

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-117-118-139



Ссылки для цитирования:

Савин И.Ю., Виндекер Г.В., Плотникова О.О., Романовская А.Ю. Спектральная отражательная способность атмосферной пыли как косвенный индикатор ее почвенного происхождения // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 117. С. 118-139. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-117-118-139

Cite this article as:

Savin I.Yu., Vindeker G.V., Plotnikova O.O., Romanovskaya A.Yu., Spectral reflectance of atmospheric dust as an indirect indicator of its soil origin, Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, V. 117, pp. 118-139, DOI: 10.19047/0136-1694-2023-117-118-139

Благодарность:

Исследование выполнено при поддержке Программы развития научных центров мирового уровня (соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2022-321). Авторы благодарят Д.В. Шарычева за помощь в спектрометрировании образцов.

Acknowledgments:

The research was supported by the Program for the Development of World-class Scientific Centers (agreement with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation № 075-15-2022-321). The authors would like to thank D.V. Sharychev for his help in spectrometry.

Спектральная отражательная способность атмосферной пыли как косвенный индикатор ее почвенного происхождения

© 2023 г. И. Ю. Савин^{1,2*}, Г. В. Виндекер¹, О. О. Плотникова¹,
А. Ю. Романовская¹

¹ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

*<https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: savin_iyu@esoil.ru.

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Факультет почвоведения, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12.

Поступила в редакцию 01.05.2023, после доработки 26.06.2023,
принята к публикации 10.10.2023

Резюме: Запыленность атмосферы оказывает влияние как на здоровье человека, так и на изменение климата. Поэтому изучение пыли в атмосфере является одной из важных задач многих научных направлений. Целью наших исследований была косвенная оценка связи атмосферной пыли над пахотными угодьями двух тестовых участков в Тверской и Тульской областях с почвами. Анализировалась пыль на фильтрах аспиратора после прокачки заданных объемов воздуха на уровне 20–30 см над поверхностью пашни. В качестве критерия почвенного происхождения пыли была использована ее спектральная отражательная способность, которая сравнивалась с отражательной способностью размерной фракции почв (50–200 нм), выделенной сухим просеиванием образца пахотного горизонта почвы. Спектральная отражательная способность пыли была рассчитана на основе подходов линейного разделения спектральной смеси с учетом проективного покрытия частичек пыли на фильтрах, которое определялось путем анализа фотографий фильтров, полученных под микроскопом, в ГИС. В результате было установлено, что восстановленные спектры пыли на фильтрах хорошо коррелируют со спектрами одномерной фракции почв, выделенной сухим просеиванием, что косвенно подтверждает преобладание на фильтрах именно почвенной пыли. Коэффициенты корреляции Спирмена 0.84–0.90, коэффициент корреляции Тау Кендалла 0.70–0.79 (на уровне значимости $p < 0.05$). В условиях незначительной запыленности атмосферы и трудоемкости сбора достаточного количества пыли для прямого анализа использованный подход может служить альтернативой для косвенного подтверждения почвенного происхождения пыли в приземном слое атмосферы. В перспективе данный подход можно использовать в качестве основы для мониторинга дефляции почв пахотных угодий.

Ключевые слова: дефляция почв, пахотные почвы, атмосферная пыль, спектральная отражательная способность.

Spectral reflectance of atmospheric dust as an indirect indicator of its soil origin

© 2023 I. Yu. Savin^{1,2*}, G. V. Vindeker¹, O. O. Plotnikova¹,
A. Yu. Romanovskaya¹

¹Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,

*<https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: savin_iyu@esoil.ru.

²*Lomonosov Moscow State University,
12 Bld. 1 Leninskie Gori, Moscow 119991, Russian Federation.
Received 01.05.2023, Revised 26.06.2023, Accepted 10.10.2023*

Abstract: Atmospheric dust affects both human health and climate change. Therefore, the study of atmospheric dust is one of the important tasks of many scientific fields. The aim of our research was to indirectly assess the relation of atmospheric dust over arable lands of two test sites in Tver and Tula regions of Russia with soils. Dust was analyzed on aspirator filters after pumping specified volumes of air at the level of 20–30 cm above the arable surface. Its spectral reflectance was used as a criterion of soil origin of dust, which was compared with the reflectance of the size fraction (50–200 nm) of soils isolated by dry sieving of a sample of arable soil horizon. The spectral reflectance of dust was calculated based on approaches of linear separation of spectral mixture, taking into account the projective coverage of dust particles on filters, which was determined by analyzing microscope photographs of the filters in GIS. As a result, it was found that the recovered dust spectra on the filters correlate well with the spectra of the same size soil fraction separated by dry sieving, which indirectly confirms the predominance of specifically soil dust on the filters. Spearman correlation coefficient is within the range of 0.84–0.90, Kendall's Tau correlation coefficient varies within 0.70–0.79 (at significance level $p < 0.05$). Under the conditions of insignificant atmospheric dust load and when collecting a sufficient amount of dust for direct analysis is time and labour consuming, the approach used may serve as an alternative for indirect confirmation of the soil origin of dust in the near ground layer of the atmosphere. In the future, this approach can be used as a basis for monitoring of arable soils deflation.

Keywords: soil deflation, arable soils, atmospheric dust, spectral reflectance.

ВВЕДЕНИЕ

В общем понимании атмосферная пыль представляет собой мелкие, микроскопические, твердые частицы, взвешенные в атмосфере (аэрозоль), но иногда пылью называют сами пылевые частицы различного происхождения, а не аэрозоль как таковой (Пирумов, 1974). Интерес к пыли в атмосфере возрастает с каждым днем, во-первых, по причине непосредственного ее влияния на здоровье и деятельность людей. Сердечно-сосудистые, глазные, респираторные и легочные заболевания могут быть спровоцированы вдыханием частиц субмикронного радиуса, особенно после

сильных пылевых бурь при повышенной концентрации в воздухе частиц диаметром менее 10 мкм (PM10) ([Романовская, Савин, 2021](#)). Кроме того, повышенные концентрации пыли в воздухе ограничивают движение автотранспорта, воздушного транспорта и промышленную деятельность ввиду ухудшения видимости и поломки оборудования (например, двигателей).

Во-вторых, атмосферная пыль оказывает влияние на климатические процессы в мировом масштабе – от погоды и осадков до глобального потепления ([Mona et al., 2012](#)). Пыль в атмосфере сильно уменьшает ее прозрачность ([Краткая географическая энциклопедия, 1962](#)), взаимодействует с облаками, океанами и солнечным излучением. При этом важным аспектом является размер частиц: мелкая пыль (менее 2.5 мк) приводит к понижению температуры за счет рассеивания солнечного света; крупная (более 2.5 мк, например, из Сахары) – к нагреву атмосферы, подобно парниковым газам. В докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC) сообщается о диапазоне общего прямого радиационного эффекта пыли от -0.56 до $+0.1$ Вт/м² ([Mona et al., 2012](#); [Kok et al., 2017](#)).

Источники происхождения пыли делятся на две категории: естественные и антропогенные. К первым относятся поверхность почвы (основной источник), вулканические извержения (вулканическая пыль), лесные (мелкий пепел), степные, торфяные пожары, испарение с поверхности морей, временные (пересыхающие) водоемы ([Mahowald et al., 2004](#); [Zucca et al., 2021](#)), космическая пыль и биологический компонент (бактерии, споры, продукты распада, пыльца) ([Ивлев, 1982](#); [Ивлев, Довгалоук, 1999](#); [Петрянов-Соколов, 2007](#); [Kokhanovsky, 2008](#); [Егоров, Хабарова, 2016](#)). Среди антропогенных источников можно выделить сжигание топлива (наибольшая доля), промышленность, где происходит диспергирование различных материалов, сельскохозяйственное производство – ветровая эрозия почвы и связанная с ней эмиссия пыли в атмосферу ([Sharratt, Auvermann, 2014](#); [Taheria et al., 2020](#); [Katra 2020](#)), транспорт – это частицы, попадающие в воздух в результате износа тормозов, шин, дорожного покрытия, и взвеси дорожной пыли во время эксплуатации автомобиля ([Harrison et al., 2012](#); [Baensch-Baltruschat et al., 2020](#)).

Ginoux et al. (2012) в своих исследованиях оценили вклад каждого источника в общую мировую эмиссию пылевых частиц: на долю природных источников пыли приходится 75% выбросов, антропогенных – 25%.

Почвенная пыль является основным компонентом атмосферных аэрозолей, доля пылевых частиц, образовавшихся на поверхности почвы, по разным сведениям, варьирует от 50 до 75% глобальной аэрозольной нагрузки в атмосфере (Пирумов, 1974; Houghton et al., 2001; Bauer, Ganopolski, 2014; Егоров, Хабаров, 2016). В глобальном масштабе основными источниками почвенной пыли в атмосфере являются крупные засушливые районы (Африка, Аравийский полуостров, Центральная Азия), откуда частицы переносятся на большие расстояния под действием ветров и конвективных процессов (Mona et al., 2012; van der Does et al., 2018; Yu et al., 2019; Varga et al., 2021), а в региональном – сельскохозяйственные территории. Даже кратковременные нарушения почвенного покрова значительно увеличивают выброс пыли, особенно на сельскохозяйственных угодьях, где осуществляется выпас скота или механическая обработка почвы, при этом гранулометрический состав играет решающую роль (Katra, 2020). Доля особенностей землепользования в выбросе пыли остается спорной и колеблется, по разным данным, в диапазоне от 10% до 50% (Романовская, Савин, 2021).

В настоящий момент сложно назвать методы, позволяющие выделить и изучить именно почвенную пыль и оценить ее долю, особенно там, где эмиссия пылевых частиц происходит из нескольких источников (природных и антропогенных). Для идентификации происхождения пыли в некоторых работах авторы сосредоточили внимание на химическом и минералогическом составе пылевых частиц, что в отдельных случаях позволило установить регионы эмиссии пыли (Prospero et al., 2002; Attiya, Jones, 2020 и др.).

Kandler, Scheuvens (2019) установили, что почвенная пыль характеризуется наличием кварца и других соединений кремния, глиноземов, карбонатов и кальцитов, окислов железа. Однако при этом состав почвенной пыли, отобранной в различных местах (в

горах, пустынях, полупустынях, степях, над пахотой), оказался примерно одинаковым.

Но, несмотря на имеющиеся данные, вклад именно почв в запыленность атмосферы до сих пор является слабо изученным. В основном это связано с отсутствием надежных методов. В данной статье приведены результаты оценки доли почвенной пыли в атмосфере, полученные на основе оригинального подхода, основанного на анализе спектральной отражательной способности почв и пыли.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в последовательности, указанной на рисунке 1.

В летнее время 2021 и 2022 гг. на двух тестовых участках, расположенных на сельскохозяйственных полях в районе села Шишлово Тульской области (с преобладанием черноземов выщелоченных среднемощных среднегумусных среднесуглинистых) (координаты точки отбора: 54°13'44.26" N; 38°31'19.67" E), и поселка Эммаусс Тверской области (с преобладанием дерново-подзолистых легкосуглинистых почв) (координаты точки отбора: 56°46'28.11" N; 36°5'35.32" E), был осуществлен отбор атмосферной пыли с помощью пылевого аспиратора ПУ-3Э путем прокачки заданного объема воздуха через фильтр АФА ВП 20 (в трех повторностях). Аспиратор располагался на открытой местности в средней части распаханного поля на высоте 20–30 см от поверхности почвы.

В месте расположения аспиратора были отобраны образцы пахотного горизонта почв (один образец в каждом месте). Образцы подвергались сухому рассеву. После чего определялась спектральная отражательная способность каждой выделенной фракции.

Также с помощью спектрорадиометра определялись спектры чистых фильтров до сбора пыли и поверхности фильтров после сеанса ее сбора с помощью аспиратора.

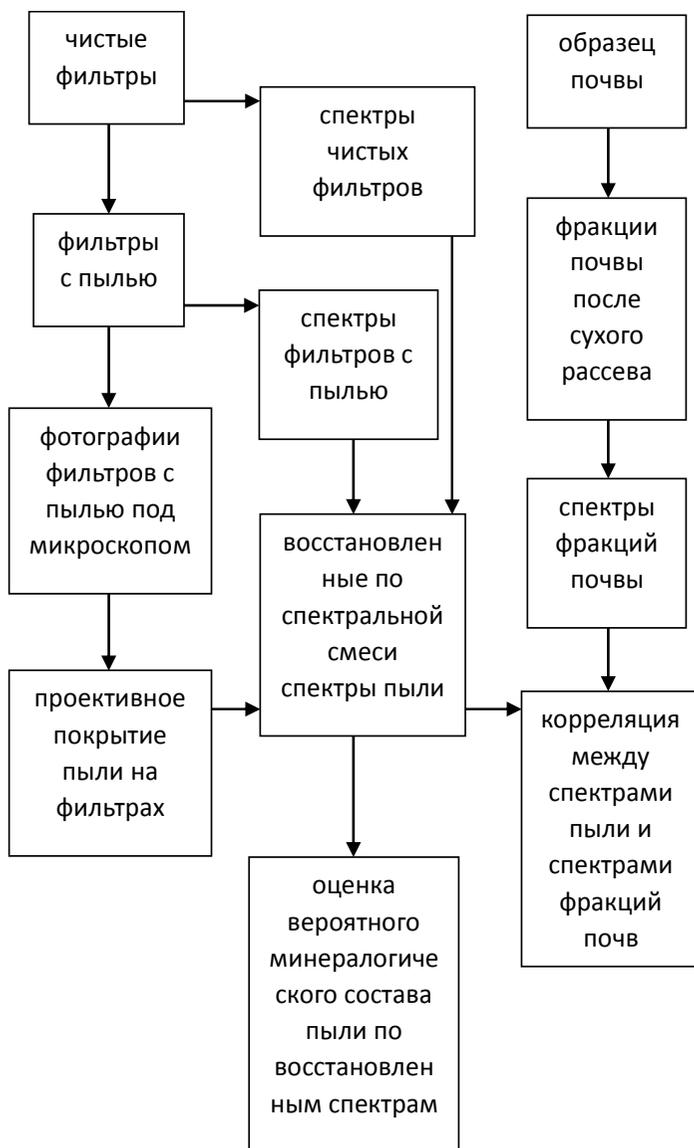


Рис. 1. Последовательность проведения исследований.

Fig. 1. Sequence of the research.

Получение кривых спектрального отражения образцов почв и фильтров осуществлялось с использованием спектрорадиометра SR-6500, регистрирующего отражательную способность в диапазоне длин волн 350–2 500 нм с точностью 1.5 нм в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, 3.0–3.8 нм – в инфракрасном диапазоне. Съемка велась при естественном солнечном освещении. Прибор осуществляет каждое измерение в 40-кратной повторности с автоматическим усреднением. Съемка выполнялась в 5-кратной повторности и полученные кривые также осреднялись. Перед измерением спектров проводилась калибровка прибора с использованием специальной белой панели с коэффициентом отражения 99%.

Для определения размеров частиц пыли на фильтрах были использованы их изображения, полученные под электронным микроскопом VEGA3 TESCAN с увеличением 400–500 раз.

Фильтры после отбора пыли были сфотографированы камерой Olympus DP26 через микроскоп Olympus BX51 (оборудование Центра коллективного пользования научным оборудованием “Функции и свойства почв и почвенного покрова” ФГБНУ ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”) с 40-кратным увеличением. Для поверхности каждого фильтра было сделано по 20 фотографий, которые покрывали всю поверхность фильтра. Все фотографии были импортированы в ГИС ILWIS Academic 3.31, где каждое изображение раскладывалось на каналы (Red, Green, Blue, Gray) и классифицировалось с разбиением на два класса – “пыль” и “фильтр” на основе контролируемой классификации. После этого в ГИС была посчитана доля покрытия фильтра частичками пыли на каждой фотографии и затем был рассчитан усредненный процент площади пыли для всей поверхности фильтра.

Была проведена оценка точности классификации пыли на фильтрах. Для этого было выбрано три классифицированных изображения. Случайным образом в пределах каждого изображения располагали по 40 точек, в которых считывали результаты классификации. Полученные значения сравнивали с исходными изображениями и подсчитывали процент совпадений по каждому классу.

Корреляционный анализ спектральных кривых осуществлялся в программе STATISTICA 6.0.

Поскольку количество собранной на фильтре пыли было недостаточно для прямой съемки ее спектров (частицы пыли не перекрывали полностью поверхность фильтра, а располагались рассеянно) спектральное отражение пыли восстанавливалось расчетным путем. Спектры фильтров с пылью рассматривались как линейная спектральная смесь отражения фильтра и пыли. Расчетный спектр пыли на каждом фильтре был получен по следующей формуле для каждой длины волны:

$$ОП = (ОА - ОФ * ДФ) / ДП,$$

где ОП – отражение пыли, ОА – общее отражение фильтра с пылью, ОФ – отражение фильтра, ДФ – доля площади чистого фильтра, ДП – доля площади пыли на фильтре.

Попытка идентификации минералов в пыли с целью оценки их почвенного происхождения была выполнена на основе их сопоставления с кривыми спектральных библиотек минералов базы данных EZ-ID*, встроенной в приложение DARWin SP V1.5 (<https://spectralevolution.com/products/software/>).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ изображений частиц, полученных под электронным микроскопом, показал, что на фильтрах преобладают частицы пыли размером 50–200 нм (рис. 2). При этом размер преобладающих на фильтре частиц для обоих тестовых полей оказался близким друг другу.

Близость размера частиц, скорее всего, свидетельствует о том, что на расстоянии от поверхности пашни 20–30 см в атмосфере преобладают частицы именно этого размера независимо от свойств подстилающих почв. И, скорее всего, преобладание частиц такого размера связано больше с преобладающей скоростью ветра, а не со свойствами почв.

Для каждого из изображений фильтров была сделана оценка проективного покрытия пыли (рис. 3). Осреднение этих данных

для каждого фильтра позволило оценить среднее проективное покрытие пыли на фильтрах (табл. 1).

Выборочная оценка точности классификации частичек пыли по фотографиям с увеличением 40 раз показала, что в среднем она составляет 86.0%.



Рис. 1. Пример изображения частиц пыли на фильтре при увеличении в 454 раза (видны частицы пыли неправильной формы и волокна фильтра).

Fig. 1. Example image of dust particles on the filter at $\times 454$ magnification (irregularly shaped dust particles and filter fibres can be distinguished).



Рис. 3. Пример классификации изображения фильтра с пылью при увеличении в 40 раз (А – исходное изображение, Б – результат классификации: черные точки – пылеватые частицы на фильтре).

Fig. 3. Example of classification of a filter image with dust at $\times 40$ magnification (А – original image, Б – classification result: black dots – dust particles on the filter).

Таблица 1. Проективное покрытие пыли на фильтрах
Table 1. Projective cover of dust on filters

Тестовый участок	Эммаусс	Шишлово
Среднее значение доли пыли, %	14.74	18.91
Среднее значение доли фильтра, %	85.26	81.09

На рисунках 4 и 5 показаны кривые спектральной отражательной способности чистых фильтров и фильтров с пылью.

Как следует из рисунков 4 и 5, небольшое проективное покрытие фильтра пылью ведет к небольшой разнице между кривыми отражения чистых фильтров и фильтров с пылью.

На рисунках 6 и 7 показаны кривые спектрального отражения пыли для фильтров каждого из участков, построенные на основе линейного моделирования спектральной смеси, в сравнении с кривыми отражения соответствующей размерной фракции почв, выделенной при сухом просеивании (50–200 нм).

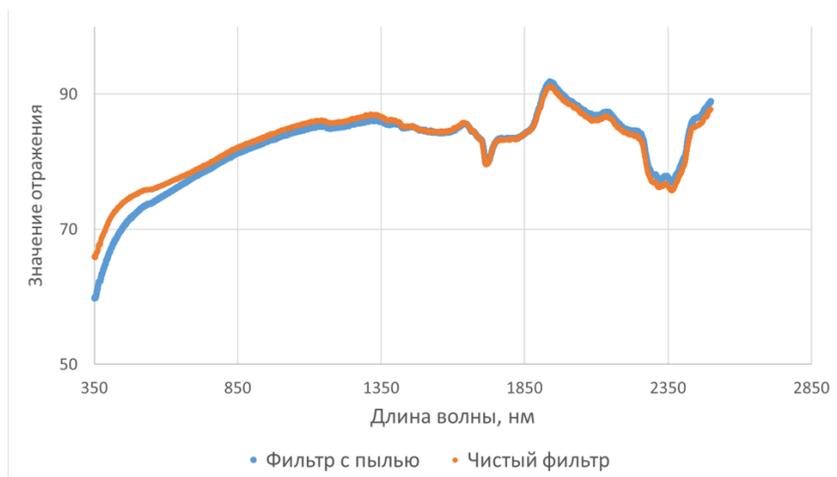


Рис. 4. Кривые спектральной отражательной способности фильтров для участка Эммаусс.

Fig. 4. Spectral reflectance curves of filters for the Emmauss site.

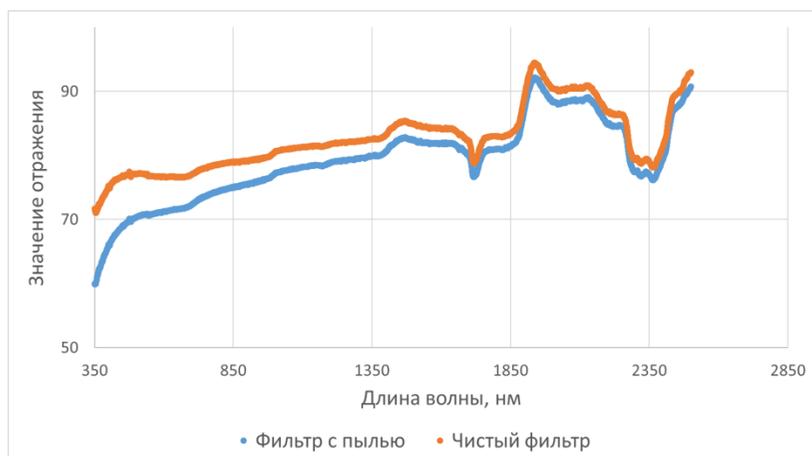


Рис. 5. Кривые спектральной отражательной способности фильтров для участка Шишлово.

Fig. 5. Spectral reflectance curves of filters for the Shishlovo site.

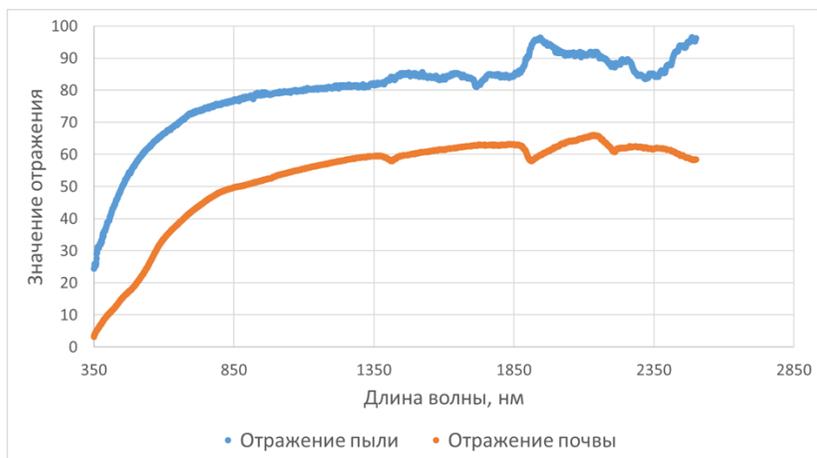


Рис. 6. Кривые спектрального отражения пыли и соответствующей ей фракции почв для участка Эммаусс.

Fig. 6. Spectral reflectance curves of atmospheric dust and corresponding soil fraction for the Emmauss site.

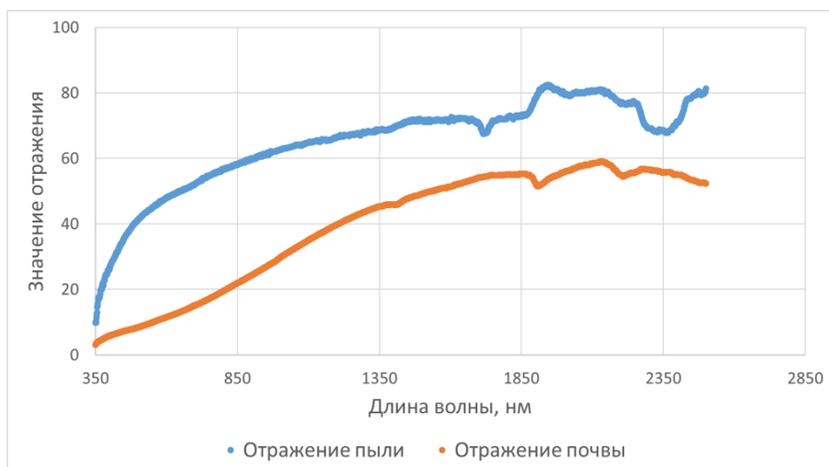


Рис. 7. Кривые спектрального отражения пыли и соответствующей ей фракции почв для участка Шишлово.

Fig. 7. Spectral reflectance curves of atmospheric dust and corresponding soil fraction for the Shishlovo site.

При полном совпадении кривых можно считать, что пыль целиком состоит из анализируемой фракции почв. А чем больше разница между кривыми, тем больший вклад в составе пыли имеют частицы другого происхождения.

Корреляционный анализ показал высокую корреляцию для обоих тестовых участков (табл. 2), что может служить подтверждением тому, что преобладающая часть пыли на обоих фильтрах представляет собой именно почвенные частицы.

Судя по результатам корреляционного анализа, для участка в Эммауссе кривые отражения пыли и почвы различаются сильнее, чем для участка в Шишлово. Коэффициент корреляции Спирмена характеризуется высокими значениями. Наибольшие различия для участка Эммаусс между кривыми отражения пыли и почвы наблюдается на длинах волн: 1 416, 1 914, 1 718, 1 943, 2 258, 2 439, 2 155 нм (рис. 6).

Таблица 2. Коэффициенты корреляции
Table 2. Correlation coefficients

Тестовый участок	Коэффициент корреляции Спирмена	Коэффициент корреляции Тау Кендалла
Эммаусс	0.84*	0.70*
Шишлово	0.90*	0.79*

Примечание. *Значимы при уровне значимости $p < 0.05$.

Note. *Meaningful coefficients at the significance level $p < 0.05$.

В таблице 3 представлен ранжированный на основании коэффициента корреляции перечень присутствующих минералов для каждого из объектов на участке Эммаусс согласно базе данных EZ-ID (с коэффициентом корреляции выше 0.95). С точки зрения вещественного состава, в соответствии с пиками поглощения на обеих кривых отражения (и пыли, и почвы), наблюдается присутствие одних и тех же первичных минералов (кварц, андрадит, циркон и др.), а также некоторых глинистых минералов (анортит), что

дополнительно подтверждает гипотезу о превалировании почвенных частиц в составе собранной пыли (табл. 3).

Таблица 3. Перечень минералов для кривых отражения (Эммаусс)
Table 3. List of minerals for reflection curves (Emmauss)

Пыль		Соответствующая фракция почвы	
Минерал	Коэффициент корреляции*	Минерал	Коэффициент корреляции*
Кварц	0.973	Барит	0.995
Андрадит	0.967	Кварц	0.995
Спессартин	0.959	Андрадит	0.994
Анортит	0.958	Циркон	0.988
Циркон	0.957	Анортит	0.986
Пирротин	0.951	Пирротин	0.975
		Титанит	0.974
		Киноварь	0.973
		Рутил	0.969
		Брукит	0.959
		Микроклин	0.955
		Адуляр	0.952
		Яросит	0.951
		Спессартин	0.951

Примечание. *Коэффициенты корреляции для идентификации минералов на основании формы спектральной кривой рассчитаны автоматически программой DARW in SP V1.5.

Note. *Correlation coefficients for mineral identification, based on the shape of the spectral curve, were calculated automatically by the DARW in SP V1.5 programme.

Тем не менее, в отражении спектральной кривой пыли наблюдаются и существенные отличия от почвенной кривой. Максимальное несоответствие в двух графиках отмечается на кривой

отражения пыли в виде пика в промежутке длин волн 1 860–2 000 нм и далее до 2 500 нм, что может говорить о вероятном наличии в пыли непочвенных частиц (предположительно, это могут быть растительные остатки, семена, споры, пыльца и другая органика/неорганика непочвенного генезиса).

Для участка в Шишлово корреляция между кривыми отражения пыли и почвы характеризуется как очень высокая, и коэффициент Спирмена составляет 0.9. Наибольшие различия между кривыми отражения пыли и почвы наблюдаются на длинах волн: 1 411, 1 908, 2 135, 1 716, 1 943, 2 026, 2 246, 2 362, 2 433 нм (рис. 7).

Как и в первом случае, в составе пыли прослеживается присутствие характерных для почвы минералов (андрадит, кварц, андезин, эпидот и т. д.) (табл. 4). В целом аналогичная с предыдущим участком форма спектральных кривых и высокие коэффициенты корреляции позволяют заключить, что на данном участке в составе собранной пыли почвенный компонент также является доминирующим. На участках кривой отражения пыли 1 870–2 015 нм и далее до 2 200 нм заметны наибольшие отличия от почвенной спектральной кривой. Предположительно, это также включения непочвенного происхождения.

Конечно же, полученные результаты не могут рассматриваться как полное подтверждение гипотезы о почвенном происхождении пыли на фильтрах. Это лишь косвенное подтверждение. Но оно свидетельствует о высоком вкладе почвенных частиц в запыленность атмосферы над пахотными угодьями.

По-видимому, результат исследований должен сильно зависеть от преобладающей скорости ветра и высоты расположения аспирометра над поверхностью почвы. Теоретически, чем выше расположен аспирометр, тем более мелкие частицы пыли должны оседать на фильтрах и тем меньше может быть вклад почвенных частиц. Но для подтверждения этой гипотезы необходимо проведение дополнительных исследований.

Таблица 4. Перечень минералов для кривых отражения (Шишлово)
Table 4. List of minerals for reflection curves (Shishlovo)

Пыль		Соответствующая фракция почвы	
Минерал	Коэффициент корреляции*	Минерал	Коэффициент корреляции*
Андезин	0.969	Гидроксилapatит	0.995
Андрадит	0.969	Роговая обманка	0.99
Флогопит	0.968	Пирит	0.987
Анортит	0.967	Ортит	0.987
Кварц	0.966	Гематит	0.984
Волластонит	0.966	Куприт	0.979
Эпидот	0.962	Андрадит	0.976
Титанит	0.961	Сидерит	0.972
Битовнит	0.957	Корренсит	0.967
Пирротит	0.953	Иллит	0.966
		Геденбергит	0.965
		Лазурит	0.965
		Брукит	0.963
		Хлорит	0.962
		Тюрингит	0.962
		Титанит	0.959
		Галенит	0.959
		Андезин	0.959
		Жадеит	0.958
		Куприт	0.957
		Битовнит	0.956

Примечание. *Коэффициенты корреляции для идентификации минералов на основании формы спектральной кривой рассчитаны автоматически программой DARW in SP V1.5.

Note. *Correlation coefficients for mineral identification, based on the shape of the spectral curve, were calculated automatically by the DARW in SP V1.5 programme.

ВЫВОДЫ

В условиях незначительной запыленности атмосферы и трудоемкости сбора достаточного количества пыли для прямого анализа использованный подход может служить альтернативой для косвенного подтверждения почвенного происхождения пыли в приземном слое атмосферы. В перспективе данный подход можно использовать в качестве средства мониторинга дефляции почв пахотных угодий.

Полученные результаты показали преобладающий вклад почвенных частиц в пыли, содержащейся в воздухе над пахотными полями. Но необходимы дополнительные исследования для получения более устойчивых результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Егоров В.Н., Хабаров Д.А.* Определение запыленности воздуха (Методические указания). М.: 2016.
2. *Ивлев Л.С.* Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1982. 365 с.
3. *Ивлев Л.С., Довгалик Ю.А.* Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. 194 с.
4. Краткая географическая энциклопедия. Том 3 / Гл. ред. *Григорьев А.А.* М.: Советская энциклопедия, 1962. 580 с.
5. *Петрянов-Соколов И.В.* Избранные труды. Законы фильтрации аэрозолей. М.: Наука, 2007. 458 с.
6. *Пирумов А.И.* Обеспыливание воздуха. М.: Стройиздат, 1974. 207 с.
7. *Романовская А.Ю., Савин И.Ю.* Аэрозольная пыль почвенного происхождения в атмосфере: источники, количество, свойства (обзор) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2021. Вып. 109. С. 36–95. DOI: [10.19047/0136-1694-2021-109-36-95](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-109-36-95).
8. *Attiya A.A., Jones B.G.* Assessment of mineralogical and chemical properties of airborne dust in Iraq // SN Appl. Sci. 2020. Vol. 2. 1614. DOI: [10.1007/s42452-020-03326-5](https://doi.org/10.1007/s42452-020-03326-5).
9. *Baensch-Baltruschat B., Kocher B., Stock F., Reifferscheid G.* Tyre and road wear particles (TRWP) – A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 733. 1378237. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.137823](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137823).
10. *Bauer E., Ganopolski A.* Sensitivity simulations with direct radiative

- forcing by aeolian dust during glacial cycles // *Climate of the Past*. 2014. Vol. 10 (4). P. 149–193. DOI: [10.5194/cp-10-1333-2014](https://doi.org/10.5194/cp-10-1333-2014).
11. *Ginoux P., Prospero J., Gill T., Hsu N., Zhao M.* Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products // *Rev. Geophys.* 2012. Vol. 50. RG3005. DOI: [10.1029/2012RG000388](https://doi.org/10.1029/2012RG000388).
12. *Harrison R.M., Jones A.M., Gietl J., Yin J., Green D.C.* Estimation of the Contributions of Brake Dust, Tire Wear, and Resuspension to Nonexhaust Traffic Particles Derived from Atmospheric Measurements // *Environmental Science & Technology*. 2012. Vol. 46 (12). P. 6523–6529. DOI: [10.1021/es300894r](https://doi.org/10.1021/es300894r).
13. *Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Dai X., Maskell K., Johnson C.A.* *Climate Change 2001: the Scientific Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
14. *Kandler K., Scheuvs D.* Asian and Saharan dust from a chemical/mineralogical point of view: differences and similarities from bulk and single particle measurements // *Central Asian Dust Conference (CADUC)*. 2019. Vol. 99. 03001. DOI: [10.1051/e3sconf/20199903001](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199903001).
15. *Katra I.* Soil Erosion by Wind and Dust Emission in Semi-Arid Soils Due to Agricultural Activities // *Agronomy*. 2020. Vol. 10. 89, DOI: [10.3390/agronomy10010089](https://doi.org/10.3390/agronomy10010089).
16. *Kok J.F., Ridley D.A., Zhou Q., Miller R.L., Zhao C., Heald C.L., Ward D.S., Albani S., Haustein K.* Smaller desert dust cooling effect estimated from analysis of dust size and abundance // *Nature Geoscience*. 2017. Vol. 10 (4). P. 274–278. DOI: [10.1038/ngeo2912](https://doi.org/10.1038/ngeo2912).
17. *Kokhanovsky A.A.* *Aerosol Optics. Light Absorption and Scattering by Particles in the Atmosphere*. Springer, 2008. 146 p.
18. *Mahowald N.M., Rivera G.D.R., Luo C.* Comment on “Relative importance of climate and land use in determining present and future global soil dust emission” by I. Tegen et al. // *Geophysical Research Letters*. 2004. Vol. 31. DOI: [10.1029/2004GL021272](https://doi.org/10.1029/2004GL021272).
19. *Mona L., Liu Z., Müller D., Omar A., Papayannis A., Pappalardo G., Sugimoto N., Vaughan M.* Lidar Measurements for Desert Dust Characterization: An Overview // *Advances in Meteorology*. 2012. Article ID 356265. DOI: [10.1155/2012/356265](https://doi.org/10.1155/2012/356265).
20. *Prospero J., Ginoux P., Torres O., Nicholson Sh., Gill T.* Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. // *Reviews of Geophysics*. 2002. 40. Article ID 1002. DOI: [10.1029/2000RG000095](https://doi.org/10.1029/2000RG000095).
21. *Sharratt B., Auvermann B.* Dust Pollution from Agriculture / In:

- Encyclopedia of Agriculture and Food Systems. 2014. P. 487–504. DOI: [10.1016/B978-0-444-52512-3.00089-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00089-9).
22. Taheria F., Forouzani M., Yazdanpanah M., Ajilib A. How farmers perceive the impact of dust phenomenon on agricultural production activities: A Q-methodology study // Journal of Arid Environments. 2020. Vol. 173. 104028. DOI: [10.1016/j.jaridenv.2019.104028](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104028).
23. Varga G., Dagsson-Waldhauserová P., Gresina F. et al. Saharan dust and giant quartz particle transport towards Iceland // Sci. Rep. 2021. Vol. 11. 11891. DOI: [10.1038/s41598-021-91481-z](https://doi.org/10.1038/s41598-021-91481-z).
24. van der Does M., Knippertz P., Zschenderlein P., Giles Harrison R., Stutt J.-B. W. The mysterious long-range transport of giant mineral dust particles // Sci. Adv. 2018. Vol. 4. No. 12. eaau2768. DOI: [10.1126/sciadv.aau2768](https://doi.org/10.1126/sciadv.aau2768).
25. Yu H., Tan Q., Chin M., Remer L.A., Kahn R.A., Bian H., Kim D., Zhang Z., Yuan T., Omar A.H. et al. Estimates of African Dust Deposition Along the Trans-Atlantic Transit Using the Decadelong Record of Aerosol Measurements from CALIOP, MODIS, MISR, and IASI // J. Geophys. Res. Atmos. 2019. Vol. 124. P. 7975–7996.
26. Zucca C., Middleton N., Kang U., Liniger H. Shrinking water bodies as hotspots of sand and dust storms: The role of land degradation and sustainable soil and water management // CATENA. 2021. Vol. 207. 105669. DOI: [10.1016/j.catena.2021.105669](https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105669).

REFERENCES

1. Egorov V.N., Khabarov D.A., *Opređenje zapylennosti vozdukh (Metodicheskie ukazaniya)* (Determination of air dustiness (Methodological instructions)), Moscow: 2016.
2. Ivlev L.S., *Khimicheskii sostav i struktura atmosferynykh aerorozolei* (Chemical composition and structure of atmospheric aerosols), Leningrad: Izd-vo Leningradskogo un-ta, 1982, 365 p.
3. Ivlev L.S., Dovgalyuk Yu.A., *Fizika atmosferynykh aerorozol'nykh system* (Physics of Atmospheric Aerosol Systems), St. Petersburg: NIIKh SPbGU, 1999, 194 p.
4. Grigor'ev A.A., *Kratkaya geograficheskaya entsiklopediya* (Concise Geographic Encyclopedia), Vol. 3, Moscow: Sovetsvkaya entsiklopediya, 1962, 580 p.
5. Petryanov-Sokolov I.V., *Izbrannye trudy. Zakony fil'tratsii aerorozolei* (Selected Works. Laws of aerosol filtration), Moscow: Nauka, 2007, 458 p.
6. Pirumov A.I., *Obespylyvanie vozdukh (Air cleaning from dust)*, Moscow: Stroiizdat, 1974, 207 p.

7. Romanovskaya A.Yu., Savin I.Yu., Soil dust aerosol in the atmosphere: sources, quantities, properties (overview), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2021, Vol. 109, pp. 36–95, DOI: [10.19047/0136-1694-2021-109-36-95](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-109-36-95).
8. Attiya A.A., Jones B.G., Assessment of mineralogical and chemical properties of airborne dust in Iraq, *SN Appl. Sci.*, 2020, Vol. 2, 1614, DOI: [10.1007/s42452-020-03326-5](https://doi.org/10.1007/s42452-020-03326-5).
9. Baensch-Baltruschat B., Kocher B., Stock F., Reifferscheid G., Tyre and road wear particles (TRWP) – A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment, *Science of the Total Environment*, 2020, Vol. 733, 1378237, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.137823](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137823).
10. Bauer E., Ganopolski A., Sensitivity simulations with direct radiative forcing by aeolian dust during glacial cycles, *Climate of the Past*, 2014, Vol. 10 (4), pp. 149–193, DOI: [10.5194/cp-10-1333-2014](https://doi.org/10.5194/cp-10-1333-2014).
11. Ginoux P., Prospero J., Gill T., Hsu N., Zhao M., Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products, *Rev. Geophys.*, 2012, Vol. 50, RG3005, DOI: [10.1029/2012RG000388](https://doi.org/10.1029/2012RG000388).
12. Harrison R.M., Jones A.M., Gietl J., Yin J., Green D.C., Estimation of the Contributions of Brake Dust, Tire Wear, and Resuspension to Nonexhaust Traffic Particles Derived from Atmospheric Measurements, *Environmental Science & Technology*, 2012, Vol. 46 (12), pp. 6523–6529, DOI: [10.1021/es300894r](https://doi.org/10.1021/es300894r).
13. Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguier M., van der Linden P.J., Dai X., Maskell K., Johnson C.A., *Climate Change 2001: the Scientific Basis*, Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
14. Kandler K., Scheuven D., Asian and Saharan dust from a chemical/mineralogical point of view: differences and similarities from bulk and single particle measurements, *Central Asian Dust Conference (CADUC)*, 2019, Vol. 99, 03001, DOI: [10.1051/e3sconf/20199903001](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199903001).
15. Katra I., Soil Erosion by Wind and Dust Emission in Semi-Arid Soils Due to Agricultural Activities, *Agronomy*, 2020, Vol. 10, 89, DOI: [10.3390/agronomy10010089](https://doi.org/10.3390/agronomy10010089).
16. Kok J.F., Ridley D.A., Zhou Q., Miller R.L., Zhao C., Heald C.L., Ward D.S., Albani S., Haustein K. Smaller desert dust cooling effect estimated from analysis of dust size and abundance, *Nature Geoscience*, 2017, Vol. 10 (4), pp. 274–278, DOI: [10.1038/ngeo2912](https://doi.org/10.1038/ngeo2912).
17. Kokhanovsky A.A., *Aerosol Optics. Light absorption and scattering by particles in the atmosphere*, Springer, 2008, 146 p.
18. Mahowald N.M., Rivera G.D.R., Luo C., Comment on “Relative importance of climate and land use in determining present and future global

- soil dust emission” by I. Tegen et al., *Geophysical Research Letters*, 2004, Vol. 31, DOI: [10.1029/2004GL021272](https://doi.org/10.1029/2004GL021272).
19. Mona L., Liu Z., Müller D., Omar A., Papayannis A., Pappalardo G., Sugimoto N., Vaughan M., Lidar Measurements for Desert Dust Characterization: An Overview, *Advances in Meteorology*, 2012, Article ID 356265, DOI: [10.1155/2012/356265](https://doi.org/10.1155/2012/356265).
20. Prospero J., Ginoux P., Torres O., Nicholson Sh., Gill T., Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product, *Reviews of Geophysics*, 2002, 40, 1002, DOI: [10.1029/2000RG000095](https://doi.org/10.1029/2000RG000095).
21. Sharratt B., Auvermann B., Dust Pollution from Agriculture, In: *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, 2014, pp. 487–504, DOI: [10.1016/B978-0-444-52512-3.00089-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00089-9).
22. Taheria F., Forouzani M., Yazdanpanah M., Ajilib A., How farmers perceive the impact of dust phenomenon on agricultural production activities: A Q-methodology study, *Journal of Arid Environments*, 2020, Vol. 173, 104028, DOI: [10.1016/j.jaridenv.2019.104028](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104028).
23. Varga G., Dagsson-Waldhauserová P., Gresina F. et al., Saharan dust and giant quartz particle transport towards Iceland, *Sci. Rep.*, 2021, Vol. 11, 11891, DOI: [10.1038/s41598-021-91481-z](https://doi.org/10.1038/s41598-021-91481-z).
24. van der Does M., Knippertz P., Zschenderlein P., Giles Harrison R., Stuut J.-B. W., The mysterious long-range transport of giant mineral dust particles, *Sci. Adv.*, 2018, Vol. 4, No. 12, eaau2768, DOI: [10.1126/sciadv.aau2768](https://doi.org/10.1126/sciadv.aau2768).
25. Yu H., Tan Q., Chin M., Remer L.A., Kahn R.A., Bian H., Kim D., Zhang Z., Yuan T., Omar A.H. et al., Estimates of African Dust Deposition Along the Trans-Atlantic Transit Using the Decadelong Record of Aerosol Measurements from CALIOP, MODIS, MISR, and IASI, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2019, Vol. 124, pp. 7975–7996.
26. Zucca C., Middleton N., Kang U., Liniger H., Shrinking water bodies as hotspots of sand and dust storms: The role of land degradation and sustainable soil and water management, *CATENA*, 2021, Vol. 207, 105669, DOI: [10.1016/j.catena.2021.105669](https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105669).