей намного большее проективное покрытие трав и разреженный древостой. Часть углей, погруженных в почву в неолите, могла успеть разложиться [64, 77].

Последние 5 тыс. лет в нижнем течении р. Кулунигый древнее население проживало непрерывно. Однако современное состояние изученности археологических комплексов в данном районе не позволяет говорить о памятниках III—второй трети II тыс. до н. э. Существование памятников этого времени на рассматриваемой территории бесспорно, однако на данный момент они еще не изучены.

Если рассматривать соотношение бытования археологических культур Средней Оби в целом [18, 19, 37], с пиками пирогенных событий в бассейне р. Кулунигый, то совпадения выявляются не всегда. Так, со временем бытования барсовогорского типа памятников раннебронзового века (середина III тыс. до н. э.) и кульганского типа

памятников среднебронзового века (середина II тыс. до н. э.), совпадают два пика пожаров (рис. 3), в то время как на барсовско-атлымский этап поздней бронзы (XII—VIII вв. до н. э.) приходится уменьшение количества пирогенных событий. Затем, в раннем железном веке, на белоярское (рубеж VIII/VII—IV вв. до н. э.) и кулайское (рубеж IV/III вв. до н. э.—III в. н. э.) [14, 35] время приходится наибольший за последние 5 тыс. лет пик частоты пирогенных событий. Последний пик пирогенных событий приходится на время бытования кучиминской археологической культуры (конец VII—начало IX вв. н. э.) [3].

Сопоставление частоты возникновения пирогенных событий с иными палеогеографическими данными. Полученные данные о частоте пирогенных событий и морфологии почв позволили выявить 3 этапа в изменении окружающей среды. Первый этап пришелся на начало пятого тысячелетия. Это время, когда активизировалось подзолообразование, участились пирогенные события и/или активизировались ветровалы, и/или угли стали накапливаться на поверхности почвы. Второй этап приурочен к началу третьего тысячелетия и связан с двукратным увеличением частоты пирогенных событий. Третий этап приходится на конец второго тысячелетия, когда число пирогенных событий заметно сократилось.

Первый этап (6500—4500 кал. л. н.) для природы Западной Сибири ознаменовался существенными перестройками. Шесть тысяч л. н. север Западной Сибири был более теплым, чем сейчас, а юг напротив, был более холодным, в основном за счет холодного сезона [90]. В это время в северной тайге усилились процессы олиготрофизации болот, замедлились вертикальные скорости накопления торфа, в финале указанного отрезка

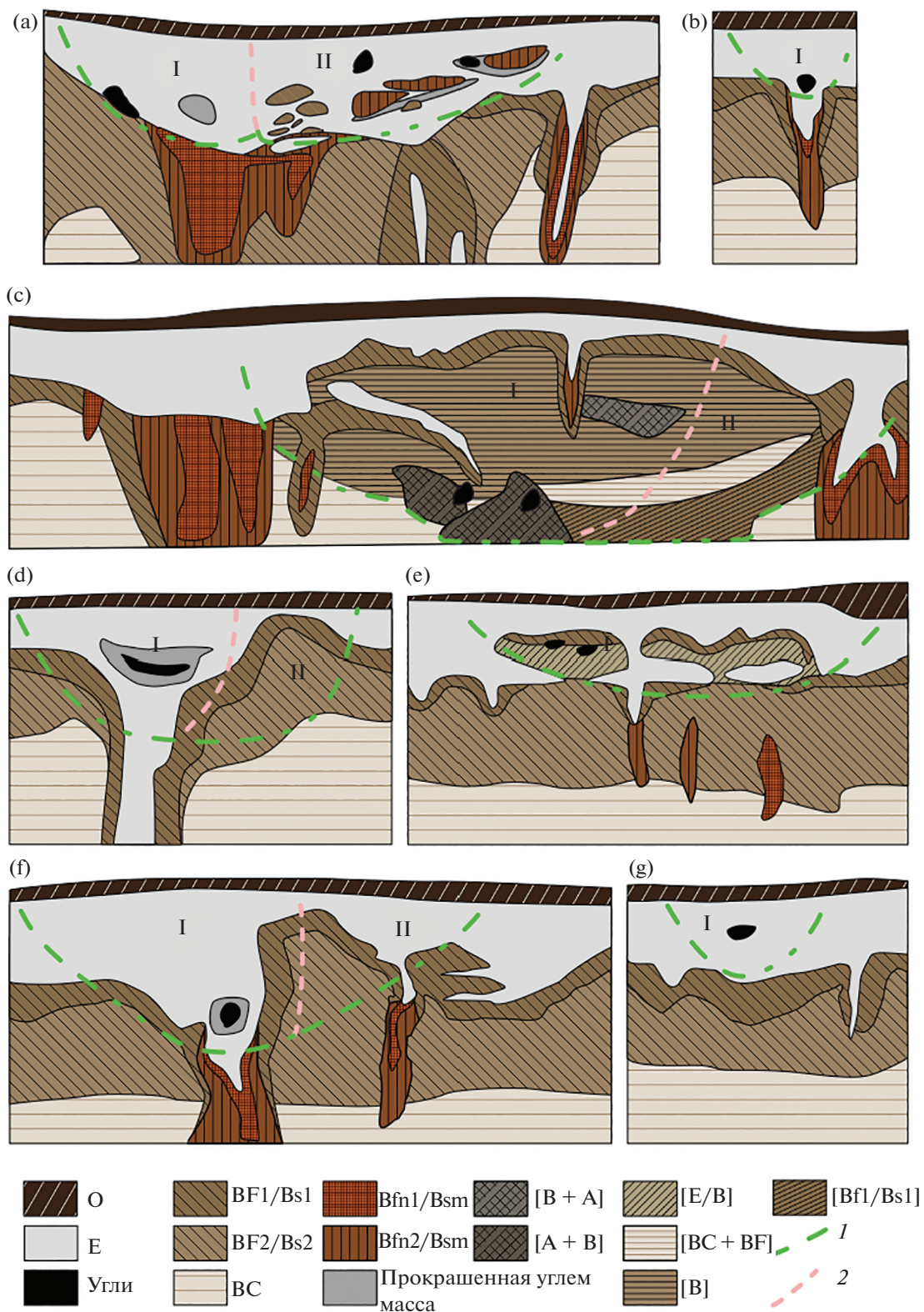


Рис. 6. Типы морфологических мозаик с древесными углями в подзолах: 1 – граница западины ВПК; 2 – граница в былой западине между материалом осыпавшихся органогенного и подзолистого горизонтов (I), и массой осыпавшихся срединных горизонтов (II).

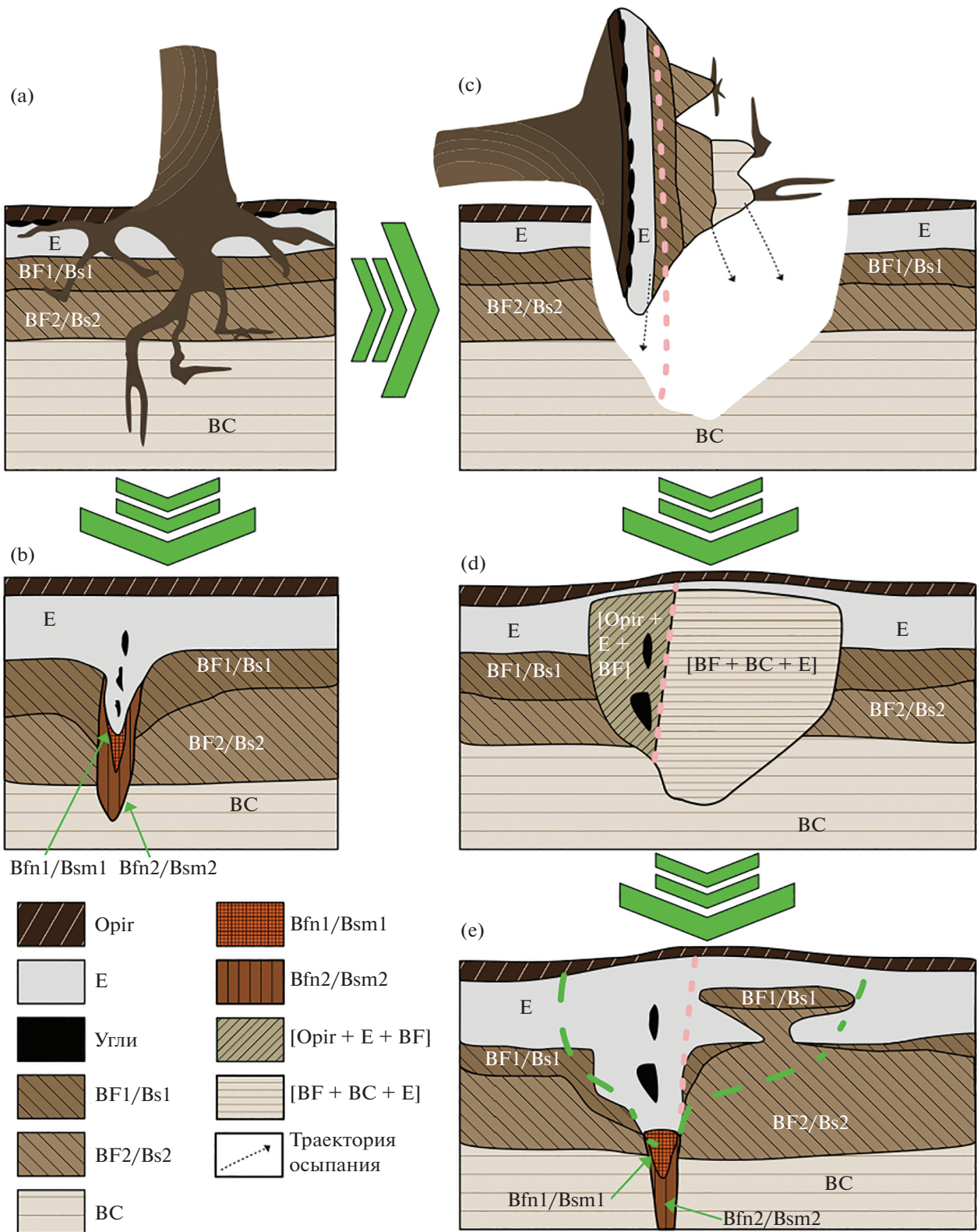


Рис. 7. Схема погружения углей и формирования главных почвенных морфологических элементов в результате воздействия корневых систем деревьев на подзолы. Описание в тексте.

времени произошло промерзание торфяных отложений [27, 29, 31]. Около 3000 кал. л. н. происходит увеличение количества осадков, и мерзлота частично начинает деградировать [29]. В средней тайге зафиксировано уменьшение скорости накопления углерода 6–5 тыс. кал. л. н., что связывается с увеличением засушливости от 5700 до 3000 кал. л. н. [92]. На протяжении периода времени от 6000 до 3975 кал. л. н. происходило увеличение промежутков времени между пиками содержания пыльцы ели с 260 до 525 кал. лет, сопровождавшееся увеличением количества микроугольков в торфе [33]. Кроме индикации ухудшения условий климата это свидетельствует об учащении пожаров и, как следствие, ослаблении фитоценологических позиций ели, как позднесукцессионного вида. В обозначенный период в донных отложениях среднетаежного озера Светленькое, на первой надпойменной террасе Оби, увеличилось содержание карбонатов и углерода органических соединений [39]. Начиная с середины пятого тысячелетия наблюдается сильное увеличение доли сосны обыкновенной в споро-пыльцевых спектрах болот средней тайги, одновременно снижается содержание пыльцы ели, особенно сильное в самых заболоченных районах [39, 80], что связано с исчезновением массивов заболоченных ельников и переходом болот в олиготрофную стадию. В пределах низких террас Оби ослабление фитоценологических позиций ели было не столь значимо, а к концу третьего тысячелетия отмечено некоторое восстановление ее позиций [39].

Факт отсутствия углей старше 5 тыс. лет коррелирует с данными из ряда других регионов. Так, из обзора [51] следует, что для центра Русской равнины и Прибалтики минимальное количество пожаров приходится на период между 5 и 7 тыс. л. н. Однако эти результаты противоречат данным из средней тайги Приенисейской Сибири [21], где в болотах Сым-Дубческого междуречья имеются пирогенные прослойки возрастом, приходящимся на диапазон от 9 до 5 тыс. кал. л. н. В то же время там не обнаружены угли возрастного диапазона от 5 до 3 тыс. кал. л. н. В 67 км на ЮЗ от места исследований в болотах фиксируются угли [93] от антропогенных пожаров, приходящиеся в основном на интервал 6–7 тыс. лет и более, в период 5–6 тыс. лет слоев существенно меньше, их число вновь увеличивается в период менее 5 тыс. л. н.

Второй этап (3000 л. н.), характеризующийся двукратным ростом встречаемости пирогенных событий, с пиком в период от 2600 до 2400 кал. л. н., не находит какого-то яркого отражения в имеющихся палеоэкологических летописях. Для болот средней тайги на период 3220–270 кал. л. н. реконструированы более высокие уровни болотных вод, чем были в предшествовавший период [92]. Так, для юга таежной зоны Западной Сибири реконструируются более влажные условия в

период 2125–2840 кал. л. н. На период максимальной горимости приходится влажная фаза [6], что несколько противоречит увеличению числа пожаров. В среднетаежных верховьях бассейна р. Конда на это время пришлось значительное увеличение роли сосны. Вслед за чем несколько возросла роль кедра и пихты, а роль березы уменьшилась [5], что отражает сукцессионную динамику растительного покрова. В средней тайге в донных отложениях озера Светленькое с 3000 л. н. вновь начало возрастать содержание карбонатов [39], что может совпадать как с усилившимся пирогенным выщелачиванием, так и с увеличением влажности климата. В целом пик числа пирогенных событий совпадает с одним из самых больших пиков содержания пыльцы сосны в торфе [39, 80]. В болотах Приенисейской Сибири максимальное число пирогенных слоев за голоцен также пришлось на диапазон от 3 до 1 тыс. кал. л. н. [21].

Третий этап (2400–1000 кал. л. н.) характеризуется сильным сокращением частоты пожаров, не скоррелированным с какими-то явными природными событиями, поэтому наиболее логично объясняемым антропогенным фактором. В целом на 2 последних тысячелетия в Западной Сибири реконструированы стабильные климатические условия [79]. На период 795–1080 кал. л. н. для юга таежной зоны Западной Сибири реконструированы увеличение температур и влажности [6] и уменьшение поступления микроугольков в торфяных отложениях [49, 50]. В средней тайге минимальный поток микроугольков пришелся на 900–1000 кал. л. н., данный период описывается как влажный [65]. Для этого промежутка времени в траншеях не зафиксировано ни одно пирогенное событие. Постепенный рост количества пожаров в средней тайге, начавшийся 800 л. н., с пиком на 500 л. н. [65], зафиксирован лишь одним пирогенным событием.

Значительное уменьшение частоты возникновения пирогенных событий в последнюю тысячу лет не нашло отражения в споро-пыльцевых спектрах ближайших изученных торфяных залежей [39, 80]. Скорее всего, это связано с тем, что предыдущие тысячелетия высокой горимости настолько оттеснили позднесукцессионную флору, что оставшиеся рефугиумы не справлялись с обеспечением необходимого потока семян темнохвойных видов деревьев. Также не обнаружены пирогенные прослойки моложе тысячи лет и в болотах средней тайги Приенисейской Сибири [21]. Изложенные факты подтверждают предположение о том, что практически полное отсутствие углей в период 800–1200 кал. л. н. связано не с тем, что они еще не успели погрузиться в должной мере при ветровалах, а в целом с меньшей горимостью лесов в этот период. В качестве примера можно привести данные по черневой тайге, в ко-

торой древостои менее сомкнуты, однако угли от пожаров последнего тысячелетия в этих разреженных травяных лесах успели погрузиться на большую глубину [73].

Пожары последних сотен лет еще не запечатлены в почве, а угольный архив по большей части находится под подстилкой, либо в западинах молодых ветровалов, не попавших в выборку.

Ограничения при датировании пирогенных событий. Проведенные исследования показали, что почвенный пул макроуглей является информативным архивом как для оценки частоты пирогенных событий в прошлом, так и для уточнения генезиса и времени формирования морфонных мозаик. Данные палеоантропологического анализа не столь чувствительны. Преимущественный снос в одну из сторон ветром продуктов горения приводит к тому, что расположенные вблизи торфяные колонки могут не совпадать по крупным пикам содержания микроугольков, как это недавно показано [49]. Увеличение выборки и датирование отдельных макроуглей в почве позволяет учесть практически все инситные пожары.

Общим ограничением является эффект “встроенного возраста” — сгоревшая древесина имеет свой возраст, который может отличаться от времени пожара на сотни лет. Однако эта ошибка не представляется столь существенной из-за того, что при выгорании подстилок большое число углей образуется из опада ветвей и некрупных деревьев. При горении крупных старовозрастных стволов происходит их неполное сгорание, уголь чаще формируется из более молодой, внешней части ствола. Но, конечно, этот эффект является трудно прогнозируемым и может влиять на результаты, особенно в северных лесах, где разложение древесины замедленно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенной работы частично подтверждена гипотеза о том, что непрерывное существование лесной среды приводит к постоянному погружению древесных углей в почву и сохранению непрерывной истории лесных пожаров для отдельных ландшафтных фаций. Угли погружаются в основном за счет фитотурбаций, реже в результате засыпки в корневые каналы. Использованная выборка позволила определить частоту пирогенных событий во времени и выявить периоды повышенной горимости для последних 5 тыс. лет, с пиками пришедшимися на 4400–4600, 3400–3600 и 2400–2600 кал. л. н. Однако выборки оказались недостаточны для того, чтобы зафиксировать в почве более древние угли. Основные пики частоты пирогенных событий оказались более связаны со временем бытования археологических культур, чем с природными изменениями.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность профессору географического факультета МГУ М.И. Герасимовой и анонимным рецензентам за ценные советы по улучшению статьи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 21-54-75001-БФ_Почвы, а также по проекту НИР ИАЭТ СО РАН № 0264-2021-0008 “Изучение, сохранение и музеефикация археологического и этно-культурного наследия Сибири”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Табл. S1. Радиоуглеродные даты древесных углей.

Рис. S1–S21. Фотографии почв с датированными морфонами, содержащими угли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аветов Н.А., Аветян С.А., Маречек М.С., Цейц М.А.* Анализ строения и состава почвенного покрова Салым-Иртышского междуречья на основе актуализированной почвенной среднемасштабной карты // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2017. № 1. С. 3–8.
2. *Адаев В.Н.* Дым над тайгой и тундрой: огонь в культуре северных народов Западной Сибири как средство преобразования среды обитания // Вестник археологии, антропологии и этнографии. 2018. № 2(41). С. 138–147.
3. *Александров С.В., Пальянов П.В., Пономарева Т.М.* Аварийные раскопки городища Нехсап I на территории Средне-Угутского месторождения нефти // Древнее наследие Средней Оби на территории хозяйственного освоения ООО “РН-Юганскнефтегаз”. Екатеринбург: Магеллан, 2013. С. 287–297.
4. *Александровский А.Л., Ершова Е.Г., Пономаренко Е.В., Кренке Н.А., Скрипкин В.В.* Природно-антропогенные изменения почв и среды в пойме Москвы-реки в голоцене: педогенные, пылевые и антракологические маркеры // Почвоведение. 2018. № 6. С. 659–673.
5. *Антипина Т.Г., Панова Н.К.* Генезис и палеоэкология болот в голоцене на северо-западе Кондинской низменности (Западная Сибирь, Россия) // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее. Новосибирск, 4–17 августа 2014 г. Томск: Изд-во ТГУ, 2014. С. 260–262.
6. *Антипина Т.Г., Прейс Ю.И., Зенин В.Н.* Динамика лесной растительности и климата в южной тайге

- Западной Сибири в позднем голоцене по данным споро-пыльцевого анализа и AMS-датирования // Экология. 2019. № 5. С. 356–364.
7. *Бенькова В.Е., Швейнгрубер Ф.Х.* Анатомия древесины растений России. Атлас для идентификации древесины деревьев, кустарников, полукустарников и деревянистых лиан России. Бирменсдорф, Швейцарский Федеральный институт леса, снега и ландшафта. Берн, 2004. 456 с.
 8. *Бобровский М.В.* Лесные почвы Европейской России. Биотические и антропогенные факторы формирования / Под ред. А.С. Комарова. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 393 с.
 9. *Васенев И.И., Таргульян В.О.* Ветровал и таежное почвообразование: Режимы, процессы, морфогенез почвенных сукцессий. М.: Наука, 1995. 247 с.
 10. *Вольвах А.О., Вольвах Н.Е., Овчинников И.Ю., Маликов Д.Г., Щеглова С.Н.* Свидетельства потеплений, записанные в лёссовых отложениях последнего оледенения, и динамика лессонакопления в Северо-Западном Присалаирье (юго-восток Западной Сибири) // Геосферные исследования. 2020. № 3. С. 123–143.
 11. *Гаврилова И.П., Долгова Л.С.* Песчаные почвы среднетаежной подзоны Западной Сибири // Природные условия Западной Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1972. Вып. 2. С. 34–50.
 12. *Добровольский Г.В., Никитин Е.Д., Афанасьева Т.В.* Таежное почвообразование в континентальных условиях. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 216 с.
 13. *Дудко А.А.* Отчет об археологических раскопках на территории выявленных объектов культурного наследия “Группа впадин Кулунигый 64”, “Группа впадин Кулунигый 66” в Сургутском районе Ханты-Мансийского автономного округа-Югры в 2018 году (по открытому листу № 773 от 13 июня 2018 г.). Новосибирск: ИАЭТ СО РАН, 2019. Т. 1–4.
 14. *Дудко А.А., Васильева Ю.А.* Результаты спасательных археологических работ Юганского отряда в Сургутском районе Ханты-Мансийского автономного округа – Югры в 2019 году // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Новосибирск: Изд-во Ин-та археологии и этнографии СО РАН, 2019. Т. XXV. С. 774–777.
 15. *Дудко А.А., Васильева Ю.А.* Хронология грунтового могильника Кулунигый 64 (бассейн р. Большой Юган) // Тр. VI (XXII) Всерос. археол. съезда в Самаре. Самара: СГСПУ, 2020. Т. 1. С. 139–141.
 16. *Дудко А.А., Васильева Ю.А., Бычков Д.А.* Археологические полевые работы Юганского отряда ИАЭТ СО РАН в бассейне реки Большой Юган // Археологические открытия. 2018 год. М.: Ин-т археологии РАН, 2020. С. 422–425.
 17. *Дудко А.А., Васильева Ю.А., Бычков Д.А.* Результаты полевых археологических работ Юганского отряда в Сургутском районе Ханты-Мансийского автономного округа-Югры в 2018 году // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Новосибирск: Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2018. Т. 24. С. 470–473.
 18. *Зайцева Е.А.* Археологическая карта Сургутского Приобья. Новосибирск: Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2013. 199 с.
 19. *Зыков А.П.* Барсова Гора: очерки археологии Сургутского Приобья. Средневековье и Новое время. Екатеринбург: Уральский рабочий, 2012. 232 с.
 20. *Кардаш О.В., Чаиркина Н.М., Дубовцева Е.Н., Пищонко Х.* Новые исследования городища раннего неолита Каюково-2 на севере Западной Сибири // Вестник Новосибирского гос. ун-та. Сер. История, филология. 2020. Т. 19. № 7. С. 109–124.
 21. *Карпенко Л.В., Прокушкин А.С.* Реконструкция пожаров в девственных лесах на междуречье Сым-Дубчес в голоцене // Сибирский лесной журн. 2019. № 5. С. 61–69.
 22. *Классификация и диагностика почв России.* М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1997. 235 с.
 23. *Кузьмина Д.М.* Некоторые механизмы формирования морфонов в подзолах северной тайги Западной Сибири // Мат-лы по изучению русских почв. СПб, 2017. Вып. 9(36). С. 172–177.
 24. *Куприянов Д.А., Новенко Е.Ю.* Реконструкция динамики лесных пожаров Центральной Мещеры в голоцене (по данным палеоантракологического анализа) // Сибирский экологический журн. 2019. № 3. С. 253–263. <https://doi.org/10.15372/SEJ20190302>
 25. *Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А. и др.* Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула: Гриф и К, 2001. 584 с.
 26. *Лойко С.В., Бобровский М.В., Кузьмина Д.М., Лим А.Г., Крицков И.В., Истигачев Г.И.* Происхождение “языков” и “карманов” в северотаежных подзолах Западной Сибири // Почва – зеркало и память ландшафта. Киров, 2015. С. 45–51.
 27. *Магур М.Г., Бляхарчук Т.А., Бляхарчук П.А.* Динамика увлажненности крупнобугристого торфяного болота в голоцене (северная тайга Западной Сибири) // Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири. Томск, 2015. С. 33–37.
 28. *Махонина Г.И., Коркина И.Н.* Развитие подзолистых почв на археологических памятниках в подзоне средней тайги Западной Сибири // Почвоведение. 2002. № 8. С. 917–927.
 29. *Мульдьяров Е.Я., Лапшина Е.Д., Кременецкий К., Переводчиков Е.В.* История развития и строение торфяных залежей болот северной тайги Западной Сибири // West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present, proceedings of the second international field symposium (Ноябрьск, 18–22 августа) Новосибирск, 2001. С. 41–44.
 30. *Научно-прикладной справочник по климату СССР.* Сер. 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 17. Тюменская и Омская области. СПб.: Гидрометеоздат, 1998. 703 с.
 31. *Панова Н.К., Трофимова С.С., Антипина Т.Г., Зиновьев Е.В., Гилев А.В., Ерохин Н.Г.* Динамика расти-

- тельности и экологических условий в голоцене на южном Ямале (по данным комплексного анализа отложений реликтового торфяника) // Экология. 2010. № 1. С. 22–30.
32. *Петров Д.Г.* Пути миграции углистых частиц в постпирогенных почвах тайги и тундры в зависимости от особенностей пожара и факторов среды // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2020. Вып. 105. С. 109–145.
 33. *Пономарева О.Е., Гравис А.Г., Бляхарчук Т.А., Бочкарев Ю.Н., Устинова Е.В., Бердников Н.М., Москаленко Н.Г.* Реакция островной криолитозоны северной тайги Западной Сибири на изменение климата // Мат-лы пятой конф. геокриологов России. 2016. С. 107–114.
 34. *Пономаренко Е.В., Пономаренко Д.С., Сташенков Д.А., Кочкина А.Ф.* Подходы к реконструкции динамики заселения территории по почвенным признакам // Поволжская археология. 2015. Т. 1(11). С. 126–160.
 35. *Рудковская М.А.* Селище раннего железного века Негусьях // Древнее наследие Средней Оби на территории хозяйственного освоения ООО “РН-Юганскнефтегаз”. Екатеринбург: Магеллан, 2013. С. 116–138.
 36. *Скворцова Е.Б., Уланова Н.Г., Басевич В.Ф.* Экологическая роль ветровалов. М.: Лесная промышленность, 1983. 192 с.
 37. *Чемякин Ю.П.* Барсова гора: очерки археологии Сургутского Приобья. Древность. Сургут–Омск: ОАО “Омский дом печати” 2008. 224 с.
 38. *Чендев Ю.Г., Ершова Е.Г., Александровский А.Л., Пономаренко Е.В., Гольева А.А., Хохлова О.С., Русаков А.В., Шаповалов А.С.* Почвенные и ботанические записи изменения природной среды Ямской степи в голоцене // Изв. РАН. Сер. географическая. 2016. № 2. С. 75–89.
 39. *Amon L., Blaus A., Alliksaar T., Heinsalu A., Lapshina E., Liiv M., Reitalu T., Vassiljev J., Veski S.* Postglacial flooding and vegetation history on the Ob River terrace, central Western Siberia based on the palaeoecological record from Lake Svetlenkoye // Holocene. 2020. V. 30(5). P. 618–631.
<https://doi.org/10.1177/0959683619895582>
 40. *Andreev A.A., Pierau R., Kalugin I.A., Daryin A.V., Smolyaninova L.G., Diekmann B.* Environmental changes in the northern Altai during the last millennium documented in Lake Teletskoye pollen record // Quater. Res. 2007. V. 67. P. 394–399.
<https://doi.org/10.1016/j.yqres.2006.11.004>
 41. *Barhoumi C., Ali A.A., Peyron O., Dugerdil L., Borisova O., Golubeva Y., Subetto D. et al.* Did long-term fire control the coniferous boreal forest composition of the northern Ural region (Komi Republic, Russia)? // J. Biogeography. 2020. V. 47(11). P. 2426–2441.
<https://doi.org/10.1111/jbi.13922>
 42. *Bobrovsky M.V.* The history of fires in old-growth korean pine – broadleaved forests in the middle reaches of the Bikin river (western slope of the Sykhote-Alin mountains) according to dendrochronological and pedoanthracological data // Russ. J. Ecosystem Ecology. 2019. V. 4.
<https://doi.org/10.21685/2500-0578-2019-1-2>
 43. *Bobrovsky M.V., Kupriaynov D.A., Khanina L.G.* Anthracological and morphological analysis of soils for the reconstruction of the forest ecosystem history (Meshchera Lowlands, Russia) // Quater. Int. 2019. V. 516. P. 70–82.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.06.033>
 44. *Bobrovsky M.V., Loyko S.V.* Patterns of pedoturbation by tree uprooting in forest soils // Russ. J. Ecosystem Ecology. 2016. V. 1.
<https://doi.org/10.21685/2500-0578-2016-1-3>
 45. *Carcaillet C., Thinon M.* Pedoanthracological contribution to the study of the evolution of the upper treeline in the Maurienne Valley (North French Alps): Methodology and preliminary data // Rev. Palaeobotany Palynology. 1996. V. 91. № 1–4. P. 399–416.
[https://doi.org/10.1016/0034-6667\(95\)00060-7](https://doi.org/10.1016/0034-6667(95)00060-7)
 46. *Compostella C., Trombino L., Caccianiga M.* Late Holocene soil evolution and treeline fluctuations in the Northern Apennines // Quater. Int. 2013. V. 289. P. 46–59.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.02.011>
 47. *de Lafontaine G., Asselin H.* Soil charcoal stability over the Holocene across boreal northeastern North America // Quater. Res. 2011. V. 76. № 2. P. 196–200.
<https://doi.org/10.1016/j.yqres.2011.06.006>
 48. *Dyakonov K.N., Novenko E.Y., Mironenko I.V., Kupriyanov D.A., Bobrovsky M.V.* The role of fires in the Holocene landscape dynamics of the southeastern part of Meshchera Lowlands // Dokl. Earth Sci. 2017. V. 477. P. 1336–1342.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X17110125>
 49. *Feurdean A., Florescu G., Tanțău I., Vanni ere B., Diaconu A.-C., Pfeiffer M., Warren D., Hutchinson S.M., Gorina N., Gațka M., Kirpotin S.* Recent fire regime in the southern boreal forests of western Siberia is unprecedented in the last five millennia // Quater. Sci. Rev. 2020. V. 244. 106495.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106495>
 50. *Feurdean A., Gațka M., Florescu G., Diaconu A.-C., Tanțău I., Kirpotin S., Hutchinson S.M.* 2000 years of variability in hydroclimate and carbon accumulation in western Siberia and the relationship with large-scale atmospheric circulation: A multi-proxy peat record // Quater. Sci. Rev. 2019. V. 226. 105948.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.105948>
 51. *Feurdean A., Vanni ere B., Finsinger W., Warren D., Connor S.C., Forrest M., Liakka J. et al.* Fire hazard modulation by long-term dynamics in land cover and dominant forest type in eastern and central Europe // Biogeosciences. 2020. V. 17(5). P. 1213–1230.
<https://doi.org/10.5194/bg-17-1213-2020>
 52. *Gavin D.G.* Forest soil disturbance intervals inferred from soil charcoal radiocarbon dates // Can. J. Forest Res. 2003. V. 33(12). P. 2514–2518.
<https://doi.org/10.1139/x03-185>
 53. *Gavin D.G., Brubaker L.B., Lertzman K.P.* Holocene fire history of a coastal temperate rain forest based on soil charcoal radiocarbon dates // Ecology. 2003.

- V. 84(1). P. 186–201.
[https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2003\)084\[0186:HFHOAC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2003)084[0186:HFHOAC]2.0.CO;2)
54. *Glaser B., Birk J.J.* State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio) // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2012. V. 82. P. 39–51.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.11.029>
 55. *Hardy B., Cornelis J.-T., Houben D., Lambert R., Dufey J.E.* The effect of pre-industrial charcoal kilns on chemical properties of forest soil of Wallonia, Belgium // *Eur. J. Soil Sci.* 2016. V. 67(2). P. 206–216.
<https://doi.org/10.1111/ejss.12324>
 56. *Hardy B., Cornelis J.-T., Houben D., Leifeld J., Lambert R., Dufey J.E.* Evaluation of the long-term effect of biochar on properties of temperate agricultural soil at pre-industrial charcoal kiln sites in Wallonia, Belgium // *Eur. J. Soil Sci.* 2017. V. 68(1). P. 80–89.
<https://doi.org/10.1111/ejss.12395>
 57. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Report No. 106. FAO, Rome, 2015. 192 p.
 58. *Jankowski M.* The evidence of lateral podzolization in sandy soils of northern Poland // *Catena.* 2014. V. 112. P. 139–147.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.03.013>
 59. *Kaiser K., Schneider T., Küster M., Dietze E., Fülling A., Heinrich S., Kappler C. et al.* Palaeosols and their cover sediments of a glacial landscape in northern central Europe: Spatial distribution, pedostratigraphy and evidence on landscape evolution // *Catena.* 2020. V. 193. 104647.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104647>
 60. *Kappler C., Kaiser K., Küster M., Nicolay A., Fülling A., Bens O., Raab T.* Late Pleistocene and Holocene terrestrial geomorphodynamics and soil formation in north-eastern Germany: a review of geochronological data // *Phys. Geography.* 2019. V. 40(5). P. 405–432.
<https://doi.org/10.1080/02723646.2019.1573621>
 61. *Konstantinov A., Loiko S., Kurasova A., Konstantinova E., Novoselov A., Istigechev G., Kulizhskiy S.* First findings of buried late-glacial paleosols within the dune fields of the Tomsk Priobye region (SE western Siberia, Russia) // *Geosciences (Switzerland).* 2019. V. 9(2). 82.
<https://doi.org/10.3390/geosciences9020082>
 62. *Kupriyanov D.A., Novenko E.Y.* Reconstruction of the Holocene dynamics of forest fires in the central part of Meshcherskaya lowlands according to antracological analysis // *Contemp. Probl. Ecol.* 2019. V. 12. P. 204–212.
<https://doi.org/10.1134/S1995425519030065>
 63. *Kurasova A.O., Konstantinov A.O., Kulizhskiy S.P., Konstantinova E.Y., Khoroshavin V.Y., Loyko S.V.* Patterns of soil cover organization within the northern part of the Kondinskaya lowland (Western Siberia) // *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Biologiya.* 2020. V. 49. P. 6–24.
<https://doi.org/10.17223/19988591/49/1>
 64. *Kuzzyakov Y., Bogomolova I., Glaser B.* Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific ¹⁴C analysis // *Soil Biol. Biochem.* 2014. V. 70. P. 229–236.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.12.021>
 65. *Lamentowicz M., Słowiński M., Marcisz K., Zielińska M., Kaliszczan K., Lapshina E., Gilbert D. et al.* Hydrological dynamics and fire history of the last 1300 years in western Siberia reconstructed from a high-resolution, ombrotrophic peat archive // *Quarter. Res.* 2015. V. 84(3). P. 312–325.
<https://doi.org/10.1016/j.yqres.2015.09.002>
 66. *Lertzman K., Gavin D., Hallett D., Brubaker L., Lepofsky D., Mathewes R.* Long-term fire regime estimated from soil charcoal in coastal temperate rainforests // *Ecology and Society.* 2002. V. 6(2).
<https://doi.org/10.5751/es-00432-060205>
 67. *Lindsakoug H.B., Villafañez E.A.* Fire ecology, past landscapes and human interaction: contributions from pedoanthracology, Balcosna Valley, Catamarca, North-western Argentina // *Archaeological and Anthropological Sciences.* 2020. V. 12(7). P. 154.
<https://doi.org/10.1007/s12520-020-01108-z>
 68. *Magne G., Brossier B., Gandouin E., Paradis L., Drobyshch I., Kryshen A., Hély C., Alleaume S., Ali A.A.* Lacustrine charcoal peaks provide an accurate record of surface wildfires in a North European boreal forest // *Holocene.* 2020. V. 30(3). P. 380–388.
<https://doi.org/10.1177/0959683619887420>
 69. *Matthews J.A., Seppälä M.* Holocene colluvial chronology in a sub-arctic esker landscape at Kuttanen, Finnish Lapland: Kettleholes as geo-ecological archives of interactions amongst fire, vegetation, soil, climate and geomorphological instability // *Boreas.* 2015. V. 44(2). P. 343–367.
<https://doi.org/10.1111/bor.12107>
 70. *Matthews J.A., Seppälä M., Dresser P.Q.* Holocene solifluction, climate variation and fire in a subarctic landscape at Pippokangas, Finnish Lapland, based on radiocarbon-dated buried charcoal // *J. Quarter. Sci.* 2005. V. 20(6). P. 533–548.
<https://doi.org/10.1002/jqs.932>
 71. *Mazei Y.A., Tsyganov A.N., Bobrovsky M.V., Mazei N.G., Kupriyanov D.A., Gałka M., Rostanets D.V. et al.* Peatland development, vegetation history, climate change and human activity in the Valdai uplands (Central European Russia) during the Holocene: A multi-proxy palaeoecological study // *Diversity.* 2020. V. 12. 462.
<https://doi.org/10.3390/d12120462>
 72. *Mergelov N., Petrov D., Zazovskaya E., Dolgikh A., Golyeva A., Matskovsky V., Bichurin R., et al.* Soils in karst sinkholes record the Holocene history of local forest fires at the north of European Russia // *Forests.* 2020. V. 11(12). P. 1268.
<https://doi.org/10.3390/f11121268>
 73. *Novák J., Trotsiuk V., Sýkora O., Svoboda M., Chytrý M.* Ecology of Tilia sibirica in a continental hemiboreal forest, southern Siberia: An analogue of a glacial refugium of broad-leaved temperate trees? // *Holocene.*

2014. V. 24(8). P. 908–918.
<https://doi.org/10.1177/0959683614534744>
74. *Novenko E.Y., Tsyganov A.N., Mazei N.G., Kupriyanov D.A., Rudenko O.V., Bobrovsky M.V., Erman N.M., Nizovtsev V.A.* Palaeoecological evidence for climatic and human impacts on vegetation in the temperate deciduous forest zone of European Russia during the last 4200 years: A case study from the Kaluzhskiye Zaseki Nature Reserve // *Quat. Int.* 2019. V. 516. P. 58–69.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.06.028>
75. *Novenko E.Y., Tsyganov A.N., Volkova E.M., Kupriyanov D.A., Mironenko I.V., Babeshko K.V., Utkina A.S., Popov V., Mazei Y.A.* Mid-and Late Holocene vegetation dynamics and fire history in the boreal forest of European Russia: A case study from Meshchera Lowlands // *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 2016. V. 459. P. 570–584.
<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.08.004>
76. *Ohlson M., Dahlberg B., Økland T., Brown K.J., Halvorsen R.* The charcoal carbon pool in boreal forest soils // *Nature Geoscience.* 2009. V. 2(10). P. 692–695.
<https://doi.org/10.1038/ngeo617>
77. *Ohlson M., Kasin I., Wist A.N., Bjune A.E.* Size and spatial structure of the soil and lacustrine charcoal pool across a boreal forest watershed // *Quart. Res.* 2013. V. 80(3). P. 417–424.
<https://doi.org/10.1016/j.yqres.2013.08.009>
78. *Ohlson M., Tryterud E.* Interpretation of the charcoal record in forest soils: Forest fires and their production and deposition of macroscopic charcoal // *Holocene.* 2000. V. 10(4). P. 519–525.
<https://doi.org/10.1191/095968300667442551>
79. *Philben M., Kaiser K., Benner R.* Biochemical evidence for minimal vegetation change in peatlands of the West Siberian Lowland during the Medieval Climate Anomaly and Little Ice Age // *J. Geophys. Res.: Biogeosciences.* 2014. V. 119(5). P. 808–825.
<https://doi.org/10.1002/2013JG002396>
80. *Pitkänen A., Turunen J., Tahvanainen T., Tolonen K.* Holocene vegetation history from the Salym-Yugan Mire Area, West Siberia // *Holocene.* 2002. V. 12(3). P. 353–362.
<https://doi.org/10.1191/0959683602h1533rp>
81. *Ponomarenko E., Tomson P., Ershova E., Bakumenko V.* A multi-proxy analysis of sandy soils in historical slash-and-burn sites: A case study from southern Estonia // *Quart. Int.* 2019. V. 516. P. 190–206.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.10.016>
82. *Ponomarenko E.V., Ershova E.G., Stashenkov D.A., Ponomarenko D.S., Kochkina A.F.* Tracing land use history using a combination of soil charcoal and soil pollen analysis: An example from colluvial deposits of the Middle Volga region // *J. Archaeological Sci.: Reports.* 2020. V. 31. P. 102269.
<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102269>
83. *Reimer P.J., Austin W.E.N., Bayliss A., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Butzin M. et al.* The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP) // *Radiocarbon.* 2020. V. 62(4). P. 725–757.
<https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
84. *Reisser M., Purves R.S., Schmidt M.W.I., Abiven S.* Pyrogenic carbon in soils: A literature-based inventory and a global estimation of its content in soil organic carbon and stocks // *Frontiers Earth Sci.* 2016. V. 4. P. 80.
<https://doi.org/10.3389/feart.2016.00080>
85. *Robin V., Nelle O.* Contribution to the reconstruction of central European fire history, based on the soil charcoal analysis of study sites in northern and central Germany // *Vegetation History and Archaeobotany.* 2014. V. 23(S1). P. 51–65.
<https://doi.org/10.1007/s00334-014-0438-2>
86. *Šamonil P., Daněk P., Schaetzl R.J., Vašíčková I., Valtera M.* Soil mixing and genesis as affected by tree uprooting in three temperate forests // *Eur. J. Soil Sci.* 2015. V. 66(3). P. 589–603.
<https://doi.org/10.1111/ejss.12245>
87. *Šamonil P., Schaetzl R.J., Valtera M., Goliáš V., Baldrian P., Vašíčková I., Adam D., Janík D., Hort L.* Crossdating of disturbances by tree uprooting: Can treethrow microtopography persist for 6000 years? // *Forest Ecology and Management.* 2013. V. 307. P. 123–135.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.06.045>
88. *Šamonil P., Valtera M., Schaetzl R.J., Adam D., Vašíčková I., Daněk P., Janík D., Tejnecký V.* Impacts of old, comparatively stable, treethrow microtopography on soils and forest dynamics in the northern hardwoods of Michigan, USA // *Catena.* 2016. V. 140. P. 55–65.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.006>
89. *Sizov O., Konstantinov A., Volvakh A., Molodkov A.* Timing and sedimentary record of late quaternary fluvio-aolian successions of the Tura-Pyshma interfluvio (SW Western Siberia, Russia) // *Geosciences (Switzerland).* 2020. V. 10(10). 396. P. 1–19.
<https://doi.org/10.3390/geosciences10100396>
90. *Tarasov P.E., Guiot J., Cheddadi R., Andreev A.A., Bezusko L.G., Blyakharchuk T.A., Dorofeyuk N.I. et al.* Climate in northern Eurasia 6000 years ago reconstructed from pollen data // *Earth Planetary Sci. Lett.* 1999. V. 171(4). P. 635–645.
[https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00171-5](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00171-5)
91. *Tomson P., Kaart T., Sepp K.* Forest soil charcoal and historical land use // *Baltic Forestry.* 2021. V. 27(1). P. 1–8.
<https://doi.org/10.46490/BF478>
92. *Tsyganov A.N., Zarov E.A., Mazei Y.A., Kulkov M.G., Babeshko K.V., Yushkovets S.Y., Payne R.J. et al.* Key periods of peatland development and environmental changes in the middle taiga zone of Western Siberia during the Holocene // *Ambio.* 2021.
<https://doi.org/10.1007/s13280-021-01545-7>
93. *Turunen J., Tahvanainen T., Tolonen K., Pitkänen A.* Carbon accumulation in West Siberian mires, Russia // *Global Biogeochem. Cycles.* 2001. V. 15(2). P. 285–296.
<https://doi.org/10.1029/2000GB001312>

Charcoals of Albic Podzols of the Middle Taiga of Western Siberia as Indicator of Ecosystem History

S. V. Loiko^{1, *}, D. M. Kuzmina¹, A. A. Dudko², A. O. Konstantinov³,
Yu. A. Vasilyeva², A. O. Kurasova^{1, 3}, A. G. Lim¹, and S. P. Kulizhsky¹

¹ Tomsk State University, Lenin Avenue, 36, Tomsk, 634050 Russia

² Institute of Archeology and Ethnography SB RAS, Prospect Akademika Lavrent'eva, 17, Novosibirsk, 630090 Russia

³ Tyumen State University, Volodarskogo Street, 6, Tyumen, 625003 Russia

*e-mail: s.loiko@yandex.ru

The study of soil charcoal as an informative proxy for paleoecological research is actively developing in Russia and the world. However, pedoanthracological studies are still sporadic for such large areas as the taiga of the West Siberian Plain. This work was performed to assess pedoanthracological approaches to the study of the local history of the boreal ecosystems of the middle taiga of Western Siberia. The radiocarbon age of 31 charcoal of Albic Podzol of the ancient aeolian dune has been established. Morphological patterns with dated charcoals have also been typed. The research was carried out in the basin of the Bolshoi Yugan River near the site of large-scale archaeological research. The morphological patterns of the formation date showed the radiocarbon age of the charcoal. The main reason for sinking charcoal into the soil was windthrown tree and charcoal backfill in root canals. All the charcoals studied were less than five thousand calibrated years. The appearance of morphones with charcoal in soils coincided with the appearance and thickening of podzolic horizons. At the beginning of the third millennium, there was a twofold increase in the frequency of pyrogenic events. The maximum of pyrogenic events was in the middle of the third millennium. The frequency of occurrence of pyrogenic events decreased at the very end of the second millennium. The periods with the largest number of pyrogenic events of the last five millennia roughly coincided with the periods of existence of archaeological cultures. Thus, in the middle taiga forest in the center of Western Siberia, conditions for the constant occurrence of fires and the burial of coals in the soil existed for five thousand years. This process formed the fire record in the podzol. The study of charcoal allows us to reconstruct the history of the local ecosystem.

Keywords: Albic Podzols, pedoanthracology, soil morphones, soil genesis, radiocarbon age, archeology of the Surgut Ob region