

УДК 551.4.012→551.89(470.56)

МЕТОД АНАЛИЗА МАКРОСКОПИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ УГЛЯ В ОЗЕРНЫХ И БОЛОТНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПО ЦИФРОВОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ ДЛЯ ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЙ[#]

© 2025 г. А. Е. Шатунов^{1,*}, Н. Г. Мазей^{2,**}, Е. Ю. Новенко^{1,***}

¹ Институт географии РАН, Москва, Россия,

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

* E-mail: toxavilli@yandex.ru

** E-mail: natashamazei@mail.ru

*** E-mail: lenanov@mail.ru

Поступила в редакцию 24.09.2024 г.

После доработки 05.11.2024 г.

Принята к публикации 10.01.2025 г.

Анализ макроскопических частиц угля в отложениях различного генезиса – один из наиболее распространенных подходов к реконструкции пожарных режимов в прошлом. Метод отличается большими затратами времени и труда исследователей, поскольку требует непрерывного отбора образцов из разреза и подсчета всех угольных частиц с линейными размерами более 125 мкм в образце фиксированного объема. В статье представлен разработанный нами автоматический метод подсчета макроскопических частиц угля с использованием анализа изображений, который легко воспроизводим, не требователен к технике, быстр, позволяет получить дополнительную палеоэкологическую информацию на основании изучения геометрических характеристик и площади частиц. Сравнение результатов, полученных путем стандартного ручного подсчета количества угольных частиц в тестовых образцах и определения количества частиц по изображению показало точность метода, достаточную для палеогеографических реконструкций: коэффициент корреляции Спирмена $R = 0.85$, $R^2 = 0.71$, MAPE = 31.58% (средняя абсолютная ошибка, выраженная в процентах), сравнение определения площади частиц выявило $R = 0.99$, $R^2 = 0.98$, MAPE = 21.45%. В качестве демонстрации возможностей разработанного метода в статье представлены результаты его применения по данным изучения болота Побочного (национальный парк “Бузулукский бор”, Оренбургская область). Были проанализированы 1000 образцов для 10 м отложений, накопившихся в течение 11.4 тыс. лет, обработано 6000 изображений. В результате анализа была определена не только скорость аккумуляции частиц угля, выявлены пожарные эпизоды и рассчитан межпожарный интервал, но и выполнена классификация частиц угля по морфотипам на травяной и древесный, а также оценены размеры угольных частиц, поступающих во время пожарных эпизодов, что позволило получить дополнительную палеоэкологическую информацию о пожарах в голоцене.

Ключевые слова: макрочастицы угля; автоматический подсчет; размеры углей; площади углей; морфотипы углей; палеопожары; травяной уголь; древесный уголь; межпожарный интервал; частота пожаров

DOI: 10.31857/S2949178925020118, **EDN:** GQLSPS

1. ВВЕДЕНИЕ

Пожары оказывают существенное влияние на структуру и динамику лесных экосистем (Фурьев, 1996; Седых, 2009; Санников и др., 2012; Sannikov, Goldammer, 1996; Bond et al., 2005; Słowiński et al.,

2019). К сожалению, долгопериодную динамику пожарных режимов невозможно оценить по имеющимся к настоящему моменту данным краткосрочных прямых наблюдений (Сухомилова, 2013; Dellasala, Hanson, 2015). Информацию о взаимосвязях между периодичностью и интенсивностью лесных пожаров и изменениями климата, растительного покрова и антропогенной нагрузки могут дать реконструкции пожарных событий в голоцене по результатам изучения различных палеогеографических архивов (Bowman et al., 2009).

Надежным индикатором для выявления пожаров в прошлом служит наличие частиц угля, кото-

[#] Ссылка для цитирования: Шатунов А. Е., Мазей Н. Г., Новенко Е. Ю. (2025) Метод анализа макроскопических частиц угля в озерных и болотных отложениях по цифровому изображению для палеогеографических реконструкций. *Геоморфология и палеогеография*. Т. 56. № 2. С. 341–354. <https://doi.org/10.31857/S2949178925020118>; <https://elibrary.ru/GQLSPS>

рые образовались в результате неполного сгорания органического вещества. Его рассеивание и осаждение в озерных и болотных отложениях приводит к консервации частиц, что обеспечивает их сохранность на протяжении длительного времени, и позволяет проводить реконструкции пожарных событий (Conedera et. al., 2009). Частицы угля, попавшие в отложения, разделяют на две категории: микрочастицы <125 мкм и макрочастицы >125 мкм (Mooney, Tinner, 2011). Микрочастицы угля, как правило, отражают региональный сигнал, а накопление макрочастиц может указывать как на локальные (1–3 км), так и на более отдаленные пожары (20–100 км) (Fletcher et al, 2015).

Большинство реконструкций палеопожаров как в зарубежных (Connor, 2013; Calder et al., 2015; Luelmo-Lautenschlaeger et al., 2019; Lestienne et al., 2020; Muñoz et al., 2023), так и в отечественных работах (Куприянов, Новенко, 2021; Нестерова, Рябогина, 2022; Рогозин и др., 2023; Пупышева, Бляхарчук, 2024) основано на оценке количества макроскопических частиц угля в отложениях; доля исследований, опирающихся на данные о площади частиц угля, их размеры либо разделение на классы также растет, однако, это преимущественно ручной анализ (Mustaphi, Pisaric, 2018; Rudaya et al., 2020; Słowiński et al., 2022; Zabel et al., 2022). Очевидно, что использование данных о площади макроуглей в образце позволяет избежать ошибок из-за механического разрушения частиц, в результате которого увеличивается количество частиц, а их суммарная площадь остается прежней. Кроме этого, анализ изображений позволяет получить геометрические характеристики каждой частицы и дополнительную информацию об источнике биомассы (классификации по соотношению длины и ширины частицы), что было показано в работах (Vachula et al., 2021; Feurdean et al., 2023).

Использование анализа изображений для снижения трудоемкости подсчета частиц угля было предложено в работе (Mooney, Tinner, 2011), которые применили глобальный порог на черно-белом изображении для отделения угольных частиц от фона (глобальный порог — это использование одного значения для всех пикселей, выше которого пиксели относятся к одному классу, а ниже — к другому), но без указания точности подсчета. Далее анализ изображений используется для оценки общей площади частиц в образце, но количество все еще подсчитывается вручную (Leys et. al, 2013). Затем данный метод был развит в работе (Hallsall et. al, 2018), где главный акцент был сделан на определении массы частиц с помощью анализа изображения, а также приведены значения коэффициента корреляции Спирмена между массой и площадью

частиц. В работе (Feurdean, 2021) был предложен способ выявления макрочастиц угля с использованием метода водораздела на черно-белом изображении для получения более достоверной оценки числа углей и их площади, но точность выделения также не сообщается. Полуавтоматический метод подсчета макрочастиц угля на изображении с оценкой точности был разработан как плагин CharTool (Snitker, 2020) для программы ImageJ (Ferreira, Rasband, 2012). При использовании этого инструмента оператору необходимо на фотографии самостоятельно идентифицировать частицу и оцифровать ее, выделив контуром, либо подобрать порог выделения (Snitker, 2020). В исследовании (Lesven et.al., 2022) было впервые предложено использовать для автоматического обнаружения частиц угля цветное изображение и рассчитать индексы, на основе красного, синего и зеленого каналов для повышения точности выявления частиц и подсчета их площади. Коэффициент корреляции Спирмена для величин количества и площади угольных частиц между подсчитанными вручную и полученными при помощи анализа изображений составил 0.605 и 0.624 соответственно. Авторы отмечают, что подсчет частиц в одном образце в среднем занимает 15–20 минут, что соответствует времени, затраченному при ручном подсчете (Lesven et.al., 2022). Наиболее точный и передовой способ подсчета, анализа формы и размеров макрочастиц угля — это использование нейросетей для анализа, при котором достигнута точность выделения частиц 96% и точность определения класса их морфотипов 74% (Rehn et al., 2019). К сожалению, этот метод требует большую обучающую выборку и мощный компьютер.

В представленной работе мы разработали метод подсчета макроскопических частиц угля с использованием анализа изображений, который легко воспроизводим, не требователен к технике, быстр, позволяет получить дополнительную палеоэкологическую информацию на основании изучения геометрических характеристик частиц, провести разделение частиц на травяные и древесные угли. В качестве демонстрации возможностей разработанного метода в статье представлены результаты его применения к торфяным отложениям болота Побочного (национальный парк “Бузулукский бор”, Оренбургская область).

2. МЕТОДЫ

2.1. Подготовка образцов для анализа макроскопических частиц угля в торфе

Наиболее распространенная методика подготовки проб для анализа (Mooney, Tinner, 2011) включает непрерывный отбор из керна проб фиксированно-

го объема с дальнейшим обесцвечиванием темных растительных остатков раствором H_2O_2 либо $NaOCl$ в течение суток и более. Далее образец промывают через сито с диаметром ячеек 125 мкм (реже используют диаметр ячеек 150 мкм) и помещают в чашку Петри; затем все угольные частицы, содержащиеся в образце, подсчитывают под биноклем.

2.2. Подготовка тестовых образцов

При разработке метода подсчета макроскопических частиц угля с использованием анализа изображений была изготовлена серия тестовых образцов. Для получения угольных макрочастиц была взята смесь из древесины и коры сосны, ели, дуба и липы (длиной от 3 до 5 см, шириной около 1 см, толщиной 0.5–1 см). Затем образцы были сложены в стальные боксы, закрыты фольгой и помещены в муфельную печь при температуре $550^\circ C$ на 15 минут. После прокаливания весь материал был раздроблен в фарфоровой ступке до типичных наблюдаемых в торфе размеров частиц несильными ударами пестика. Полученная масса была разделена на 12 равных образцов, которые затем были помещены в лабораторные стаканы. К 6 образцам было добавлено по 1 см^3 древесно-осокового торфа, подготовленного согласно методике (Mooney, Tinner, 2011). Предварительно образцы торфа были просмотрены на наличие макрочастиц угля. Отбирали только чистые образцы. Далее все подготовленные пробы были помещены в 5%-ный раствор перекиси водорода на сутки и затем промыты через сито с диаметром ячеек 125 мкм. Количество макроскопических частиц угля в каждом образце было подсчитано с использованием бинокля MOTIC SMZ-171 при 20-кратном увеличении.

2.3. Получение изображения

Для получения изображения чашка Петри, в которой находился анализируемый образец, была размечена на шесть сегментов красной краской (рис. 1а). Размер сегментов был выбран таким образом, чтобы на одном изображении при фотографировании через бинокль помещался один сегмент. При последующей обработке фотографий каждый сегмент обрезаается, что позволяет избежать повторного учета частиц угля в одном образце на разных изображениях. Красный цвет был выбран, поскольку он хорошо выделяется на изображении, что облегчает обрезание сегмента.

В образцах, к которым был добавлен торф, плавающие на воде растительные остатки, скрывающие уголь, были придавлены специально сконструированным прессом (рис. 1б), состоящим из ножки, твердого каркаса и натянутой на него сетки с диаметром ячеек 125 мкм. Затем чашка Петри переворачивалась и ставилась на ножку пресса. Таким способом удалось уменьшить площадь перекрытия частиц угля растительными остатками (рис. 1в). Для более точного подсчета частиц при работе с реальными образцами, содержащими много торфа, имеет смысл предварительно по возможности убрать торф иглой.

Далее каждый сегмент фотографировался через бинокль MOTIC SMZ-171 при 7.5-кратном увеличении с помощью камеры телефона sm-s908e/ds с разрешением 3456×4608 пикселей в RGB. Для подсчета количества макрочастиц угля в каждом образце сделано 6 фото. В результате было получено 72 тестовых изображения, половина из которых содержала только макрочастицы угля,

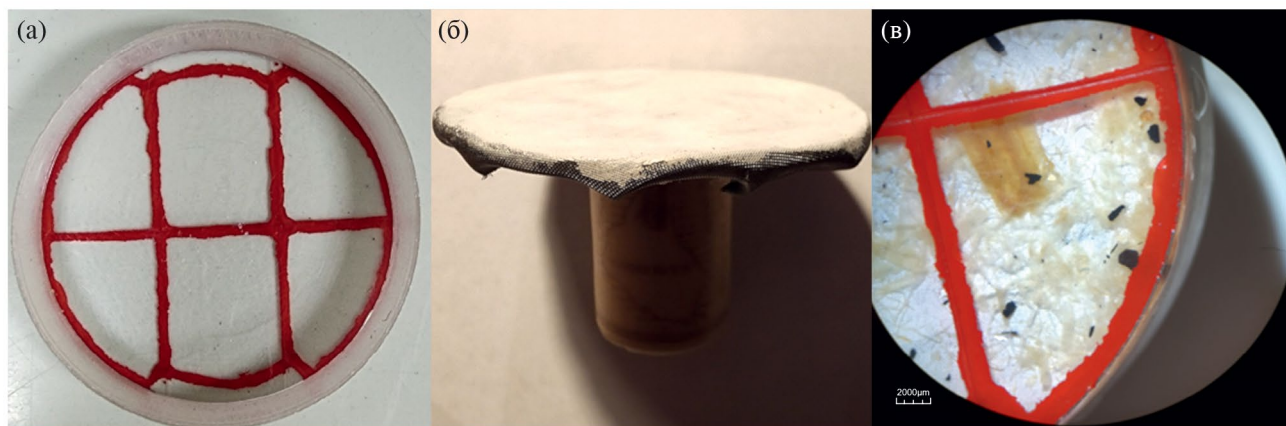


Рис. 1. Подготовленная для анализа изображения пустая разделенная на 6 сегментов чашка Петри (а), сконструированный пресс (б) и пример получаемого изображения сегмента, увеличенного в 7.5 раза (в).

Fig. 1. An empty Petri dish divided into 6 segments prepared for image analysis (a), a constructed press (б) and an example of the resulting image of a segment magnified 7.5 times (v).

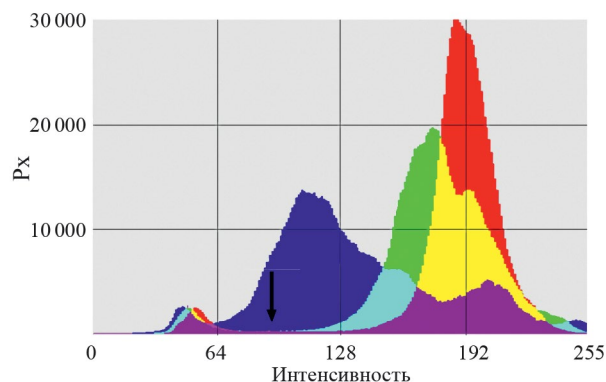


Рис. 2. Распределение интенсивности пикселей на изображении, подготовленном для подсчета макроскопических частиц угля в образцах отложений для красного, зеленого и синего цветов. Голубым цветом на гистограмме показаны области пересечения синего и зеленого цветов, желтым — зеленого и красного. Темной стрелкой отмечен минимум между двумя максимумами на гистограмме, по которому определяются, относится пиксель к угольной частице или к фону. Пик слева преимущественно относится к угольным частицам, пик справа — к фону.

Fig. 2. The intensity distribution of pixels in the image prepared for counting macroscopic charcoal particles in sediment samples for red, green and blue colors. The histogram shows the areas of intersection between blue and green in blue, green and red in yellow, and blue, green and red in purple. The dark arrow marks the minimum between the two histogram maxima, determining whether a pixel belongs to charcoal or background. The peak on the left is predominantly charcoal, the peak on the right is background.

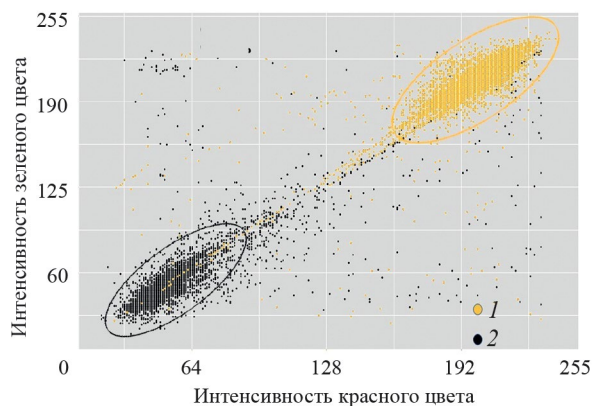


Рис. 3. Диаграмма распределения пикселей на изображении тестовых образцов, относящихся к фону и к угольным частицам. 1 — фон; 2 — уголь.

Fig. 3. A diagram of the distribution of pixels in the image of the test samples in relation to the background and the charcoal particles. 1 — indicates the background; 2 — charcoal.

а в другой половине присутствовали макрочастицы угля и торф.

2.4. Реализация подсчета макрочастиц угля

Обработка изображения и подсчет числа и площади угольных частиц проведены в программной среде *R* с помощью библиотек *imager* (Barthelme, Tschumperle, 2023), *EImage* (Pau, Fuchs, 2010), *tibble* (Müller, Wickham, 2023), *dplyr* (Wickham et al., 2023), *zoo* (Zeileis, Grothendieck, 2005), *contourR* (Wijffels, Gioi, 2017), *spatstat.geom* (Baddeley, Turner, 2005). Для удаления шума использован медианный фильтр радиусом 5 px. Такой малый радиус выбран, поскольку он не изменяет форму частиц, но позволяет убрать мелкие шумы. После подавления шума изображение обрезалось по красной границе. Для выделения угля использовались только красный и зеленый цвета, поскольку они имеют хорошо выраженные пики и минимумы между ними, в отличие от синего цвета (рис. 2). Пиксель относится к границе при условии, что интенсивность красного превышает 115 из 255, интенсивность зеленого меньше 76, и при этом интенсивность зеленого в 2.5 раза ниже интенсивности красного. После обрезки происходит бинаризация изображения. Угольными частицами считаются те, интенсивность красного и зеленого цветов которых ниже 90 (рис. 3).

Порог бинаризации определялся как минимум между двумя максимумами на бимодальной гистограмме (Otsu, 1979) (рис. 3). Важно помнить, что определять граничное значение интенсивности лучше всего на нескольких изображениях, где присутствует уголь, а затем придерживаться его постоянно. В противном случае при определении интенсивности отдельно для каждого изображения при отсутствии частиц угля может быть выбрано слишком высокое значение, которое отнесет значительное количество фоновых пикселей к угольным.

После бинаризации изображения была выполнена его бинарная сегментация, в результате которой всем связанным наборам передних пикселей (т.е. относящихся к угольным частицам) присваивался номер и вычислялась их площадь в пикселях (рис. 4), а также диаметр, радиусы наибольшей возможной вписанной и наименьшей возможной описанной окружностей с помощью библиотеки *spatstat.geom* (Baddeley, Turner, 2005). Радиусы вписанной и описанной окружностей далее использовались для получения значений длины и ширины частицы, при этом для ускорения подсчета частица аппроксимировалась как прямоугольник. За ширину принималось значение, равное двум радиусам вписанной окружности. Длина частицы дополнительно рассчитывалась согласно теореме Пифагора (Выгодский, 1975).

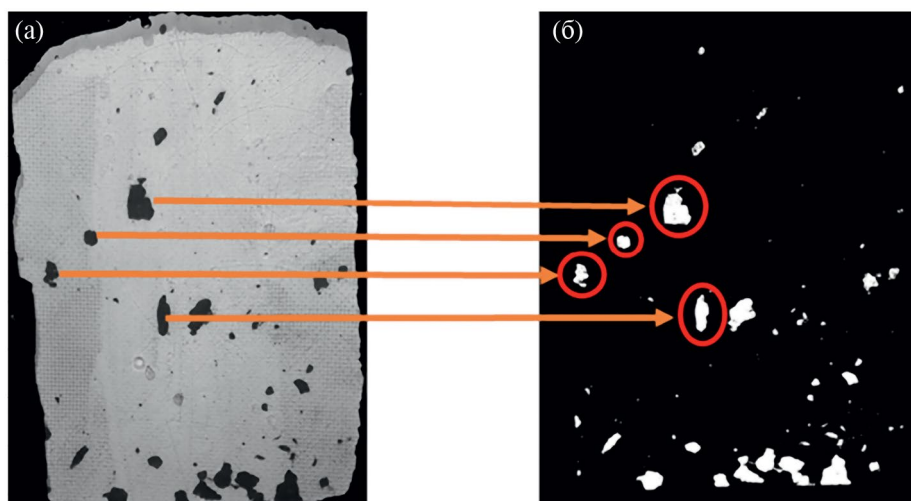


Рис. 4. Бинаризация изображения макрочастиц угля: (а) — подготовлено к бинаризации, (б) — результат бинаризации.

Fig. 4. Binarization of the image of macroscopic charcoal particles: (a) — prepared for binarization, (b) — the result of binarization.

2.5. Оценка точности

Для сравнения результатов, полученных путем стандартного ручного подсчета количества угольных частиц в образце и определения количества частиц по изображению, мы использовали коэффициент корреляции Спирмена (R) и коэффициент детерминации R^2 при построении линейной модели и MAPE (средняя абсолютная ошибка в процентах). Для определения точной площади частицы случайным образом было выбрано 50 изображений угольков в образцах без торфа и 50 изображений с наличием торфа. Затем площадь каждой образца подсчитывалась в редакторе изображений GIMP 2.10. Для этого угольная частица вручную выделялась в редакторе. Затем был проведен подсчет площади угольных частиц на тех же изображениях и далее их сравнение с площадью частиц, которые выделил оператор. Сравнение площадей проводилось в пикселях.

2.6. Применение разработанной методики на тестовом объекте

Для демонстрации возможностей разработанного метода мы выбрали результаты изучения болота Побочного, расположенного на территории национального парка «Бузулукский бор» (Оренбургская область, площадь лесного фонда более 110 тыс. га) и окруженного типчаково-ковыльными и разнотравно-злаковыми степями (Чибилев и др., 2008). Территория национального парка с 1760 г. подверглась более чем 70 пожарам (Климентьев, 2010) и потому представляется подходящим объектом для тестирования нашей методики.

Бурение торфяной залежи болота Побочного, детальное радиоуглеродное датирование, спорово-пыльцевой и ботанический анализ торфа были выполнены К. В. Кременецким с соавторами (Kremenetski et al., 1999). В 2022 г. изучение этого разреза было возобновлено, и в районе изученной ранее скважины был отобран новый керн, проведен анализ макроскопических частиц угля в торфе, и выполнена реконструкция палеопожаров. Общая глубина скважины в месте бурения составила 10 м (0–6.4 м — торф, 6.4–10.0 м — гиттия), а возраст отложений 11400 кал. лет (калиброванных л.н.), что позволяет рассмотреть изменение пожарных режимов на протяжении всего голоцена и протестировать разработанный метод для анализа как болотных, так и озерных отложений.

Интервал отбора образцов для изучения макрочастиц угля составил 1 см. В ходе исследования проанализировано 1000 образцов объемом 1 см³, подготовленных по методике (Mooney, Tinner, 2011), обработано 6000 изображений. На основе радиоуглеродных дат (Kremenetski et al., 1999) в пакете Bacon версия 3.2.0 (Blaauw, Christen, 2011) была построена модель роста отложений.

Для реконструкции пожаров подсчитанная концентрация частиц в образце (частиц/см³) была пересчитана в скорость аккумуляции макрочастиц угля (CHAR, частиц/см² в год) с использованием модели роста отложений и пакета Tapas (Finsinger, Bonnici, 2022) в программной среде R. При выявлении пожарных эпизодов применялась функция `peak_detection`, в которой все параметры использовались по умолчанию, кроме временного

разрешения, равного 25 годам (медианное временное разрешение отобранных образцов); была выбрана функция *robust Lowess* (сглаживание методом локально-взвешенной регрессии) со сглаживающим интервалом 2000 лет.

При анализе изображений было применено разделение частиц угля на классы (древесные и травянистые), которое проводилось согласно классификации Vachula et. al. (2021), относящей частицы угля с соотношением длины к ширине более 3.5 к травяным уголькам, а менее — к древесным.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Оценка точности подсчета макроскопических частиц угля в торфе по изображению в тестовых образцах

Результаты подсчета макрочастиц угля по изображению и ручным способом дают схожие результаты, корреляция Спирмена для всей выборки составила $R = 0.85$, $R^2 = 0.71$, а $MAPE = 31.58\%$. При этом в чистых образцах, содержащих только угольные частицы, совпадение лучше, чем в образцах, в которые был добавлен торф (рис. 5). Коэффициент корреляции Спирмена для групп образцов с добавлением торфа и без него составили 0.77 и 0.90, коэффициент детерминации — 0.60 и 0.81 соответственно. Для образцов с торфом характерна более высокая средняя абсолютная ошибка ($MAPE = 34.42\%$), чем для чистых проб ($MAPE =$

$= 28.67\%$). В образцах с добавлением торфа автоматическим способом было выявлено меньшее количество угольных частиц по сравнению с ручным подсчетом, что также отмечалось другими исследователями (Lesven et al., 2022; Halsall et al., 2018). Очевидно, это связано с перекрытием частиц растительными остатками. При этом некоторая часть была заметна сквозь торф, что в ручном режиме позволяло оператору их учесть, но при автоматическом анализе такие частицы оставались неучтенными. При работе с реальными образцами большая часть растительных остатков при пробоподготовке может быть убрана иглой из чашки Петри, что существенно снизит влияние перекрытия.

Достигнутая нами точность определения количества угольных частиц посредством анализа изображений оказалась выше, чем в подобном исследовании, предпринятом по материалам озерных кернов в Канаде (Lesven et al., 2022), где коэффициент корреляции Спирмена между количеством частиц, подсчитанных разными способами, составил 0.605. При этом авторы сравнивали значения, полученные не из тестовых образцов, а из реального керна озерных отложений, в котором, как они сами указывают, при ручном подсчете не были учтены все мелкие частицы, что и привело к более низким показателям точности метода.

Оценка точности определения площади угольных частиц, выделенных автоматически и в ручном

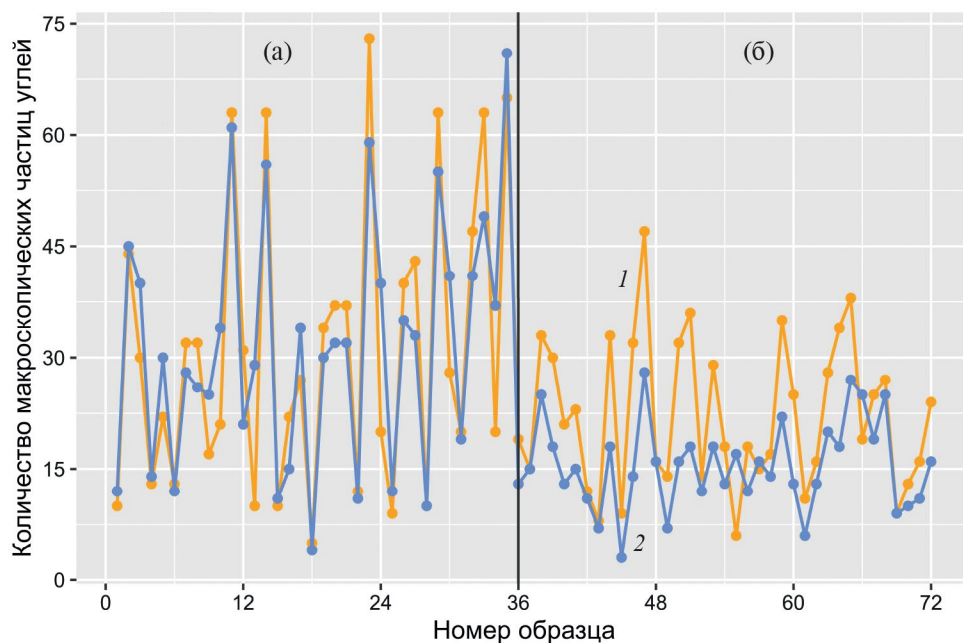


Рис. 5. Сравнение количества макроскопических частиц угля в тестовых образцах: без растительных остатков (а) и с растительными остатками (б), подсчитанных стандартным методом (1) и по изображению (2).

Fig. 5. Comparison of the number of macroscopic charcoal particles in test samples: without plant residues (a) and with plant residues (b), counted by the standard method (1) and by image (2).

режиме, показала высокие значения коэффициента корреляции Пирсона 0.99, коэффициент детерминации 0.98 для всей выборки, $MAPE = 21.45\%$. Для частиц, полученных по изображениям без растительных остатков, ошибка в определении площади была ниже, чем для изображений с растительными остатками ($MAPE = 10.26\%$ и 31.52% соответственно). Кроме того, разделение частицы по площади на квартили (табл. 1) обнаружило, что чем крупнее частицы, тем меньше ошибка в оценке площади. Возможно, из-за хроматической аберрации по краям частиц на изображении для более крупных частиц площадь оценивается с большей точностью, чем для мелких, что также указывалось в работе (Hallsall et al., 2018).

Среднее время работы программы для подсчета макрочастиц угля на одном изображении с разрешением 3456×4608 px равнялось 41 с при использовании 1 ядра и 22.5 с при использовании 3 ядер (процессор Intel(R) Core(TM) i7–9750H CPU @ 2.60GHz 2.59 GHz). Соответственно, для подсчета числа частиц в одном образце (6 фото) требуется порядка 240 либо 130 с, в зависимости от возможности включения параллельного вычисления на нескольких ядрах. Это позволяет получать результат в 5–10 раз быстрее, чем при ручном подсчете или при использовании автоматического метода, предложенного Lesven et al. (2022) — около 20 мин

Таблица 1. Изменение MAPE в зависимости от размера макрокопических частиц угля

Table 1. Variation of MAPE according to the size of macroscopic charcoal particles

Квартиль	Размер частиц, px	MAPE, %
1	<406	31.95
2	406–1005	20.41
3	1005–4629	23.36
4	>4629	8.56

на образец. Это может быть связано как с подходом при выборе инструментов при написании программы обработки снимков, так и с использованием изображений с более высоким разрешением.

3.2. Применение разработанного метода для реконструкции пожаров на территории национального парка “Бузулукский бор”

Результаты изучения макрокопических частиц угля в торфе болота Побочного выявили высокую изменчивость как скорости аккумуляции частиц, так и периодичности пожаров (рис. 6). В начальные фазы голоцена 11.4–10.1 тыс. кал.л.н. значения CHAR колебались от 5 до 15 частиц/см² в год с межпожарным интервалом (МПИ) 300–400 лет.

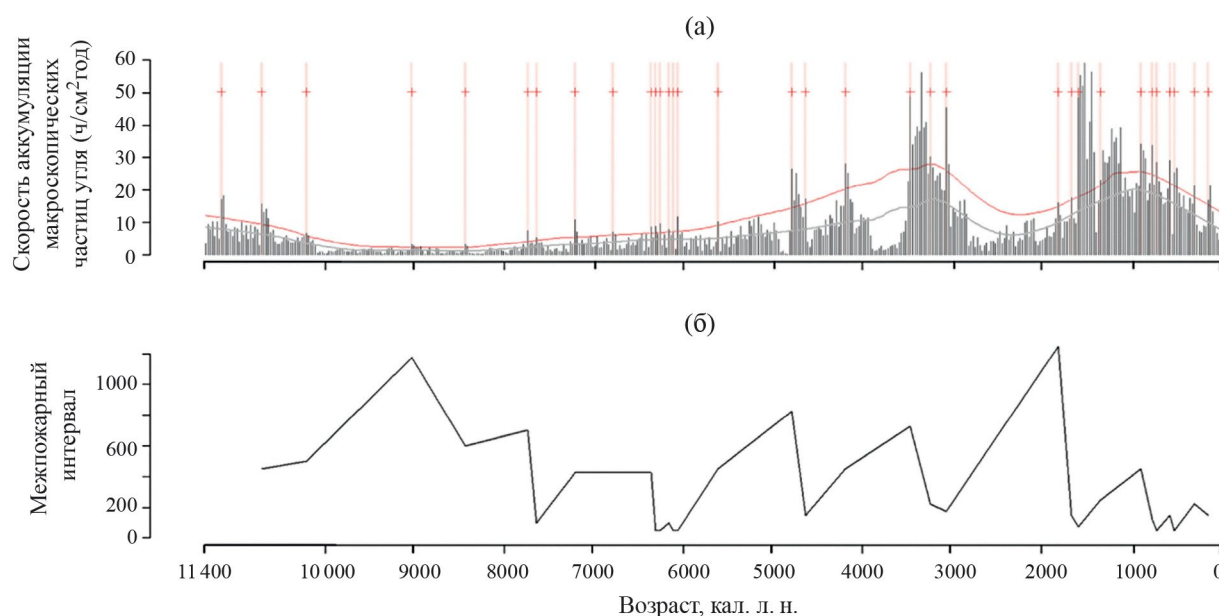


Рис. 6. Скорость аккумуляции макрокопических частиц угля в торфе болота Побочного (а) и межпожарный интервал (б). На верхнем графике серой линией обозначены средние значения CHAR, красной линией — фоновые значения, красные “+” — пожарные эпизоды.

Fig. 6. Macroscopic charcoal accumulation rate in the peat core of the Pobochnoye peatland (a) and the inter-fire interval (b). In the upper graph, the interpolated CHAR values are indicated by a grey line, the background CHAR values are indicated by a red line, and red “+” represent fire episodes.

Затем, в период 10.5–7.9 тыс. кал.л.н. скорость накопления макроуглей понизилась до 1 частицы/см² в год, пожарные эпизоды стали очень редкими.

Высокая доля углей травянистых растений среди макроуглей, накопившихся в этот период (рис. 7), хорошо согласуется с палинологическими данными (Kremenetski et al., 1999), по которым на территории, прилегающей к болоту, была распространена лесостепная растительность.

В среднем голоцене в период 7.9–4.8 тыс. кал.л.н. CHAR возрастает 6–10 частиц/см² в год, доля древесных углей превышает долю травянистых (рис. 7), за исключением эпизодов 7.2 и 5.4 тыс. кал.л.н. Серия крупных пожаров выявлена в интервале 6.4–6.0 тыс. кал.л.н., установлено 6 пожарных эпизодов с интервалом около 60 лет. Учитывая, что пожарный эпизод может охватывать не один, а несколько пожаров, для рассматриваемого периода была характерна очень высокая пожароактивность. Частые пожары способствовали формированию сосновых лесов.

После 4.8 тыс. кал.л.н. на территории, прилегающей к болоту Побочному, произошла резкая смена пожарных режимов. Скорость аккумуляции частиц угля увеличилась в 2–5 раз по сравнению с предыдущим периодом. Выявлены два интервала повышенного поступления угольков в болото в интервалах 4.8–3.9 и 3.5–2.8 тыс. кал.л.н., разделенные периодом, когда пожарная активность сокра-

щалась. Интервалы увеличения поступления угля в торфяную залежь болота совпадают по времени с сокращением доли древесных пород в пыльцевых спектрах (до 40–50%) и возрастанием доли полыней (20–30%) и лугового разнотравья (Kremenetski et al., 1999). Среди угольных частиц большую долю составляет древесный уголь, что указывает на уничтожение лесных массивов вследствие пожаров. Для интервала 3.5–2.8 тыс. кал.л.н. характерны наименьшие в среднем и позднем голоцене значения суммы пыльцы древесных пород и сосны в спектрах и увеличение содержания пыльцы березы и полыни, что, очевидно, отражает не только влияние климатического фактора, но и воздействие пожаров на растительный покров.

Похолодание и увлажнение климата около 2.7 тыс. кал.л.н. (Новенко, 2021) привело к снижению пожарной активности на изучаемой территории и расширению площади лесов. В интервале 2.7–1.8 тыс. кал.л.н. значения CHAR существенно понизились, пожарные эпизоды не выделены. Начиная с 1.8 тыс. кал.л.н. скорость аккумуляции частиц угля в торфе резко возросла, CHAR увеличилась в 5–6 раз по сравнению с предыдущим периодом, МПИ составлял 100–200 лет, что совпадает с потеплением и аридизацией климата на Южном Урале (Нигаматзянова и др., 2023). В пожарах средневековья (800–1200 г.н.э.) древесные угли существенно преобладали над остатками травянистых,

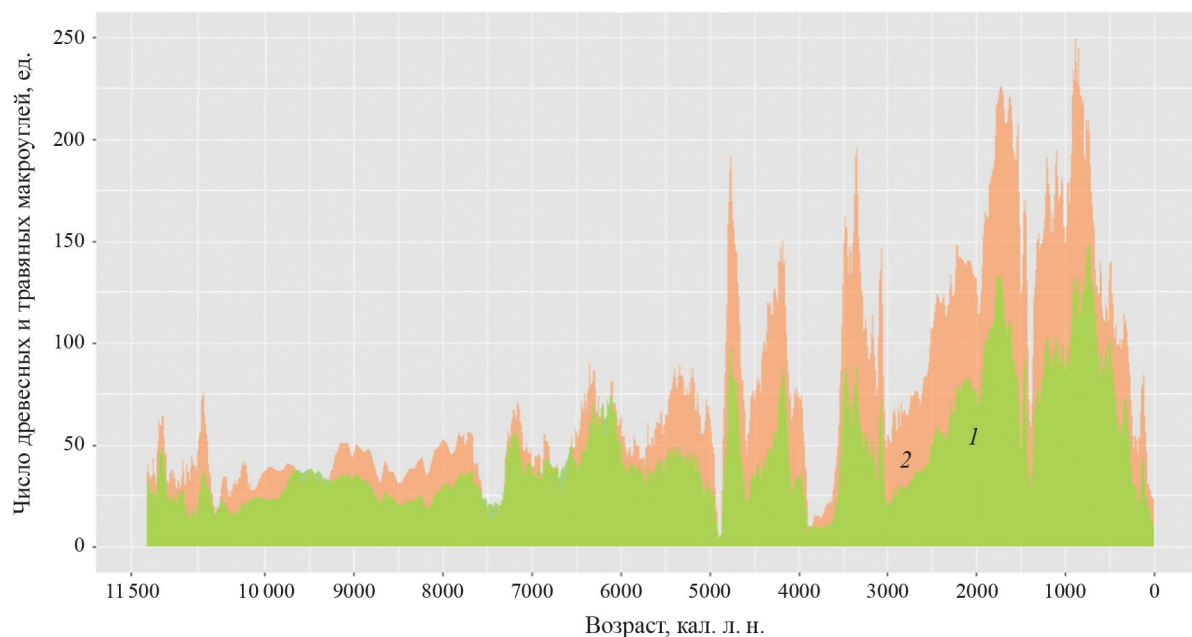


Рис. 7. Содержание травянистых (1) и древесных (2) углей в торфе болота Побочного. Значения сглажены методом скользящего среднего с шириной окна 10.

Fig. 7. The proportion of grass (1) and wood (2) charcoal in the peat core of the Pobochnoye peatland. The values are smoothed using the moving average with 10 points.

в более поздних пожарах доля остатков трав увеличилась, что, возможно, указывает на сокращение площади лесов и, соответственно, количества древесины как горючего материала. Высокие пики CHAR (до 60 частиц/см² в год) и обилие крупных частиц угля (400–500 мкм) указывают на интенсивные верховые пожары вблизи болота (рис. 8). В течение последней тысячи лет выявлено 8 пожарных эпизодов; МПИ составлял в среднем около 200 лет, но, возможно, пожары происходили и чаще. Для спорово-пыльцевых спектров характерны резкие колебания в соотношении пыльцы сосны и березы, что отражает постпирогенные сукцессии растительного покрова (Kremenetski et al., 1999).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод автоматического анализа макроскопических частиц угля в озерных и болотных отложениях по цифровому изображению показал высокую точность подсчета количества и площади угольных частиц даже при наличии в образце растительных остатков. Метод легко воспроизводим, не требователен к оборудованию, и при его применении исследователи тратят существенно меньшее количество времени на подсчет угольков

по сравнению с анализом вручную. Метод позволяет получить дополнительную палеоэкологическую информацию на основании изучения геометрических характеристик частиц, провести разделение частиц на морфотипы (Vachula et al., 2021), выделить травяные и древесные угли.

Применение метода для анализа макроскопических частиц угля в торфяной залежи болота Побочного, расположенного на территории Национального парка “Бузулукский бор” убедительно продемонстрировало, что анализ 10-метровой торфяной колонки (1000 образцов, насыщенных угольными частицами) можно провести в короткие сроки и при этом рассчитать не только скорость аккумуляции макрочастиц угля и межпожарные интервалы, но и получить информацию об источнике горимой биомассы по соотношению древесных и травяных углей и сделать предположения об интенсивности пожаров по распределению размеров угольных частиц.

Код, написанный на языке R, доступен для дальнейшего использования по ссылке: https://github.com/AntonShatunov/SimpleAutoMacroChar/blob/4bb11bb2af7ddb0270c28d6b26a0d692d5984441/char_detect

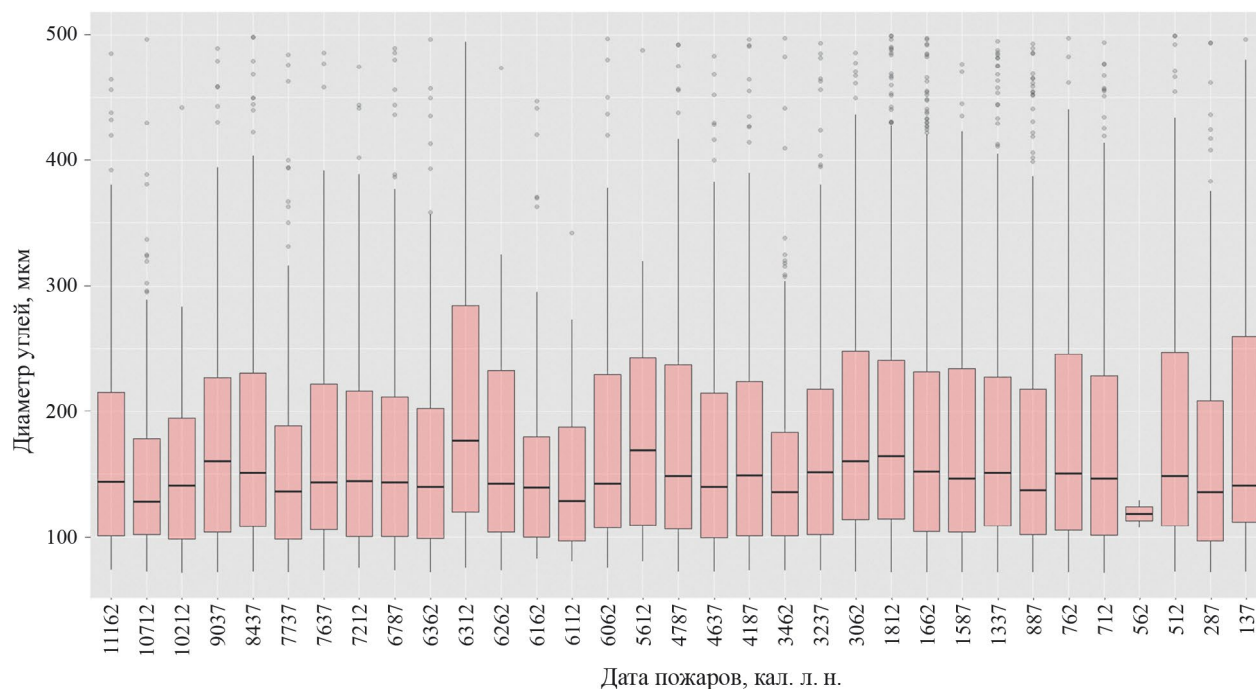


Рис. 8. Диаграммы размаха диаметров макрочастиц угля в торфе болота Побочного при выявленных пожарных событиях. Темной линией внутри ящика показана медиана, ящик — одно стандартное отклонение, усы — 2 стандартных отклонения, точки — выбросы.

Fig. 8. Box plots of diameters of macroscopic charcoal particles from the peat core of the Pobochnoye peatland in relation to identified fire episodes. The dark line inside the box shows the median, the box is one standard deviation, the whiskers are 2 standard deviations, and the dots are outliers.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены в рамках государственного задания Института географии РАН FMWS-2024-0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Выгодский М.Я. (1975) Справочник по элементарной математике. М.: ФИЗМАТЛИТ. 412 с.
- Климентьев А.И. (2010) Бузулукский бор: почвы, ландшафты и факторы географической среды. Екатеринбург: Типография “Уральский центр академического обслуживания”. 401 с.
- Куприянов Д.А., Новенко Е.Ю. (2021) Реконструкция истории лесных пожаров в Южной части Мордовского заповедника в голоцене по данным анализа макроскопических частиц угля в торфе. *Труды Мордовского государственного природного заповедника им. П.Г. Смидовича*. № 26. С. 176–192.
- Нестерова М.И., Рябогина Н.Е. (2022) Динамика лесных пожаров в окрестностях Тюмени на протяжении 9000 лет. В сб.: *Динамика экосистем в голоцене: Сборник статей по материалам VI Всероссийской научной конференции*. Санкт-Петербург: Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена. С. 495–499.
- Нигаматзянова Г.Р., Фролова Л.А., Нигматуллин Н.М. и др. (2023) Реконструкция растительности и климатических изменений позднеледниковья — голоцена Южного Урала на основе спорово-пыльцевого анализа донных отложений озера Большое Миассово. *Геоморфология и палеогеография*. Т. 54. № 4. С. 179–194. <https://doi.org/10.31857/S2949178923040060>
- Новенко Е.Ю. (2021) Динамика ландшафтов и климата в центральной и восточной Европе в голоцене — прогнозные оценки изменения природной среды. *Геоморфология*. № 3. С. 24–47. <https://doi.org/10.31857/S0435428121030093>
- Пупышева М.А., Бляхарчук Т.А. (2024) Реконструкция голоценовой истории палеопожаров в среднетаежной подзоне Западной Сибири по данным макроуголькового анализа озерных отложений. *Геосферные исследования*. № 1. С. 135–151. <https://doi.org/10.17223/25421379/30/8>
- Рогозин Д.Ю., Бурдин Л.А., Болобанщикова Г.Н. (2023) Угольные макрочастицы в верхних слоях донных отложений озёр Северо-Минусинской котловины (юг Сибири) как индикатор динамики пожаров на окружающей территории. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология*. № 2. С. 252–266.
- Санников С.Н., Санникова Н.С., Петрова И.В. (2012) Очерки по теории лесной популяционной биологии. Екатеринбург: УрО РАН. Бот. сад. 277 с.
- Седых В.Н. (2009) Лесообразовательный процесс. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение. 164 с.
- Сухомилова В.В. (2013) Пожары в природе как биосферное явление. Биробиджан: Амурск. гос. ун-т. Биробиджанский филиал. 250 с.
- Фуряев В.В. (1996) Роль пожаров в процессе лесообразования. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение. 253 с.
- Чибилов А.А., Вельмовский П.В., Кин Н.О. и др. (2008) Бузулукский бор. Екатеринбург: Уральское отделение РАН. 186 с.
- Baddeley A., Turner R. (2005) spatstat: An R Package for Analyzing Spatial Point Patterns. *J. of Stat. Software*. Vol. 12. No. 6. P. 1–42. <https://doi.org/10.18637/jss.v012.i06>
- Blaauw M., Christen J.A. (2011) Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*. Vol. 6. No. 3. P. 457–474. <https://doi.org/10.1214/11-BA618>
- Bond W.J., Woodward F.I., Midgley G.F. (2005) The global distribution of ecosystems in a world without fire. *New Phytol.* Vol. 165. No. 2. P. 525–537. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01252.x>
- Bowman D.M.J.S., Balch J.K., Artaxo P. et al. (2009) Fire in the Earth System. *Science*. Vol. 324. P. 481–484. <https://doi.org/10.1126/science.1163886.2009>
- Calder W.J., Parker D., Stopka C.J. et al. (2015) Medieval warming initiated exceptionally large wildfire outbreaks in the Rocky Mountains. *The Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. Vol. 112. P. 13261–13266. <https://doi.org/10.1073/pnas.1500796112>
- Conedera M., Tinner W., Neff C. et al. (2009) Reconstructing past fire regimes: Methods, applications, and relevance to fire management and conservation. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 28. P. 555–576. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.11.005>
- Connor S., Ross S., Sobotkova A. et al. (2013) Environmental conditions in the SE Balkans since the Last Glacial Maximum and their influence on the spread of agriculture into Europe. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 68. P. 200–215. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.02.011>
- Dellasala D., Hanson C. (2015) The Ecological Importance of Mixed-Severity Fires: Nature’s Phoenix. NY: Elsevier Inc. 409 p.
- Ferreira T., Rasband W. ImageJ User Guide. ImageJ Wiki. [Electronic data]. URL: <https://imagej.net/ij/docs/guide/> (Access date: 24.04.2024).
- Feurdean A. (2021) Experimental production of charcoal morphologies to discriminate fuel source and fire type: an example from Siberian taiga. *Biogeosciences*. Vol. 18. P. 3805–3821. <https://doi.org/10.5194/bg-18-3805-2021>
- Feurdean A., Vachula R.S., Hanganu D. et al. (2023) Charcoal morphologies and morphometrics of a Eurasian grass-dominated system for robust interpretation of past fuel and fire type. *Biogeosciences*. Vol. 20. P. 5069–5085. <https://doi.org/10.5194/bg-20-5069-2023>
- Finsinger W., Bonnici I. Tapas: An R package to perform trend and peaks analysis. Github.com. [Electronic data]. URL: <https://github.com/wfinsinger/tapas> (Access date: 24.04.2024).
- Finsinger W., Morales-Molino C., Gałka M. et al. (2017) Holocene vegetation and fire dynamics at Crveni Potok, a small mire in the Dinaric Alps (Tara National Park, Ser-

- bia). *Quat. Sci. Rev.* Vol. 167. P. 63–77.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.04.032>
- Fletcher M., Benson A., Heijnis H. et al. (2015) Changes in biomass burning mark the onset of a ENSO-influenced climate regime at 42 S in southwest Tasmania, Australia. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 122. P. 222–232.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.05.002>
- Halsall K.M., Ellingsen V.M., Asplund J. et al. (2018) Fossil charcoal quantification using manual and image analysis approaches. *The Holocene*. Vol. 28. Iss. 8. P. 1345–1353.
<https://doi.org/10.1177/0959683618771488>
- Higuera P. (2009) CharAnalysis 0.9: Diagnostic and Analytical Tools for Sediment Charcoal Analysis (User's Guide). Bozeman, MT: Montana State Univ. 32 p.
- Kremenetski C.V., Boettger T., Junge F.W. et al. (1999) Late- and postglacial environment of the Buzuluk area, middle Volga region, Russia. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 18. P. 1185–1203
[https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(98\)00074-2](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(98)00074-2)
- Lestienne M., Hely C., Curt T. et al. (2020) Combining the Monthly Drought Code and Paleoecological Data to Assess Holocene Climate Impact on Mediterranean Fire Regime. *Fire*. Vol. 3. Iss. 2. No. 8. P. 1–22.
<https://doi.org/10.3390/fire3020008>
- Lesven J., Druguet D.M., Borne R. et al. (2022) Testing a new automated macrocharcoal detection method applied to a transect of lacustrine sediment cores in eastern Canada. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 295. P. 1–15.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107780>
- Leys B., Carcaillet C., Dezileau L. et al. (2013) A comparison of charcoal measurements for reconstruction of Mediterranean paleo-fire frequency in the mountains of Corsica. *Quat. Res.* Vol. 79. P. 337–349.
<https://doi.org/10.1016/j.yqres.2013.01.003>
- Luelmo-Lautenschlaeger R., Blarquez O., Perez-Diaz S. et al. (2019) The Iberian Peninsula's Burning Heart – Long-Term Fire History in the Toledo Mountains (Central Spain). *Fire*. Vol. 2. Iss. 4. No. 54. P. 1–23.
<https://doi.org/10.3390/fire2040054>
- Mooney S., Tinner W. (2011) The analysis of charcoal in peat and organic sediments. *Mires and Peat*. Vol. 7. P. 1–18.
- Müller K., Wickham H. *tibble: Simple Data Frames* [Electronic data]. URL: <https://github.com/tidyverse/tibble/> (Access date: 24.04.2024).
- Munoz A.A., Gonzalez M.E., Schneider-Valenzuela I. et al. (2023) Multiproxy Approach to Reconstruct the Fire History of Araucaria araucana Forests in the Nahuelbuta Coastal Range, Chile. *Forests*. Vol. 14. P. 1–26.
<https://doi.org/10.3390/f14061082>
- Mustaphi C.J., Pisaric M.F.J. (2018) Forest vegetation change and disturbance interactions over the past 7500 years at Sasquatch Lake, Columbia Mountains, western Canada. *Quat. Int.* Vol. 488. P. 95–106.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.03.045>
- Otsu N. (1979) A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. Vol. 9. Iss. 1. P. 62–66.
<https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
- Rehn E., Rehn A., Possemiers A. (2019) Fossil charcoal particle identification and classification by two convolutional neural networks. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 226. P. 1–6.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.106038>
- Rudaya N., Xianrong C., Snezhana Z. et al. (2020) Postglacial history of the Steppe Altai: Climate, fire and plant diversity. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 249. P. 1–20.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106616>
- Sannikov S.N., Goldammer J.G. (1996) Fire ecology of pine forests of Northern Eurasia. In: *Fire in ecosystems of boreal Eurasia*. KLUWER: Springer Science+Business Media B.V. Formerly Kluwer Academic Publishers B.V. P. 151–167.
- Słowiński M., Lamentowicz M., Łuców D. et al. (2019) Paleoecological and historical data as an important tool in ecosystem management. *J. Environ. Manage.* Vol. 236. P. 755–768.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.002>
- Słowiński M., Obremska M., Avirmed D. et al. (2022). Fires, Vegetation, and Human – The History of Critical Transitions During the Last 1000 Years in Northeastern Mongolia. *Sci. Total Environ.* Vol. 383. Part 1. 155660.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.4043617>
- Snitker G. (2020) The Charcoal Quantification Tool (CharTool): A Suite of Open-source Tools for Quantifying Charcoal Fragments and Sediment Properties in Archaeological and Paleoecological Analysis. *Ethnobiology Letters*. Vol. 11. P. 103–115.
<https://doi.org/10.14237/eb1.11.1.2020.1653>
- Vachula R.S., Russell J.M., Huang Y. et al. (2018) Assessing the spatial fidelity of sedimentary charcoal size fractions as fire history proxies with a high-resolution sediment record and historical data. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* Vol. 508. P. 166–175.
<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.07.032>
- Vachula R.S., Sae-Lim J., Li R. (2021) A critical appraisal of charcoal morphometry as a paleofire fuel type proxy. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 262. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106979>
- Wickham H., François R., Henry L. et al. *dplyr: A Grammar of Data Manipulation – R package version 1.1.4*. [Electronic data]. URL: <https://github.com/tidyverse/dplyr/> (Access date: 24.04.2024).
- Wijffels J., von Gioi G. (2017) *image.ContourDetector: image.ContourDetector: an R package to detect contour lines in images – R package version 0.1.0*. [Electronic data]. URL: <https://github.com/bnosac/image/> (Access date: 24.04.2024).
- Zabel N.A., Soliguin A.M., Wiklund J.A. et al. (2022) Paleolimnological assessment of past hydro-ecological variation at a shallow hardwater lake in the Athabasca Oil Sands Region before potential onset of industrial development. *J. of Hydrology: Region. Studies*. Vol. 39. 100977.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100977>
- Zeileis A., Grothendieck G. (2005) Zoo: S3 Infrastructure for Regular and Irregular Time Series. *J. of Statistical Software*. Vol. 14. Iss. 6. P. 1–27.
<https://doi.org/10.18637/jss.v014.i06>

DIGITAL IMAGES ANALYSIS OF MACROSCOPIC CHARCOAL PARTICLES FROM LAKE AND PEAT SEDIMENTS FOR PALAEOGEOGRAPHIC RECONSTRUCTION¹

A. E. Shatunov^{a,#}, N. G. Mazei^{b,##}, and E. Yu. Novenko^{a,###}

^a Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^b Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

E-mail: toxavilli@yandex.ru

E-mail: natashamazei@mail.ru

E-mail: lenanov@mail.ru

The analysis of macroscopic charcoal particles in sediments of different genesis is one of the most common approaches to reconstruct the past fire regimes. The method requires a great deal of time and effort on the part of the researcher. It implies continuous sampling of the sediment core and counting of all charcoal particles with linear dimensions greater than 125 µm in a sample of fixed volume. The purpose of this paper is to present an automatic method that we have developed for the calculation of macroscopic charcoal particles using image analysis. This method is easily reproducible, not technologically demanding, and fast. It allows us to obtain additional palaeoecological information based on the study of geometric characteristics and particle area. A comparison of the results obtained by a standard manual count of the charcoal particles in the test samples and the number of particles determined from the image showed that the method was accurate enough for palaeogeographic reconstructions: Spearman correlation coefficient $R = 0.85$, $R^2 = 0.71$, MAPE = 31.58% (the mean absolute percentage error), determined particle area comparison revealed $R = 0.99$, $R^2 = 0.98$, MAPE = 21.45%. The results of macroscopic charcoal analysis of the peat core from Pobochnoye peatland (Buzuluksky Bor National Park, Orenburg region) are presented to demonstrate the capabilities of the developed method. One thousand samples collected from 10 m of peat sediments accumulated over 11.4 ka years were analyzed, and 6,000 images were processed. The results of the analysis include determined charcoal accumulation rates, fire episodes and inter-fire intervals, as well as classification of charcoal particles into grass and wood morphotypes. The variation in charcoal particle size was also estimated for each fire episode, providing additional palaeoecological information about Holocene fires.

Keywords: macroscopic charcoal analysis; automatic charcoal counting using image analysis; charcoal size; area of charcoal particles; morphotype of charcoal particles; paleo fires

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the State assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences FMWS-2024-0005.

REFERENCES

- Baddeley A., Turner R. (2005) spatstat: An R Package for Analyzing Spatial Point Patterns. *J. of Stat. Software*. Vol. 12. No. 6. P. 1–42.
<https://doi.org/10.18637/jss.v012.i06>
- Blaauw M., Christen J.A. (2011) Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*. Vol. 6. No. 3. P. 457–474.
<https://doi.org/10.1214/11-BA618>
- Bond W.J., Woodward F.I., Midgley G.F. (2005) The global distribution of ecosystems in a world without fire. *New Phytol.* Vol. 165. No. 2. P. 525–537.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01252.x>
- Bowman D.M.J.S., Balch J.K., Artaxo P. et al. (2009) Fire in the Earth System. *Science*. Vol. 324. P. 481–484.
<https://doi.org/10.1126/science.1163886>, 2009
- Calder W.J., Parker D., Stopka C.J. et al. (2015) Medieval warming initiated exceptionally large wildfire outbreaks in the Rocky Mountains. *The Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. Vol. 112. P. 13261–13266.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1500796112>
- Chibilev A.A., Velmovsky P.V., Kin N.O. et al. (2008) Buzulukskii bor (Buzulukskiy bor). Yekaterinburg: Ural'skoe otделение RAN (Publ.). 186 p. (in Russ).
- Conedera M., Tinner W., Neff C. et al. (2009) Reconstructing past fire regimes: Methods, applications, and relevance to fire management and conservation. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 28. P. 555–576.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.11.005>
- Connor S., Ross S., Sobotkova A. et al. (2013) Environmental conditions in the SE Balkans since the Last Glacial Maximum and their influence on the spread of agriculture into Europe. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 68. P. 200–215.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.02.011>
- ¹ For citation: Shatunov A. E., Mazei N. G., and Novenko E. Yu. (2025) Digital images analysis of macroscopic charcoal particles from lake and peat sediments for palaeogeographic reconstruction. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 56. No. 2. P. 341–354 (in Russ). <https://doi.org/10.31857/S2949178925020118>; <https://elibrary.ru/GQLSPS>

- Dellasala D., Hanson C. (2015) The Ecological Importance of Mixed-Severity Fires: Nature's Phoenix. NY: Elsevier Inc. 409 p.
- Ferreira T., Rasband W. ImageJ User Guide. ImageJ Wiki. [Electronic data]. Access way: <https://imagej.net/ij/docs/guide/> (Access date: 24.04.2024).
- Feurdean A. (2021) Experimental production of charcoal morphologies to discriminate fuel source and fire type: an example from Siberian taiga. *Biogeosciences*. Vol. 18. P. 3805–3821. <https://doi.org/10.5194/bg-18-3805-2021>
- Feurdean A., Vachula R.S., Hanganu D. et al. (2023) Charcoal morphologies and morphometrics of a Eurasian grass-dominated system for robust interpretation of past fuel and fire type. *Biogeosciences*. Vol. 20. P. 5069–5085. <https://doi.org/10.5194/bg-20-5069-2023>
- Finsinger W., Bonnici I. Tapas: An R package to perform trend and peaks analysis. Github.com. [Electronic data]. Access way: <https://github.com/wfinsinger/tapas> (Access date: 24.04.2024).
- Finsinger W., Morales-Molino C., Gałka M. et al. (2017) Holocene vegetation and fire dynamics at Crveni Potok, a small mire in the Dinaric Alps (Tara National Park, Serbia). *Quat. Sci. Rev.* Vol. 167. P. 63–77. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.04.032>
- Fletcher M., Benson A., Heijnis H. et al. (2015) Changes in biomass burning mark the onset of a ENSO-influenced climate regime at 42 S in southwest Tasmania, Australia. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 122. P. 222–232. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.05.002>
- Furyaev V.B. (1996) Rol' pozharov v protsesse lesoobrazovaniya (The role of fires in the process of forest formation). Novosibirsk: Nauka. Sibirskoe otdelenie (Publ.). 253 p. (in Russ).
- Halsall K.M., Ellingsen V.M., Asplund J. et al. (2018) Fossil charcoal quantification using manual and image analysis approaches. *The Holocene*. Vol. 28. Iss. 8. P. 1345–1353. <https://doi.org/10.1177/0959683618771488>
- Higuera P. (2009) CharAnalysis 0.9: Diagnostic and Analytical Tools for Sediment Charcoal Analysis (User's Guide). Bozeman, MT: Montana State Univ. 32 p.
- Klimentyev A.I. (2010) Buzulukskii bor: pochvy, landschafty i faktory geograficheskoi sredy (Buzulukskiy boron: soils, landscapes and factors of geographical environment). Ekaterinburg: Typography "Ural Centre for Academic Service" (Publ.). 401 p. (in Russ).
- Kremenetski C.V., Boettger T., Junge F.W. et al. (1999) Late- and postglacial environment of the Buzuluk area, middle Volga region, Russia. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 18. P. 1185–1203. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(98\)00074-2](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(98)00074-2)
- Kupriyanov D.A., Novenko E.Yu. (2021) Reconstruction of the history of forest fires in the Southern part of the Mordovian Reserve in the Holocene according to the data of analysis of macroscopic coal particles in peat. *Trudy Mordovskogo gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika im. P.G. Smidovicha*. No. 26: 176–192 (in Russ.).
- Lestienne M., Hely C., Curt T. et al. (2020) Combining the Monthly Drought Code and Paleoecological Data to Assess Holocene Climate Impact on Mediterranean Fire Regime. *Fire*. Vol. 3. Iss. 2. No. 8. P. 1–22. <https://doi.org/10.3390/fire3020008>
- Lesven J., Druguet D.M., Borne R. et al. (2022) Testing a new automated macrocharcoal detection method applied to a transect of lacustrine sediment cores in eastern Canada. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 295. P. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107780>
- Leys B., Carcaillet C., Dezileau L. et al. (2013) A comparison of charcoal measurements for reconstruction of Mediterranean paleo-fire frequency in the mountains of Corsica. *Quat. Res.* Vol. 79. P. 337–349. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2013.01.003>
- Luelmo-Lautenschlaeger R., Blarquez O., Perez-Diaz S. et al. (2019) The Iberian Peninsula's Burning Heart—Long-Term Fire History in the Toledo Mountains (Central Spain). *Fire*. Vol. 2. Iss. 4. No. 54. P. 1–23. <https://doi.org/10.3390/fire2040054>
- Mooney S., Tinner W. (2011) The analysis of charcoal in peat and organic sediments. *Mires and Peat*. Vol. 7. P. 1–18.
- Müller K., Wickham H. Tibble: Simple Data Frames [Electronic data]. Access way: <https://github.com/tidyverse/tibble/> (Access date: 24.04.2024).
- Munoz A.A., Gonzalez M.E., Schneider-Valenzuela I. et al. (2023) Multiproxy Approach to Reconstruct the Fire History of Araucaria araucana Forests in the Nahuelbuta Coastal Range, Chile. *Forests*. Vol. 14. P. 1–26. <https://doi.org/10.3390/f14061082>
- Mustaphi C.J., Pisaric M.F.J. (2018) Forest vegetation change and disturbance interactions over the past 7500 years at Sasquatch Lake, Columbia Mountains, western Canada. *Quat. Int.* Vol. 488. P. 95–106. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.03.045>
- Nesterova M.I., Ryabogina N.E. (2022) Dynamics of forest fires in the vicinity of Tyumen during 9000 years. In: *Dinamika ekosistem v golotsene: Sbornik statei po materialam VI vserossiiskoi nauchnoi konferentsii*. Sankt-Peterburg: Rossiiskii gosudarstvennyi pedagogicheskii universitet im. A.I. Gertsena (Publ.). P. 495–499 (in Russ).
- Nigmatzyanova G.R., Frolova L.A., Nigmatullin N.M. et al. (2023) Vegetation and climate changes in the Southern Urals in the Late Glacial and Holocene derived from pollen record of Lake Bolshoe Miassovo. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 54. No. 4. P. 179–194 (in Russ). <https://doi.org/10.31857/S2949178923040060>
- Novenko E.Yu. (2021) Landscape and climate dynamics in central and eastern Europe in the Holocene – forecast estimates of changes in the natural environment. *Geomorfologiya*. No. 3. P. 24–47 (in Russ). <https://doi.org/10.31857/S0435428121030093>
- Otsu N. (1979) A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. Vol. 9. Iss. 1. P. 62–66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
- Pupysheva M.A., Blyakharchuk T.A. (2024) Reconstruction of the Holocene palaeofire history in the middle taiga

- subzone of Western Siberia based on the data of macroangular analysis of lake sediments. *Geosfernye issledovaniya*. No. 1. P. 135–151 (in Russ.).
<https://doi.org/10.17223/25421379/30/8>
- Rehn E., Rehn A., Possemiers A. (2019) Fossil charcoal particle identification and classification by two convolutional neural networks. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 226. P. 1–6.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.106038>
- Rogozin D.Y., Burdin L.A., Bolobanshchikova G.N. (2023) Coal macroparticles in the upper layers of lake bottom sediments of the North Minusinsk Basin (southern Siberia) as an indicator of fire dynamics in the surrounding area. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Biologiya*. No. 2. P. 252–266 (in Russ.).
- Rudaya N., Xianyong C., Snezhana Z. et al. (2020) Postglacial history of the Steppe Altai: Climate, fire and plant diversity. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 249. P. 1–20.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106616>
- Sannikov S.N., Goldammer J.G. (1996) Fire ecology of pine forests of Northern Eurasia. In: *Fire in ecosystems of boreal Eurasia*. KLUWER: Springer Science+Business Media B.V. Formerly Kluwer Academic Publishers B.V. P. 151–167.
- Sannikov S.N.N., Sannikova N.S., Petrova I.V. (2012) Ocherki po teorii lesnoi populyatsionnoi biologii (Essays on the theory of forest population biology). Ekaterinburg: UrO RAN. Bot. sad. (Publ.). 277 p. (in Russ.).
- Sedykh V.N. (2009) Lesoobrazovatel'nyi protsess (Forest formation process). Novosibirsk: Nauka. Sibirskoe otdelenie (Publ.). 164 p. (in Russ.).
- Słowiński M., Lamentowicz M., Łuców D. et al. (2019) Paleoecological and historical data as an important tool in ecosystem management. *J. Environ. Manage.* Vol. 236. P. 755–768.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.002>
- Słowiński M., Obremska M., Avirmed D. et al. (2022) Fires, Vegetation, and Human—The History of Critical Transitions During the Last 1000 Years in Northeastern Mongolia. *Sci. Total Environ.* Vol. 383. Part 1. 155660.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.4043617>
- Snitker G. (2020) The Charcoal Quantification Tool (CharTool): A Suite of Open-source Tools for Quantifying Charcoal Fragments and Sediment Properties in Archaeological and Paleoecological Analysis. *Ethnobiology Letters*. Vol. 11. P. 103–115.
<https://doi.org/10.14237/eb1.11.1.2020.1653>
- Sukhomilova V.V. (2013) Pozhary v prirode kak biosfernoe yavlenie (Fires in nature as a biospheric phenomenon). Birobidzhan: Amursk. gos. un-t. Birobidzhanskiy filial (Publ.). 250 p. (in Russ.).
- Vachula R.S., Russell J.M., Huang Y. et al. (2018) Assessing the spatial fidelity of sedimentary charcoal size fractions as fire history proxies with a high-resolution sediment record and historical data. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* Vol. 508. P. 166–175.
<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.07.032>
- Vachula R.S., Sae-Lim J., Li R. (2021) A critical appraisal of charcoal morphometry as a paleofire fuel type proxy. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 262. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106979>
- Vygodsky M.Y. (1975) Handbook of elementary mathematics. Moscow: Physmatlit (Publ.). 412 p.
- Wickham H., François R., Henry L. et al. Dplyr: A Grammar of Data Manipulation – R package version 1.1.4. [Electronic data]. Access way: <https://github.com/tidyverse/dplyr/> (Access date: 24.04.2024).
- Wijffels J., von Gioi G. (2017) Image ContourDetector: image.ContourDetector: an R package to detect contour lines in images – R package version 0.1.0. [Electronic data]. Access way: <https://github.com/bnosac/image/> (Access date: 24.04.2024).
- Zabel N.A., Soliguin A.M., Wiklund J.A et al. (2022) Paleolimnological assessment of past hydro-ecological variation at a shallow hardwater lake in the Athabasca Oil Sands Region before potential onset of industrial development. *J. of Hydrology: Region. Studies*. Vol. 39. 100977.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100977>
- Zeileis A., Grothendieck G. (2005) Zoo: S3 Infrastructure for Regular and Irregular Time Series. *J. of Stat. Software*. Vol. 14. Iss. 6. P. 1–27. <https://doi.org/10.18637/jss.v014.i06>