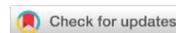


УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-112-24-47



Ссылки для цитирования:

Савин И.Ю., Шишкин М.А., Шарычев Д.В. Особенности спектральной отражательной способности фракций образцов почв размером от 20 до 5 000 мкм // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 112. С. 24-47. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-112-24-47

Cite this article as:

Savin I.Yu., Shishkin M.A., Sharychev D.V., Peculiarities of spectral reflectance of fractions with sizes from 20 to 5,000 microns in soil samples, Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 112, pp. 24-47, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-112-24-47

Благодарность:

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-67-46017).

Acknowledgments:

The studies were carried out with the financial support of the Russian Scientific Foundation (project No. 20-67-46017).

Особенности спектральной отражательной способности фракций образцов почв размером от 20 до 5 000 мкм

© 2022 г. И. Ю. Савин^{1,2*}, М. А. Шишкин^{1**}, Д. В. Шарычев^{1***}

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_ivu@esoil.ru,

** <https://orcid.org/0000-0003-2320-6645>, e-mail: shishkin_ma@esoil.ru,

*** <https://orcid.org/0000-0002-6799-3209>, e-mail: sharychev_dv@esoil.ru.

²Белгородский государственный национальный
исследовательский университет, Россия,
308015, Белгород, ул. Победы, 85

Поступила в редакцию 10.07.2022, после доработки 13.09.2022,
принята к публикации 27.09.2022

Резюме: На примере образцов пахотных горизонтов трех почв (дерново-подзолистой, серой лесной и чернозема выщелоченного) исследованы особенности отражения электромагнитных волн от их фракций разных

размеров. Выделение фракций путем сухого просеивания проведено с использованием машины для просеивания Retsch AS 200 BASIC. Выделено 14 фракций размером от менее 20 мкм до размера более 5 000 мкм. Для каждой фракции и для образца почв до просеивания была определена спектральная отражательная способность в диапазоне электромагнитных волн от 350 до 2 500 нм с использованием полевого спектрорадиометра SR-6500 (Spectral Evolution, USA). Проведен анализ сходства и различий полученных кривых спектральной отражательной способности отдельных фракций с использованием их визуального анализа, метода построения дендрограмм сходства, а также регрессионный анализ между отражением света и размером фракций. Подтверждено, что на более детальном уровне анализа, по сравнению с проведенным другими исследователями ранее, общие закономерности отражения света образцами не изменяются. Наблюдается более высокое отражение волн более тонкими фракциями и меньшее отражение – более крупными фракциями. При этом кривые спектрального отражения для отдельных фракций выбиваются из общей закономерности, изменяется выраженность локальных экстремумов кривых. Это подтверждает отличие вещественного состава, формирующего цвет почв, этих фракций от других. Также это свидетельствует о том, что цвет смешанного образца является спектральной смесью цвета его отдельных гранулометрических фракций, каждая из которых обладает своими особенностями отражения света. Предположительно, именно это является основной причиной такого явления как изменение спектральной отражательной способности открытой поверхности почв под воздействием атмосферных осадков.

Ключевые слова: цвет почв, сухое просеивание, почвенные фракции разных размеров.

Peculiarities of spectral reflectance of fractions with sizes from 20 to 5,000 microns in soil samples

© 2022 I. Yu. Savin^{1,2*}, M. A. Shishkin^{1**}, D. V. Sharychev^{1***}

¹*Federal 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,*

^{**}*<https://orcid.org/0000-0003-2320-6645>, e-mail: shishkin_ma@esoil.ru,*

^{***}*<https://orcid.org/0000-0002-6799-3209>, e-mail: sharychev_dv@esoil.ru.*

²*Belgorod Federal University,
85 Pobedy Str., Belgorod 308015, Russian Federation.*

Received 11.07.2022, Revised 13.09.2022, Accepted 27.09.2022

Abstract: By the example of arable horizon samples taken from three soil types (sod-podzolic, gray forest, and leached chernozem) the peculiarities of electromagnetic waves reflection from their different particle size fractions were studied. The extraction of fractions by dry sieving was carried out using Retsch AS 200 BASIC equipment. As a result, 14 fractions ranging in size from less than 20 microns to more than 5,000 microns were isolated. Spectral reflectance was determined for each fraction and for the soil sample before sieving in the electromagnetic wave range from 350 to 2,500 nm using a SR-6500 field spectroradiometer (Spectral Evolution, USA). Analysis of similarities and differences in the obtained spectral reflectance curves of individual fractions was carried out using their visual analysis, the method of similarity dendrogram construction, as well as regression analysis between light reflectance and fraction particle size. It was confirmed that at a more detailed level of analysis compared to the one carried out by other researchers earlier, the general patterns of light reflectance of the samples do not change. A higher reflection of waves by thinner fractions and a lower reflection by more coarse fractions are observed. At the same time, spectral reflection curves for individual fractions are out of the general pattern, the level of intensity of local extremes of the curves' changes. This confirms the difference of the material composition, which forms the color of soils, of these fractions from others. The color of the mixed sample is a spectral mixture of colors of its separate fractions. Presumably, this is the main reason for such a phenomenon as change of spectral reflectivity of open surface of soils under the influence of atmospheric precipitation.

Keywords: soil color, soil spectral reflectance, dry sieving, soil fractions of different particle sizes.

ВВЕДЕНИЕ

Цвет почвы является важнейшим морфологическим свойством, которое используется для полевой диагностики почв.

Различия почв и их генетических горизонтов по цвету широко используется при их классификации. Так, многие названия почв в советской ([Классификация..., 1977](#)), российской ([Классификация..., 2004](#)) классификации, классификациях почв других стран ([A Handbook of Soil Terminology..., 2009](#); [World ref-](#)

[erence base, 2015](#); [Isbell, 2021](#)) определяются их цветом.

Анализ особенностей отражения света почвами положен в основу их распознавания по данным дистанционного зондирования ([Ben-Dor et al., 1999](#)) и в развитие бесконтактного зондирования почв в целом ([Viscarra Rossel et al., 2011](#)).

Специфика анализа цвета почв существенно изменилась с момента становления почвоведения как науки до настоящего времени. Визуальный аналоговый анализ цвет почв начальных этапов ([Захаров, 1931](#)) сменился во второй половине прошлого века внедрением подходов, основанных на использовании для описания цвета почв специальных эталонов ([Munsell..., 2022](#)), которые широко используются и по сей день ([Mancini et al., 2020](#)). Позднее появилась возможность широкого использования для анализа цвета почв спектрорадиометров, которые позволили получать информацию о цвете в цифровом количественном виде: в виде кривых спектрального отражения света почвами ([FAO, 2022](#)).

Доступность для анализа спектрорадиометров привела к качественному скачку в получении данных о цвете и спектральной отражательной способности (СОС) почв и позволила получать информацию на максимально детальном уровне. Это открывает новые возможности для более детального изучения специфики формирования цвета почв, а также для оценки связей цвета почв с их свойствами ([Savin et al., 2016](#)).

В настоящее время наблюдается активная работа по созданию региональных и глобальных баз данных СОС почв ([Viscarra Rossel et al., 2016](#); [Dematté et al., 2019](#); [Kirillova et al., 2021](#)).

Также ведутся исследования по разработке новых алгоритмов детектирования отдельных свойств почв по данным дистанционного зондирования, которые также базируются на анализе связей специфики отражения света почвами с их свойствами ([Савин и др., 2019](#)).

Влияние гранулометрического состава почв на их цвет изучается уже много лет ([Bowers, Hanks, 1965](#); [Михайлова, Орлов, 1986](#); [Дробыш и др., 2013](#)). Установлены общие закономерности изменения цвета почв в зависимости от состояния поверхности образца (шероховатости и размера почвенных частиц) ([Караванова, 2003](#); [Bänninger et al., 2006](#); [Sadeghi et al., 2018](#)). Но

выводы авторов, как правило, подтверждаются лишь локально, что не позволяет говорить о том, что данная проблема уже решена. Для получения более надежных связей требуется больше данных полевых и лабораторных экспериментов.

В рассматриваемой статье представлены результаты исследований СОС фракций почвенных частиц разного размера, выделенных сухим просеиванием из образцов дерново-подзолистой, серой лесной почв и чернозема выщелоченного.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Анализировались три образца пахотного горизонта дерново-подзолистой почвы (Домодедовский район Московской области), серой лесной почвы (Каширский район Московской области) и чернозема выщелоченного (Веневский район Тульской области). Все почвы имеют тяжелосуглинистый грансостав и развиты на покровных суглинках, которые в Веневском районе лёссовидные. Содержание гумуса в образце дерново-подзолистой почвы в среднем составляет 1.4%, в образце серой лесной почвы – 4.3% и 6.2% – в черноземной почве.

Образцы были высушены до воздушно-сухого состояния и после этого рассеяны на почвенные фракции размером:

- менее 20 мкм
- 20–30 мкм
- 30–40 мкм
- 40–50 мкм
- 50–63 мкм
- 63–71 мкм
- 71–80 мкм
- 80–90 мкм
- 90–100 мкм
- 100–250 мкм
- 250–500 мкм
- 500–1 000 мкм
- 1 000–2 000 мкм
- 2 000–5 000 мкм
- более 5 000 мкм

Рассеивание проводилось с использованием машины для просеивания Retsch AS 200 BASIC (амплитуда – 3 мм, время – 15 минут, с паузой каждую минуту).

После этого в лабораторных условиях для выровненной поверхности образца каждой из выделенных фракций определялась СОС с использованием специального источника света (галогеновая лампа 40 w ILM-660 Tungsten Halogen Light Source). Также были определены спектры отражения образцов до их рассеивания. Спектры определялись в 5-кратной повторности спектрорадиометром SR-6500 (Spectral Evolution, Inc., USA), который представляет собой полнодиапазонный UV/VIS/NIR спектрорадиометр со спектральным диапазоном 350–2 500 нм. Спектральное разрешение прибора составляет 1.5 нм при длине волны 700 нм, 3.0 нм при 1 500 нм, 3.8 нм при 2 100 нм. Первичная обработка данных спектрорадиометра (перевод в текстовый формат, первичное осреднение) осуществлялась с использованием программного обеспечения Darwin SP data Acquisition software (Spectral Evolution, Inc., USA). После этого в Excel кривые отражения были осреднены и использованы для дальнейшего анализа.

Построение дендрограмм сходства осредненных кривых спектрального отражения, а также регрессионный анализ между СОС и размером частиц проводились в Statistica 6.0. В качестве критерия оценки качества регрессионной модели (метод наименьших квадратов) использовалось значение коэффициента детерминации (R^2), рассчитанного по стандартной методике (http://statsoft.ru/products/STATISTICA_Base/).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены кривые спектрального отражения всех выделенных почвенных фракций для трех проанализированных образцов почв. Кривые для разных почв отличаются между собой.

Для всех трех образцов прослеживается четкая закономерность: кривые для части фракций лежат ниже кривой для смешанного образца (до рассеяния), а других фракций – выше этой кривой. Причем для более крупных фракций характерно более низкое отражение, а для более мелких фракций – более высокое отраже-

ние. Эта закономерность прослеживается для образцов всех проанализированных почв, за исключением лишь нескольких кривых.

Кривые отдельных фракций каждого образца в целом имеют схожую форму (выраженность локальных экстремумов). Но из этого правила также есть исключения. Форма кривых становится более разнообразной (меняется наклон кривой и выраженность локальных экстремумов) в ряду дерново-подзолистые почвы – серые лесные почвы – чернозем.

Зависимости и коэффициент детерминации регрессии между средним отражением электромагнитных волн в диапазоне 350–2 500 нм и размером частиц (среднее для каждой фракции) представлены на рисунке 2 (А, Б, В). Из рисунка следует, что зависимости немного разнятся для образцов проанализированных почв. Однако общая закономерность для всех почв состоит в том, что более тонкие фракции (мельче фракции 100–250 мкм) демонстрируют большее отражение. Самые тонкие фракции в среднем отражают около 60–80% электромагнитных волн.

В образце дерново-подзолистой почвы самым низким отражением характеризуется самая крупная фракция (около 20%). Небольшой локальный минимум есть также для фракции 1 000–2 000 мкм (рис. 2А).

В образце серой лесной почвы минимум отражения приходится на фракцию 500–100 мкм, а для более крупных фракций наблюдается небольшой рост отражения (рис. 2Б).

Для образца чернозема минимум отражения приходится на фракцию 250–500 мкм, но, в отличие от других почв, здесь есть локальный максимум для фракции 1 000–2 000 мкм (рис. 2В).

В целом зависимость между отражением электромагнитных волн и размером почвенных частиц на разных длинах волн для всех почв носит схожий характер и может быть аппроксимирована степенной функцией, но с разным коэффициентом детерминации (R^2). На рисунке 2Г приведена зависимость коэффициента детерминации от длины волны.

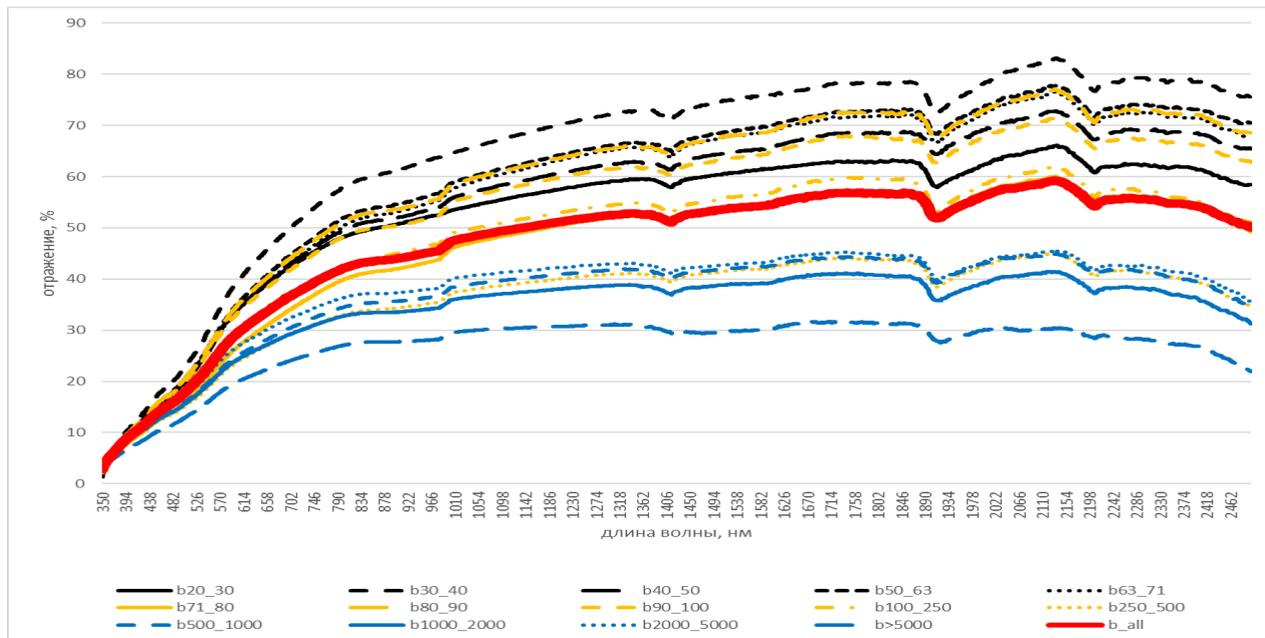


Рис. 1А. Кривые спектрального отражения фракций разного размера для образца дерново-подзолистой почвы (числами указаны диапазоны размера фракции в мкм, all – образец до фракционирования).

Fig. 1A. Spectral reflection curves of different particle size fractions of the sod-podzol soil sample (the numbers indicate the fraction size ranges, measured in μm ; all – soil sample before fractionation).

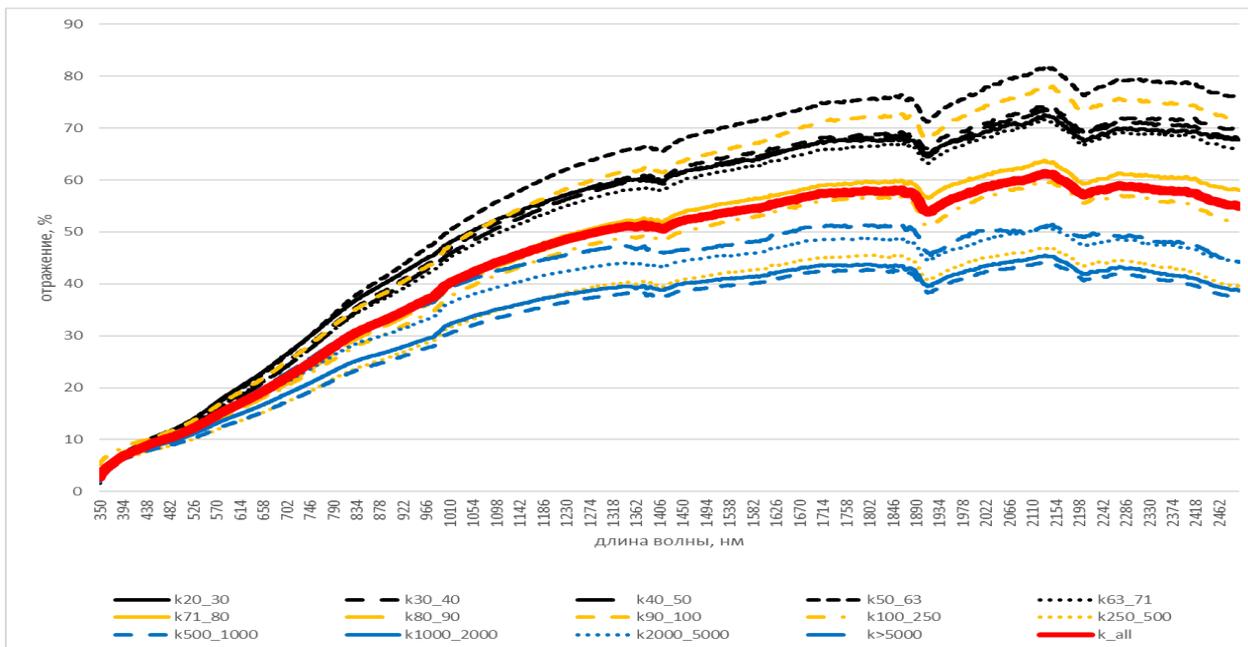


Рис. 1Б. Кривые спектрального отражения фракций разного размера для образца серой лесной почвы (числами указаны диапазоны размера фракции в мкм, all – образец до фракционирования).

Fig. 1B. Spectral reflection curves of different particle size fractions of the gray forest soil sample (the numbers indicate the fraction size ranges in μm ; all – soil sample before fractionation).

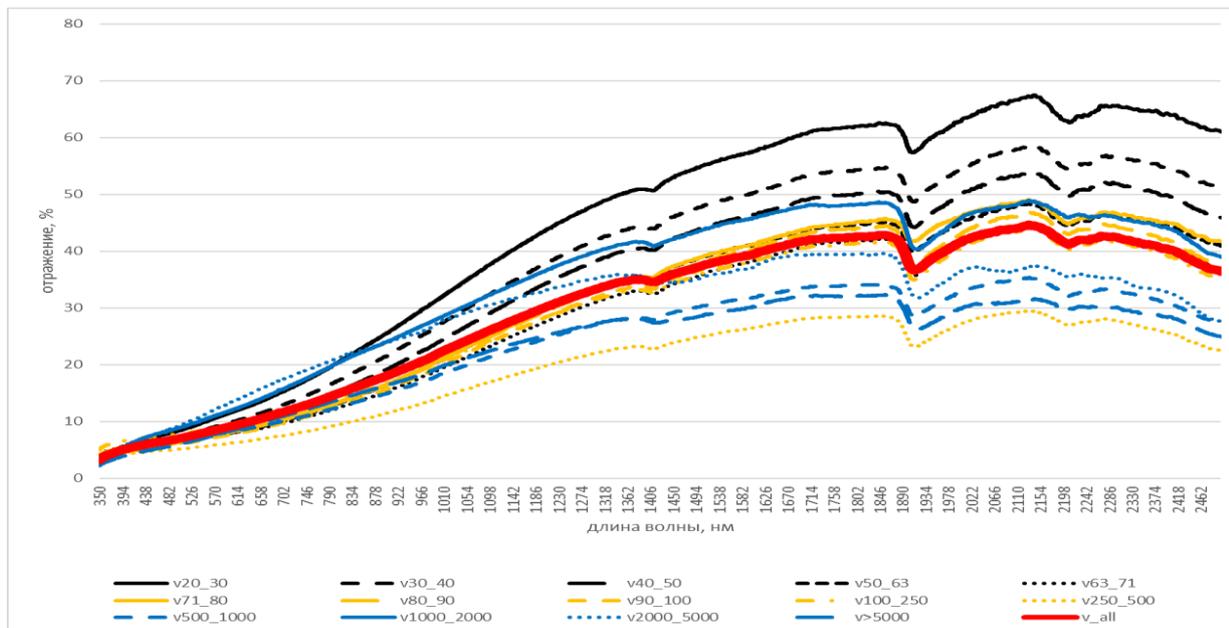
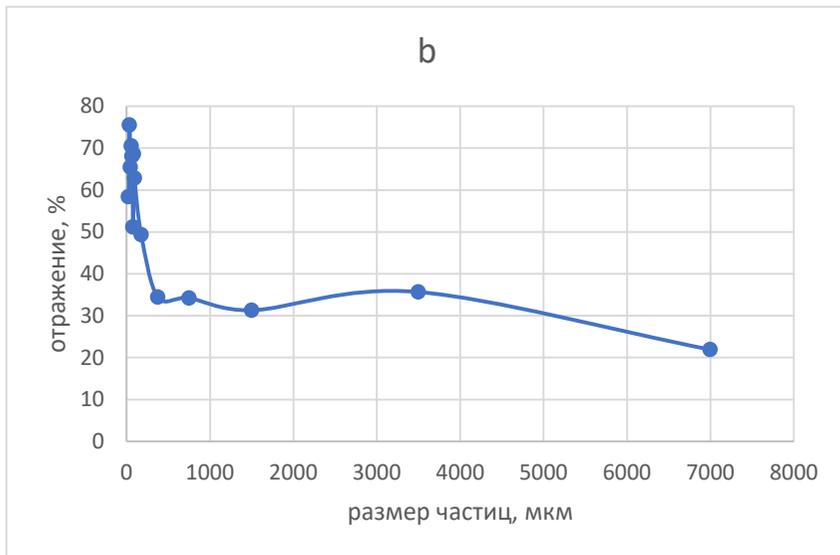


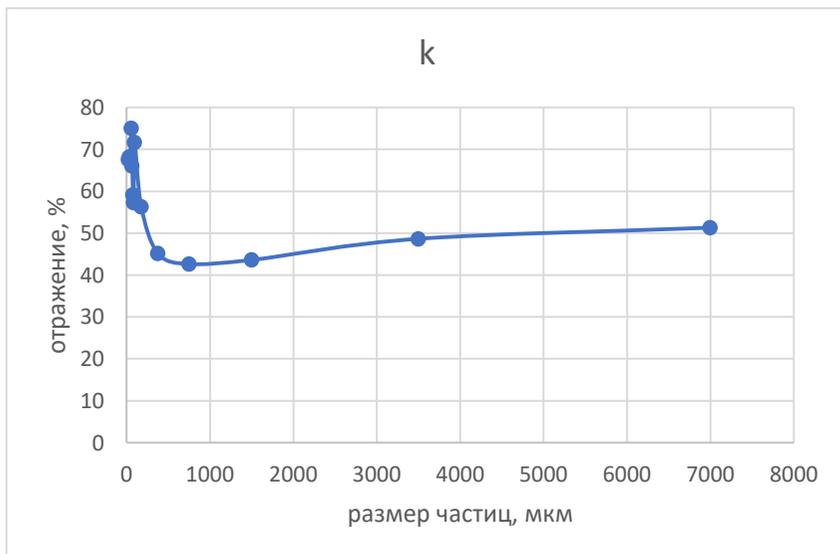
Рис. 1В. Кривые спектрального отражения фракций разного размера для образца черноземной почвы (числами указаны диапазоны размера фракции в мкм, all – образец до фракционирования).

Fig. 1B. Spectral reflection curves of different particle size fractions of the chernozem soil sample (the numbers indicate fraction size ranges in μm ; all – soil sample before fractionation).

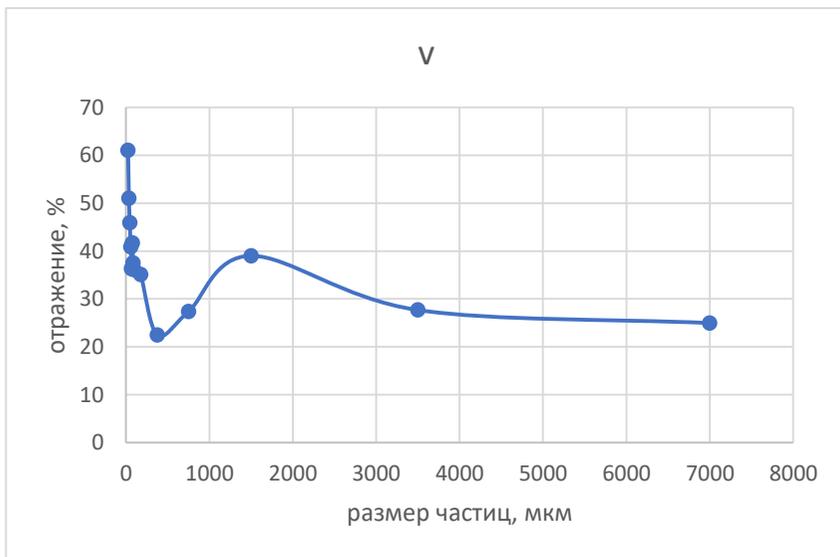
А



Б



В



Г

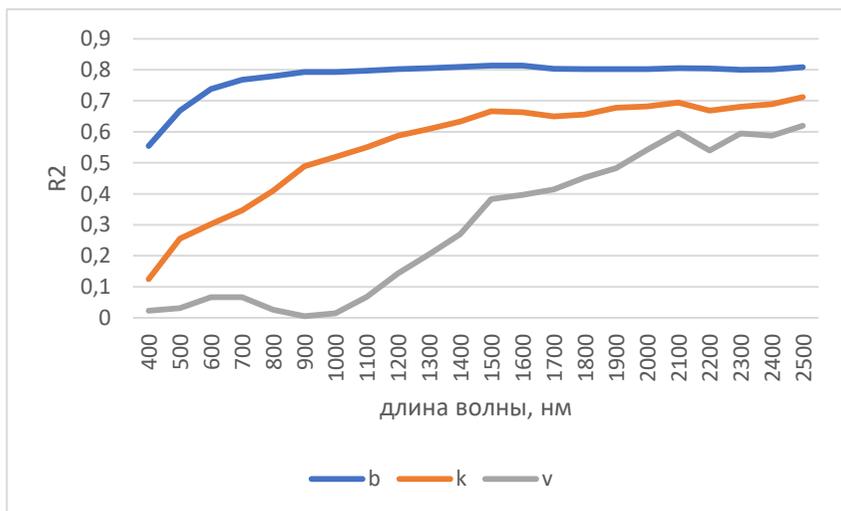


Рис. 2. Зависимость отражения электромагнитных волн от размера частиц (**А**, **Б** и **В** – среднее отражение в диапазоне 350–2 500 нм соответственно для дерново-подзолистой, серой лесной почв и чернозема, **Г** – коэффициент детерминации степенной зависимости отражения фракций от размера частиц на разных длинах волн для образцов почв (**б** – дерново-подзолистая, **к** – серая лесная, **в** – чернозем)).
Fig. 2. Dependence of electromagnetic wave reflection on particle size (**A**, **B** and **V** – average reflection in the range of 350–2,500 nm for sod-podzolic, gray forest soils and chernozem, respectively, **Г** – determination factor for the dependence of reflection of fractions on particle size at different wavelengths for soil samples (**b** – sod-podzolic, **k** – gray forest, **v** – chernozem)).

Из рисунка следует, что R^2 для дерново-подзолистой почвы на большинстве длин волн составляет 0.8, максимальные значения R^2 для серой лесной почвы не превышают 0.7 (на длинах волн 1 500 нм и больше), а для чернозема – 0.6 (на волнах длиннее 2 100 нм). Самые низкие значения R^2 у всех трех почв приходятся на длины волн видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра.

На рисунке 3 приведены дендрограммы сходства кривых отражения отдельных фракций всех проанализированных образцов почв.

Дендрограмма для фракций дерново-подзолистой почвы показывает группировку всех объектов в два кластера. В одном из них оказались все тонкие фракции и спектр образца до фракционирования, а во втором – все крупные фракции (крупнее 500 мкм) (рис. 3А).

Похожая ситуация отражена и на диаграмме для серой лесной почвы (рис. 3Б), но здесь более четко обособляется кластер со спектром образца до фракционирования, куда также входят и несколько фракций среднего размера (от 71 до 250 мкм). Кроме того, отчетливо выделяются кластеры с более крупными фракциями и более тонкими.

На дендрограмме чернозема четко выделяется кластер фракций от 63 до 250 мкм, который включает и образец до фракционирования. Остальные спектры не образуют четких кластеров вообще.

Полученные данные в целом подтверждают закономерности влияния гранулометрического состава почв и размера гранулометрических фракций на СОС почв, установленные исследователями ранее ([Карманов, 1974](#); [Михайлова, Орлов, 1986](#); [Sadeghi et al., 2018](#)). Согласно этим данным, более тонкие фракции почв отражают больше электромагнитных волн.

В отличие от всех более ранних исследований, в наших исследованиях использовалось разделение почв на более дробные и более тонкие фракции, и СОС почв регистрировалась в более широком спектральном диапазоне, включающем и средний инфракрасный диапазон спектра электромагнитных волн. При этом выявленные в результате нашего эксперимента закономерности в целом схожи с полученными ранее.

Использование более детальных данных позволило одновременно выявить и более тонкие особенности отражения электромагнитных волн отдельными фракциями образцов почв.

Теоретически, изменение размера почвенных частиц без изменения их вещественного состава должно приводить к постепенному изменению отражательной способности образцов почв ([Карманов, 1974](#); [Караванова, 2003](#)). В нашем случае эта закономерность не всегда соблюдалась. Так, некоторые фракции с частицами разного размера имеют практически одинаковые кривые спектрального отражения. В то же время кривые некоторых фракций имеют форму и выраженность локальных экстремумов, которые отличаются от кривых других фракций.

Известно, что гранулометрические фракции почв могут обладать разными свойствами (физический, химический состав, органическое вещество и др.) ([Ovchinnikova, 2018](#); [Samonova, 2018](#); [Uziak, 2005](#)). И разница в свойствах отдельных фракций не может не отражаться на их спектральной отражательной способности, которая зависит преимущественно от таких свойств почв как тип и содержание органического вещества, содержание карбонатных и железистых минералов, солей ([Zhang, Huang, 2019](#); [Sahwan et al., 2021](#); [Francos et al., 2021](#)).

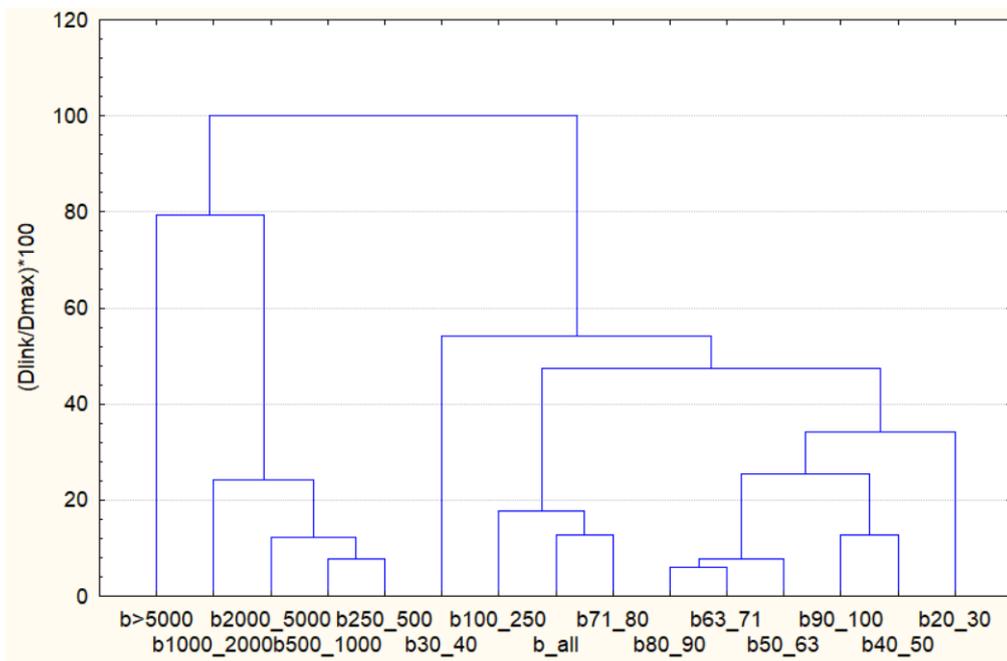


Рис. 3А. Дендрограмма сходства кривых спектрального отражения фракций разного размера для образца дерново-подзолистой почвы (числами указаны диапазоны размера фракции в мкм).

Fig. 3A. Dendrogram of similarity of spectral reflectance curves of different particle size fractions of the sod-podzolic soil sample (the numbers indicate fraction size ranges in μm).

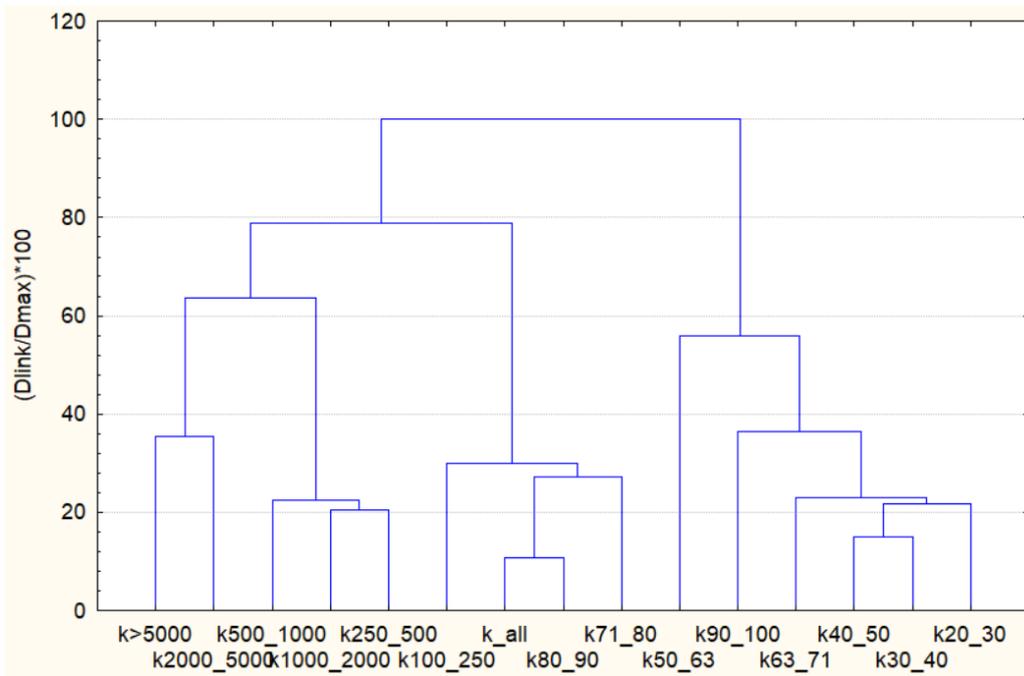


Рис. 3Б. Дендрограмма сходства кривых спектрального отражения фракций разного размера для образца серой лесной почвы (числами указаны диапазоны размера фракции в мкм).

Fig. 3B. Dendrogram of similarity of spectral reflectance curves of different particle size fractions of a sample of gray forest soil (numbers indicate ranges of fraction size in μm).

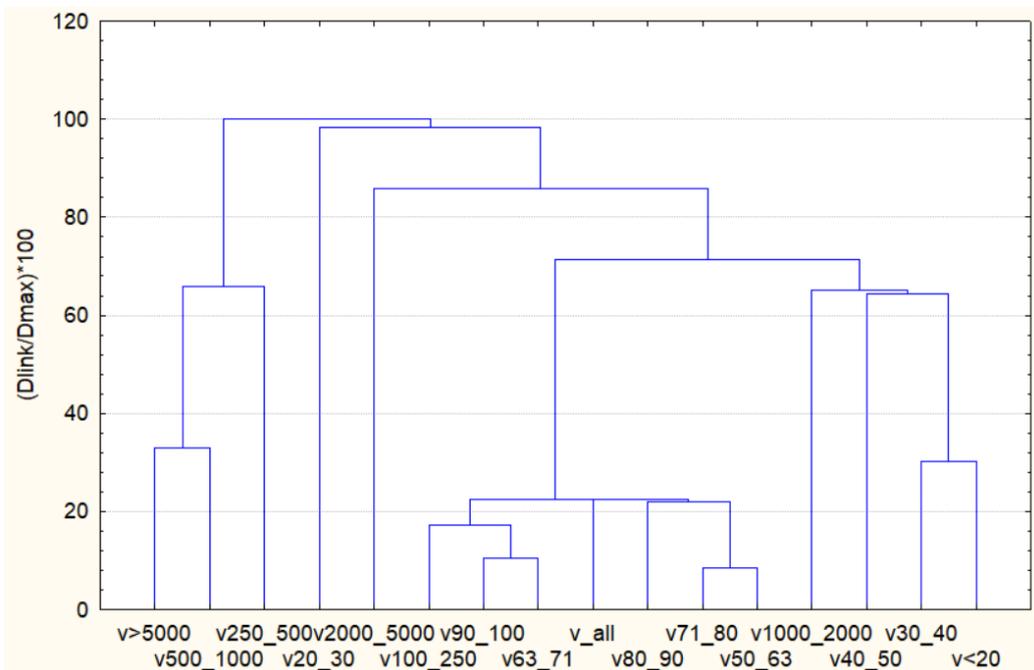


Рис. 3В. Дендрограмма сходства кривых спектрального отражения фракций разного размера для образца чернозема (числами указаны диапазоны размера фракции в мкм).

Fig. 3B. Dendrogram of similarity of spectral reflectance curves of different particle size fractions of the chernozem sample (numbers indicate ranges of fraction size in microns).

Это, по-видимому, и обусловило наблюдаемую разницу в кривых спектрального отражения. В нашем случае речь идет о составе и количестве органического вещества в почвенных агрегатах, а также об особенностях их минералогического состава.

Следовательно, смешанный образец почвы является неоднородным по СОС отдельных фракций образованием. Степень этой неоднородности по-разному проявляется в разных почвах, зависит от вещественного состава почв и может различаться у разных фракций одного образца почвы на 20–30% и более (см. рис. 2). Осредненный спектральный облик почв является спектральной смесью преобладающих в образце почвенных фракций.

По-видимому, именно это является основной причиной такого явления как изменение СОС открытой поверхности почв под воздействием атмосферных осадков ([Савин, 1995](#); [Виндекер и др., 2018](#); [Прудникова и др., 2021](#)).

Также это может служить основой для объяснения того факта, что до сих пор так и не удалось создать унифицированного глобального алгоритма детектирования свойств почв по данным дистанционного зондирования (например, содержания органического вещества в почве). Попыток создания подобных алгоритмов много, но, как правило, они хорошо работают лишь локально, и попытка их использования на больших территориях не приводит к надежным результатам ([Chabrilat et al., 2019](#); [Prudnikova, Savin, 2021](#)).

ВЫВОДЫ

Полученные данные в целом подтверждают закономерности влияния гранулометрического состава почв и размера гранулометрических фракций на спектральную отражательную способность почв, установленные исследователями ранее, заключающиеся в том, что более тонкие фракции почв отражают больше электромагнитных волн, чем более крупные фракции.

Эти закономерности справедливы практически для всех длин волн диапазона 350–2 500 нм для образцов всех исследованных почв (дерново-подзолистые, серые лесные, черноземы выщелоченные).

На фоне этих общих закономерностей установлено, что от-

дельные гранулометрические фракции имеют более или менее выраженные локальные экстремумы на кривой спектрального отражения, а также могут не соответствовать этим общим закономерностям.

Отклонение кривых отдельных фракций от общей закономерности подтверждает то, что отдельные фракции почв могут характеризоваться различным вещественным составом. По-видимому, именно это является основной причиной такого явления как изменение спектральной отражательной способности открытой поверхности почв под воздействием атмосферных осадков, а также осложняет построение глобальных алгоритмов детектирования свойств почв по данным дистанционного зондирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виндекер Г.В., Прудникова Е.Ю., Савин И.Ю. Трансформация открытой поверхности почв под воздействием осадков в модельном эксперименте // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2018. Вып. 95. С. 23–40. DOI: [10.19047/0136-1694-2018-95-23-40](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-95-23-40).
2. Дробыш С.В., Бубнова Т.В., Матыченкова О.В. Спектральная отражательная способность агродерново-подзолистых почв в зависимости от гранулометрического состава // Почвоведение и агрохимия. 2013. № 1. С. 126–132.
3. Захаров С. А. Курс почвоведения. М.-Л., 1931. 550 с.
4. Караванова Е.И. Оптические свойства почв и их природа. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2003. 152 с.
5. Карманов И.И. Спектральная отражающая способность и цвет почв, как показатели их свойств. М.: Колос, 1974. 352с.
6. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
7. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 224 с.
8. Михайлова Н.А., Орлов Д.С. Оптические свойства почв и почвенных компонентов. М.: Наука. 1986. 119 с.
9. Прудникова Е.Ю., Савин И.Ю., Лебедева М.П., Волков Д.С., Рогова О.Б., Варламов Е.Б., Абросимов К.Н. Трансформация поверхностного слоя пахотного горизонта почв под влиянием атмосферных осадков // Почвоведение. 2021. № 11. С. 1407–1420.
10. Савин И.Ю. Влияние ливневого дождя на интегральную отражательную способность поверхности черноземных почв // Почвоведение. 1995. № 8. С. 976–980.

11. *Савин И.Ю., Жоголев А.В., Прудникова Е.Ю.* Современные тренды и проблемы почвенной картографии // Почвоведение. 2019. № 5. С. 517–528.
12. *Bänninger D., Lehmann P., Flühler H.* Modelling the effect of particle size, shape and orientation of light transfer through porous media // Eur. J. Soil Sci. 2006. Vol. 57 (6). P. 906–915.
13. *Ben-Dor E., Irons J.R., Epema G.F.* Soil reflectance // Remote sensing for the Earth sciences: Manual of remote sensing 3/3 / (Ed.) *A.N. Rencz*. 1999. P. 111–188.
14. *Bowers S.A., Hanks R.J.* Reflection of radiant energy from soils // Soil Sci. 1965. Vol. 100(2). P. 130–138.
15. *Chabrilat S., Ben-Dor E., Cierniewski J.* Imaging spectroscopy for soil mapping and monitoring // Surv. Geophys. 2019. Vol. 40. P. 361–399. DOI: [10.1007/s10712-019-09524-0](https://doi.org/10.1007/s10712-019-09524-0).
16. *Demattê J.A.M., Dotto A.C., Paiva A.F.S.* The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): a general view, application and challenges // Geoderma. 2019. Vol. 354. 113793.
17. *FAO.* A primer on soil analysis using visible and near-infrared (vis-NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopy. Rome: FAO. 2022. 28 p. DOI: [10.4060/cb9005en](https://doi.org/10.4060/cb9005en).
18. *Franco N., Ogen Y., Ben-Dor E.* Spectral assessment of organic matter with different composition using reflectance spectroscopy // Remote Sens. 2021. Vol. 13. 1549. DOI: [10.3390/rs13081549](https://doi.org/10.3390/rs13081549).
19. Handbook of soil terminology, correlation and classification / *P. Krasilnikov, J.J.I. Marti, R. Arnold, S. Shoba* (Eds). London: Taylor&Francis Group. 2009. 448 p. DOI: [10.4324/9781849774352](https://doi.org/10.4324/9781849774352).
20. *Isbell R.* The Australian soil classification. Melbourne: CSIRO Publishing, 2021. 192 p.
21. *Kirillova N.P., Khomiakov D.M., Karavanova E.I., Azikov D.A., Zhulidova D.A.* Soil spectral databases // Moscow Univ. Soil Sci. Bull. 2021. Vol. 76. P. 54–59. DOI: [10.3103/S0147687421020034](https://doi.org/10.3103/S0147687421020034).
22. *Mancini M., Weindorf D.C., Monteiro M.E.C., de Faria A.G., Teixeira A.F.S., de Lima W., de Lima F.R.D., Dijair T.S.B., Marques F.D., Ribeiro D., Silva S.H.G., Chakraborty S., Curi N.* From sensor data to Munsell color system: Machine learning algorithm applied to tropical soil color classification via Nix™ Pro sensor // Geoderma. 2020. Vol. 375. 114471. DOI: [10.1016/j.geoderma.2020.114471](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114471).
23. Munsell soil color charts. URL: <https://munsell.com/color-products/color-communications-products/environmental-color-communication/munsell-soil-color-charts/https://munsell.com/color-products/color-communications-products/environmental-color-communication/munsell-soil-color-charts/>.

24. *Ovchinnikova M.F.* Changes in the content, composition, and properties of humic substances in particle-size fractions of soddy-podzolic soils under the impact of long-term drainage // Eurasian Soil Sc. 2018. Vol. 51. P. 647–657. DOI: [10.1134/S1064229318060121](https://doi.org/10.1134/S1064229318060121).
25. *Prudnikova E.Yu., Savin I.Yu.* Some peculiarities of arable soil organic matter detection using optical remote sensing data // Remote Sensing. 2021. Vol. 13(12). 2313. DOI: [10.3390/rs13122313](https://doi.org/10.3390/rs13122313).
26. *Sadeghi M., Babaieian E., Tuller M., Jones S.* Particle size effects on soil reflectance explained by an analytical radiative transfer model // Remote Sensing of Environment. 2018. 210. DOI: [10.1016/j.rse.2018.03.028](https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.028).
27. *Sahwan W., Lucke B., Sprafke T., Vanselow K.A., Bäuml R.* Relationships between spectral features, iron oxides and colours of surface soils in northern Jordan // Eur. J. Soil. Sci. 2021. Vol. 72. P. 80–97. DOI: [10.1111/ejss.12986](https://doi.org/10.1111/ejss.12986).
28. *Samonova O.A., Aseyeva E.N., Kasimov N.S.* Distribution of metals in the granulometric fractions of a balka soil-geochemical system (south-eastern part of the Smolensk-Moscow upland) // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya. 2018. Vol. 6. P. 34–46.
29. *Savin I.Yu., Prudnikova E.Yu., Vasilyeva N.A., Veretelnikova I.V., Bairamov A.N.* The color of soils as a basis for proximal sensing of their composition // Dokuchaev Soil Bulletin. 2016. Vol. 86. P. 46–52. DOI: [10.19047/0136-1694-2016-86-46-52](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-86-46-52).
30. *Uziak S., Brogowski Z., Komornicki T.* Properties of soil granulometric fractions formed from different parent material // Acta Agroph. 2005. Vol. 7(124). P. 1–159.
31. *Viscarra Rossel R.A., Adamchuk V.I., Sudduth K.A., McKenzie N.J., Lobsey C.* Chapter Five – Proximal soil sensing: An effective approach for soil measurements in space and time // Advances in Agronomy / (Ed.) Donald L. Sparks. Academic Press. 2011. Vol. 113. P. 243–291.
32. *Viscarra Rossel R.A., Behrens T., Ben-Dor E.* A global spectral library to characterize the world’s soil // Earth Sci. Rev. 2016. Vol. 155. P. 198–230.
33. World Reference Base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Update 2015. World soil resources reports 106. FAO: Rome, 2015. 203 p.
34. *Zhang X., Huang B.* Prediction of soil salinity with soil-reflected spectra: A comparison of two regression methods // Sci Rep. 2019. Vol. 9. 5067. DOI: [10.1038/s41598-019-41470-0](https://doi.org/10.1038/s41598-019-41470-0).

REFERENCES

1. Vindeker G.V., Prudnikova E.Yu., Savin I.Yu., Transformatsiya otkrytoi poverkhnosti pochv pod vozdeistviem osadkov v model'nom eksperimente, (Transformation of Open Soil Surface Under the Impact of Rainfall in Model Experiment), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, Vol. 95, pp. 23–40, DOI: [10.19047/0136-1694-2018-95-23-40](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-95-23-40).
2. Drobysh S.V., Bubnova T.V., Matychenkova O.V., Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost' agrodernovo-podzolistykh pochv v zavisimosti ot granulometricheskogo sostava (Impact texture on the spectral reflectivity of agro-sod-podzolic soils), *Soil Science and Agrochemistry*, 2013, Vol. 1, pp. 126–132.
3. Zakharov S.A., *Kurs pochvovedeniya* (A Course of Soil Science), Moscow: Selkhozgiz, 1931, 550 p.
4. Karavanova E.I., *Opticheskie svoystva pochv i ikh priroda* (Optical Properties of Soils and Their Nature), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 2003, 152 p.
5. Karmanov I.I., *Spektral'naya otrazhayushchaya sposobnost' i tsvet pochv, kak pokazateli ikh svoystv* (Spectral Reflectivity and Color of Soils as Indicators of Their Properties), Moscow: Kolos, 1974, 351 p.
6. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification And Diagnostics of Russian Soils), Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p.
7. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR* (Classification and Diagnostics of USSR Soils), Moscow: Kolos, 1977, 224 p.
8. Mikhailova N.A., Orlov D.S., *Opticheskie svoystva pochv i pochvennykh komponentov* (Optical Properties of Soils and Soil Components), Moscow: Nauka, 1986, 119 p.
9. Prudnikova E.Yu., Savin I.Yu., Lebedeva M.P., Volkov D.S., Rogova O.B., Varlamov E.B., Abrosimov K.N., Transformatsiya poverkhnostnogo sloya pakhotnogo gorizonta pochv pod vliyaniem atmosferynykh osadkov (Transformation of Surface Layer of Ploughed Soil Horizon Under the Impact of Atmospheric Precipitation), *Pochvovedenie*, 2021, No. 11, pp. 1407–1420.
10. Savin I.Yu., Vliyaniye livneвого dozhdya na integral'nuyu otrazhatel'nuyu sposobnost' poverkhnosti chernozemnykh pochv (The influence of heavy rainfall on the integral surface reflectance of chernozem soil), *Pochvovedenie*, 1995, No. 8, pp. 976–980.
11. Savin I.Yu., Zhogolev A.V., Prudnikova E.Yu., Sovremennyye trendy i problemy pochvennoi kartografii (Modern trends and problems of soil mapping), *Pochvovedenie*, 2019, No. 5, pp. 517–528.

12. Bänninger D., Lehmann P., Flühler H., Modelling the effect of particle size, shape and orientation of light transfer through porous media, *Eur. J. Soil Sci.*, Vol. 57(6), 2006, pp. 906–915.
13. Ben-Dor E., Irons J.R., Epema G.F., Soil reflectance, In: *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing*, A.N. Rencz (Ed.), 1999, Vol. 3, pp. 111–188.
14. Bowers S.A., Hanks R.J., Reflection of radiant energy from soils, *Soil Sci.*, Vol. 100(2), 1965, pp. 130–138.
15. Chabrillat S., Ben-Dor E., Cierniewski J., Imaging Spectroscopy for Soil Mapping and Monitoring, *Surv. Geophys.*, 2019, Vol. 40, pp. 361–399, DOI: [10.1007/s10712-019-09524-0](https://doi.org/10.1007/s10712-019-09524-0).
16. Demattê J.A.M., Dotto A.C., Paiva A.F.S., The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): a general view, application and challenges, *Geoderma*, 2019, Vol. 354, 113793.
17. FAO. *A primer on soil analysis using visible and near-infrared (vis-NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopy*, Rome, FAO, 2022, 28 p., DOI: [10.4060/cb9005en](https://doi.org/10.4060/cb9005en).
18. Francos N., Ogen Y., Ben-Dor E., Spectral Assessment of Organic Matter with Different Composition Using Reflectance Spectroscopy, *Remote Sens.*, 2021, Vol. 13, 1549, DOI: [10.3390/rs13081549](https://doi.org/10.3390/rs13081549).
19. Krasilnikov P., Marti J.-J.I., Arnold R., Shoba S. (Eds), *A Handbook of Soil Terminology, Correlation and Classification*, London: Taylor&Francis Group, 2009, 448 p., DOI: [10.4324/9781849774352](https://doi.org/10.4324/9781849774352).
20. Isbell R., *The Australian Soil Classification*, Melbourne: CSIRO Publishing, 2021, p. 192.
21. Kirillova N.P., Khomiakov D.M., Karavanova E.I., Azikov D.A., Zhulidova D.A., Soil Spectral Databases, *Moscow Univ. Soil Sci. Bull.*, 2021, Vol. 76, pp. 54–59, DOI: [10.3103/S0147687421020034](https://doi.org/10.3103/S0147687421020034).
22. Mancini M., Weindorf D.C., Monteiro M.E.C., de Faria A.G., Teixeira A.F.S., de Lima W., de Lima F.R.D., Dijair T.S.B., Marques F.D., Ribeiro D., Silva S.H.G., Chakraborty S., Curi N., From sensor data to Munsell color system: Machine learning algorithm applied to tropical soil color classification via Nix™ Pro sensor, *Geoderma*, 2020, Vol. 375, 114471, DOI: [10.1016/j.geoderma.2020.114471](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114471).
23. Munsell soil color charts, URL: munsell.com/color-products/color-communications-products/environmental-color-communication/munsell-soil-color-charts/.
24. Ovchinnikova M.F., Changes in the content, composition, and properties of humic substances in particle-size fractions of soddy-podzolic soils under the impact of long-term drainage, *Eurasian Soil Sc.*, 2018, Vol. 51, pp. 647–657. DOI: [10.1134/S1064229318060121](https://doi.org/10.1134/S1064229318060121).

25. Prudnikova E.Yu., Savin I.Yu., Some peculiarities of arable soil organic matter detection using optical remote sensing data, *Remote Sensing*, 2021; Vol. 13(12), 2313, DOI: [10.3390/rs13122313](https://doi.org/10.3390/rs13122313).
26. Sadeghi M., Babaeian E., Tuller M., Jones S., Particle size effects on soil reflectance explained by an analytical radiative transfer model, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 210, DOI: [10.1016/j.rse.2018.03.028](https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.028).
27. Sahwan W., Lucke B., Sprafke T., Vanselow K.A., Bäuml R., Relationships between spectral features, iron oxides and colours of surface soils in northern Jordan, *Eur. J. Soil Sci.*, 2021, Vol. 72, pp. 80–97, DOI: [10.1111/ejss.12986](https://doi.org/10.1111/ejss.12986).
28. Samonova O.A., Aseyeva E.N., Kasimov N.S., Distribution of metals in the granulometric fractions of a balka soil-geochemical system (south-eastern part of the Smolensk-Moscow upland), *Vestnik Moskovskogo universiteta, Ser. 5, Geografiya*, 2018, Vol. 6, pp. 34–46.
29. Savin I.Yu., Prudnikova E.Yu., Vasilyeva N.A., Veretelnikova I.V., Bairamov A.N., The color of soils as a basis for proximal sensing of their composition, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 86, pp. 46–52, DOI: [10.19047/0136-1694-2016-86-46-52](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-86-46-52).
30. Uziak S., Brogowski Z., Komornicki T., Properties of soil granulometric fractions formed from different parent material, *Acta Agroph.*, 2005, Vol. 7(124), pp. 1–159.
31. Viscarra Rossel R.A., Adamchuk V.I., Sudduth K.A., McKenzie N.J., Lobsey C., Chapter Five – Proximal Soil Sensing: An effective approach for soil measurements in space and time, In: *Advances in Agronomy, Academic Press*, Donald L. Sparks (Ed.), 2011, Vol. 113, pp. 243–291.
32. Viscarra Rossel R.A., Behrens T., Ben-Dor E., A global spectral library to characterize the world's soil, *Earth-Sci. Rev.*, 2016, Vol. 155, pp. 198–230.
33. World reference base for soil resources 2014, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, Update 2015, World soil resources reports, Vol. 106, FAO, Rome, 2015, p. 203.
34. Zhang X., Huang B., Prediction of soil salinity with soil-reflected spectra: A comparison of two regression methods, *Sci. Rep.* 9, 2019, 5067, DOI: [10.1038/s41598-019-41470-0](https://doi.org/10.1038/s41598-019-41470-0).