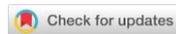


УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-129-159



Ссылки для цитирования:

Прудникова Е.Ю., Савин И.Ю., Грубина П.Г. Спутниковая оценка агрономически важных свойств пахотных почв с учетом состояния их поверхности // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 115. С. 129-159. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-129-159

Cite this article as:

Prudnikova E.Yu., Savin I.Yu., Grubina P.G., Satellite based assessment of agronomically important properties of agricultural soils with consideration of their surface state, Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, V. 115, pp. 129-159, DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-129-159

Благодарность:

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения “Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах” (рег. № 123030300031-6) и при поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2022-321).

Acknowledgments:

The studies were carried out within the framework of the implementation of the most important innovative project of state importance “Development of a system of ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes on the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of a system of accounting data on the fluxes of climatically active substances and carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (reg. No. 123030300031-6) and with the support of the Ministry of Education and Science of Russia (agreement No. 075-15-2022-321).

Спутниковая оценка агрономически важных свойств пахотных почв с учетом состояния их поверхности

© 2023 г. Е. Ю. Прудникова^{1*}, И. Ю. Савин^{1,2**},
П. Г. Грубина^{1***}

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

*<https://orcid.org/0000-0001-7743-8607>, e-mail: prudnikova_eyu@esoil.ru,

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

***<https://orcid.org/0000-0001-6325-4604>, e-mail: grubina_pg@esoil.ru.

²Российский университет дружбы народов, Россия,
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

Поступила в редакцию 17.03.2023, принята к публикации 27.06.2023

Резюме: Спутниковые данные достаточно давно используются для оценки различных свойств пахотных почв. В то же время существуют определенные сложности, связанные с тем, что ряд агрономически важных свойств почв не оказывает непосредственного влияния на спектральную отражательную способность их поверхности, что осложняет дистанционную оценку таких свойств. Кроме того, для получения воспроизводимых моделей необходимо учитывать состояние открытой поверхности почв во время съемки. Целью исследования было провести демонстрацию метода детектирования агрономически важных свойств пахотных почв по спутниковым данным Landsat 8-9 OLI с привлечением информации о состоянии их открытой поверхности на примере тестового поля в Серебряно-Прудском районе Московской области. В зависимости от свойства почвы R^2_{cv} моделей, построенных по спутниковым данным Landsat 8-9 OLI, варьировал от 0.57 до 0.91. Наилучшие модели $R^2_{cv} > 0.8$ были получены для органического вещества и сильно скоррелированных с ним свойств, таких как содержание обменных катионов кальция и магния, содержание общего азота, рН водной и солевой вытяжек. Привлечение информации о состоянии открытой поверхности пахотных почв для большинства свойств позволило получить модели более высокого качества и предсказательной способности вне зависимости от срока съемки. На основе полученных моделей в рамках демонстрации метода были построены карты пространственного варьирования агрономически важных свойств пахотных почв. Полученные модели могут быть использованы для дистанционного мониторинга анализируемых свойств пахотных почв тестового поля. В то же время для таких свойств, как содержание обменного калия и соединений фосфора необходим поиск подходов, учитывающих их высокую пространственную вариабельность, а также требуется предварительная оценка информативности сроков съемки, в которые открытая поверхность почвы не трансформирована.

Ключевые слова: дистанционные методы, пахотные почвы, агрономически важные свойства, Landsat 8-9 OLI, состояние открытой поверхности почв.

Satellite based assessment of agronomically important properties of agricultural soils with consideration of their surface state

© 2023 E. Yu. Prudnikova^{1*}, I. Yu. Savin^{1,2**}, P.G. Grubina^{1***}

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

*<https://orcid.org/0000-0001-7743-8607>, e-mail: prudnikova_eyu@esoil.ru,

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

***<https://orcid.org/0000-0001-6325-4604>, e-mail: grubina_pg@esoil.ru.

²Peoples' Friendship University of Russia,
8/2 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation.

Received 17.03.2023, Accepted 27.06.2023

Abstract: Satellite data have been used for a long time to assess various properties of arable soils. At the same time, there are certain difficulties associated with the fact that a number of agronomically important soil properties do not directly affect spectral reflectance of their surface, which complicates the remote assessment of such properties. In addition, to obtain reproducible models, it is necessary to take into account the state of the open soil surface during the survey. The aim of the study was to demonstrate a method for detecting agronomically important properties of arable soils based on Landsat 8-9 OLI satellite data and including information about the state of their open surface using the example of a test field in the Serebryano-Prudsky district of the Moscow region. Depending on the soil property, R^2_{cv} of the models developed based on Landsat 8-9 OLI satellite data varied from 0.57 to 0.91. The best models with $R^2_{cv} > 0.8$ were obtained for organic matter and properties highly correlated with it such as the content of exchangeable calcium and magnesium cations, the content of total nitrogen, pH of water and salt extracts. The involvement of information on the state of the open surface of arable soils for most properties made it possible to obtain models of higher quality and predictive ability, regardless of the survey period. Based on the models obtained, maps of the spatial variation of agronomically important properties of arable soils were constructed as part of the demonstration of the method. The resulting models can be used for remote monitoring of the

analyzed properties of arable soils of the test field. At the same time, for such properties as the content of exchangeable potassium and phosphorus compounds, it is necessary to search for the approaches that will take into account their high variability, as well as to perform a prior assessment of the informativity of the survey periods in which the open soil surface is not transformed.

Keywords: remote methods, arable soils, agronomically important properties, Landsat 8-9 OLI, state of open soil surface.

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционные данные широко используются для оценки различных свойств пахотных почв ([Ben-Dor, Banin, 1995](#); [V. Rossel et al., 2006](#); [Савин и др., 2019](#)). При этом возможности такой оценки обусловлены наличием связей между свойствами поверхности почв и их спектральной отражательной способностью. Многочисленные исследования показали, что непосредственное влияние на спектральную отражательную способность оказывают такие свойства, как содержание органического вещества, минералогический состав, влажность, гранулометрический состав, содержание растворимых солей, карбонатов, содержание железа ([Орлов, 2001](#); [Belinaso et al., 2010](#); [Lesaignoux et al., 2009](#); [Fang et al., 2018](#); [Savin, Vindeker, 2021](#)). Эти свойства, как правило, достаточно хорошо детектируются по дистанционным данным.

В то же время такие агрономически важные свойства как рН, содержание питательных элементов, обменных катионов не оказывают прямого выраженного воздействия на спектральные характеристики в оптическом диапазоне и, соответственно, корреляция между ними и спектральной отражательной способностью почв в данном участке спектра слабая ([Stenberg et al., 2010](#)). Их дистанционная оценка возможна в случае, когда свойства со слабым спектральным сигналом скоррелированы со свойствами с сильным спектральным сигналом (например, с содержанием органического вещества), ([Kuang et al., 2012](#); [Mouazen, Kuang, 2016](#); [Dematte et al., 2017](#)).

С другой стороны, спектральная отражательная способность почв в оптическом диапазоне, который на данный момент чаще всего используется для дистанционного детектирования свойств

пахотных почв, представляет информацию об очень тонком поверхностном слое. При этом поверхность пахотных почв находится под постоянным воздействием сельскохозяйственной техники и/или природных факторов, среди которых в умеренной зоне на первое место по интенсивности воздействия выходят атмосферные осадки. Под влиянием атмосферных осадков меняются свойства поверхности пахотных почв: влажность, шероховатость, вещественный состав (органическое вещество, минералогия) ([Савин, 1995](#); [Виндекер и др., 2018](#); [Прудникова и др., 2019](#); [Ben-Dor et al., 2003](#); [Prudnikova et al., 2019](#); [Prudnikova, Savin, 2021](#)). Чем дальше поверхность почв находится под воздействием атмосферных осадков, тем сильнее ее свойства отличаются от свойств остального пахотного горизонта. Различия между поверхностным слоем почвы и пахотным горизонтом будут влиять на точность и воспроизводимость моделей, предсказывающих почвенные свойства на основе оптических дистанционных данных. В связи с чем необходимо учитывать состояние открытой поверхности пахотных почв во время съемки при дистанционной оценке свойств пахотных почв.

Целью исследования было провести демонстрацию метода детектирования агрономически важных свойств пахотных почв по спутниковым данным Landsat 8-9 OLI с привлечением информации о состоянии их открытой поверхности на примере тестового поля в Серебряно-Прудском районе Московской области.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования выступают пахотные почвы тестового поля, расположенного в Серебряно-Прудском районе Московской области (рис. 1), и их спектральная отражательная способность. Площадь поля составляет 37.3 га.

Почвы тестового поля представлены черноземами выщелоченными малогумусными мало и среднemosными тяжелосуглинистыми на покровных тяжелых суглинках и глинах, занимающими слабоволнистые водороздельные равнины; черноземами выщелоченными малогумусными тяжелосуглинистыми слабосмытыми на покровных тяжелых суглинках и глинах, занимающими слабопологие склоны и ложбины (преимущественно северо-западная часть тестового поля); луговато-черноземными среднесмытыми

тяжелосуглинистыми почвами на покровных тяжелых суглинках и глинах, занимающими ложбины стока и нижние части склонов (юго-восточная часть тестового поля) ([Почвенная карта..., 1991](#)).



Рис. 1. Географическое положение тестового поля (границы тестового поля показаны красным цветом).

Fig. 1. Geographic location of the test field (test field boundaries are shown in red).

Полевые исследования

Полевой выезд был совершен 28.04.2022 г. Измерения и отбор образцов были сделаны в 30 точках, которые были выбраны случайным образом. В каждой точке отбирался смешанный образец почвы с участка 5 × 5 метров из слоя 0–3 см. Во время выезда поверхность тестового поля находилась в открытом состоянии.

Анализ почвенных образцов

В 30 отобранных почвенных образцах определялись следующие свойства пахотных почв: рН в водной и солевой вытяжке ([ГОСТ 26423-85](#), [ГОСТ 26483-85](#) соответственно), содержание органического вещества ([ГОСТ 26213-91](#)), массовая доля соединений фосфора ([ГОСТ Р 54650-2011](#)), содержание обменного калия по Масловой ([ГОСТ 26210-91](#)), обменных катионов по Шоллен-

бергеру (кальций, магний) ([Руководство..., 1990](#)), общий азот ([ГОСТ 26107-84](#), п. 4.1). Анализы проводились ИЛЦ Почвенного института имени В.В. Докучаева.

Съемка спектральных кривых

Для съемки спектральной отражательной способности использовался полевой спектрорадиометр HandHeld-2, работающий в диапазоне 325–1 075 нм. Съемка проводилась в ясную погоду в дневное время. В каждой точке опробования (площадка 5 × 5 метров) измерения проводились в 5-кратной повторности. Для съемки спектров открытой поверхности почвы прибор располагался на высоте 10–15 см. Кривые отражения для каждой точки осреднялись.

Подбор и подготовка спутниковых данных

Для демонстрации работы метода были отобраны две сцены Landsat 8-9 OLI (продукт Landsat Collection 2 Level-2) (табл. 1), по срокам наиболее близкие к дате полевых работ: 1) Landsat 8 OLI от 06.05.2022; 2) Landsat 9 OLI от 12.04.2022. Сцены были скачаны с сайта Геологической службы США (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), где они находятся в открытом доступе. Продукт Landsat Collection 2 Level-2 содержит атмосферно скорректированные данные (<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2>), поэтому дополнительной обработки спутниковых данных не требовалось.

Таблица 1. Характеристики спутниковых данных Landsat 8-9 OLI
Table 1. Characteristics of Landsat 8-9 OLI satellite data

Каналы	Длина волны (мкм)	Пространственное разрешение (м)
Канал 1	0.43–0.45	30
Канал 2	0.45–0.51	30
Канал 3	0.53–0.59	30
Канал 4	0.64–0.67	30
Канал 5	0.85–0.88	30

В то же время для данного продукта необходимо применение поправочного коэффициента, а именно, каждый канал нужно умножить на 0.0000275 и вычесть 0.2 (<https://www.usgs.gov/faqs/how-do-i-use-scale-factor-landsat-level-2-science-products#:~:text=Landsat%20Collection%20%20surface%20reflectance.offset%20of%20%2D0.2%20per%20pixel>). Данная операция была проведена для каналов обеих сцен в программе ILWIS 3.3 Academic.

Предобработка спектральных данных

Предобработка данных о спектральной отражательной способности заключалась в усреднении, удалении зашумленных участков и сглаживании. Для каждой точки на основе 5 повторностей рассчитывалась средняя спектральная кривая. При этом из-за зашумленности для анализа использовался только участок 350–900 нм, который захватывает видимый и ближний инфракрасный участки спектра. Сглаживание спектральных кривых осуществлялось фильтром Савицкого-Голея в программе R с помощью функции *savitzkyGolay* пакета *prospectr* (<https://cran.r-project.org/web/packages/prospectr/index.html>).

После сглаживания спектральная отражательная способность, измеренная в поле, была пересчитана в каналы Landsat 8-9 OLI в программе R с помощью пакета *prospectr* и функции *resample*. Затем для 30 точек были рассчитаны различные спектральные индексы и спектральные отношения (табл. 2).

Оценка состояния открытой поверхности пахотных почв

Спектральная отражательная способность открытой поверхности пахотных почв, регистрируемая на спутниковых данных и с помощью спектрорадиометра, представляет собой линейную спектральную смесь отражения элементов, формирующих данную поверхность: почвенные агрегаты, корка, тени, трещины, растительные остатки (при наличии) (рис. 2), которая может быть выражена в виде следующего уравнения:

$$COC_{нов} = s1 * COC_{на} + s2 * COC_{m/np} + s3 * COC_{к} + s4 * COC_{р},$$

Таблица 2. Спектральные индексы, использованные для анализа
Table 2. Spectral indices used for the analysis

Индекс	Уравнение	Уравнение с учетом каналов Landsat 8-9 OLI	Ссылки
BI	$\sqrt{\frac{(B^2 + G^2 + R^2)}{3}}$	$\sqrt{\frac{(Band2^2 + Band3^2 + Band4^2)}{3}}$	(Mathieu et al., 1998)
CI	$\frac{(R - G)}{(R + G)}$	$\frac{(Band4 - Band3)}{(Band4 + Band3)}$	(Mathieu et al., 1998)
HI	$\frac{(2 * R - G - B)}{(G - B)}$	$\frac{(2 * Band4 - Band3 - Band2)}{(Band3 - Band2)}$	(Mathieu et al., 1998)
SI	$\frac{(R - B)}{(R + B)}$	$\frac{(Band4 - Band2)}{(Band4 + Band2)}$	(Mathieu et al., 1998)
RI	$\frac{R^2}{(B * G^3)}$	$\frac{Band4^2}{(Band2 * Band3^3)}$	(Mathieu et al., 1998)
BSCI	$\frac{1 - 2 * R - G }{\frac{(R + G + NIR)}{3}}$	$\frac{1 - 2 * Band4 - Band3 }{\frac{(Band4 + Band3 + Band5)}{3}}$	(Chen et al., 2005)
GSI	$\frac{(R - B)}{(R + B + G)}$	$\frac{(Band4 - Band2)}{(Band4 + Band3 + Band2)}$	(Xiao et al., 2006)
CRUST	$1 - \frac{(R - B)}{(R + B)}$	$1 - \frac{(Band4 - Band2)}{(Band4 + Band2)}$	(Karnieli, 1997)
NDVI	$\frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$	$\frac{(Band5 - Band4)}{(Band5 + Band4)}$	(Deering, 1978)
SAVI	$1.5 * \frac{(NIR - R)}{(NIR + R + 0.5)}$	$1.5 * \frac{(Band5 - Band4)}{(Band5 + Band4 + 0.5)}$	(Huete, 1988)
EVI2	$2.5 * \frac{(NIR - R)}{(NIR + 2.4 * R + 1)}$	$2.5 * \frac{(Band5 - Band4)}{(Band5 + 2.4 * Band4 + 1)}$	(Jiang et al., 2008)
NDWI	$\frac{(G - NIR)}{(G + NIR)}$	$\frac{(Band3 - Band5)}{(Band3 + Band5)}$	(McFeeters and Stuart, 1996)

Примечание. В – спектральная отражательная способность в синем участке спектра; G – спектральная отражательная способность в зеленом участке спектра; R – спектральная отражательная способность в красном участке спектра; NIR – спектральная отражательная способность в ближнем инфракрасном участке спектра.

Note. B – spectral reflectivity in the blue diapason of the spectrum; G – spectral reflectivity in the green diapason of the spectrum; R – spectral reflectivity in the red diapason of the spectrum; NIR – spectral reflectivity in the near infrared diapason of the spectrum.

где $COСнов$ – спектральная отражательная способность открытой поверхности пахотных почв; $COСна$ – спектральная отражательная способность почвенных агрегатов, $COСm/mp$ – спектральная отражательная способность теней, включая трещины, $COСк$ – спектральная отражательная способность корки, $COСр$ – спектральная отражательная способность растительных остатков; $s1$, $s2$, $s3$, $s4$ – площади, занимаемые данными элементами на открытой поверхности пахотных почв, выраженные в долях от единицы.

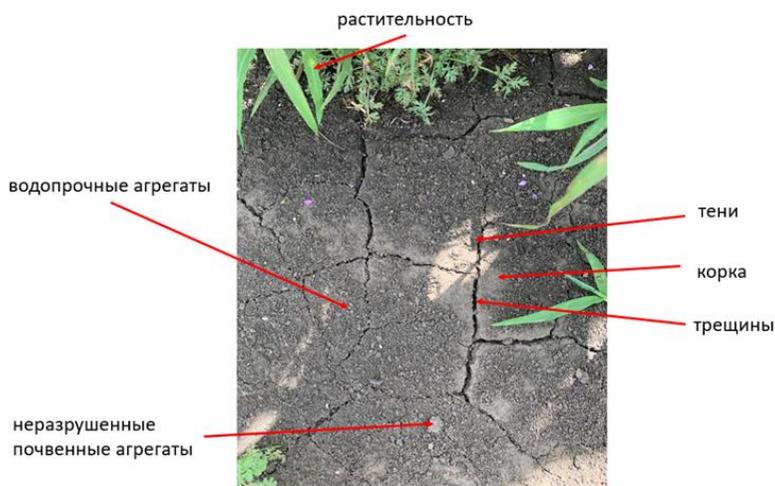


Рис. 2. Элементы открытой поверхности пахотных почв.

Fig. 2. Elements of the open surface of arable soils.

Метод спектрального разделения позволяет определить значения площадей (в долях от 1), занимаемых отдельными элементами поверхности, по спутниковым данным в конкретный срок съемки. В качестве основы для этого используется их спектральная отражательная способность, измеренная в поле и пересчитанная в каналы спутниковых данных. За спектральную отражательную способность почвенных агрегатов в данном исследовании

принимается спектральная отражательная способность почвы под коркой.

Метод был реализован в программе R с помощью пакета *hsdar* и функции *unmix* (<https://cran.r-project.org/web/packages/hsdar/index.html>). Для работы со спутниковыми изображениями использовались пакеты *raster* (<https://cran.r-project.org/web/packages/raster/index.html>), *sp* (<https://cran.r-project.org/web/packages/sp/index.html>) и *rgdal* (<https://cran.r-project.org/web/packages/rgdal/index.html>).

При этом помимо площадей, занимаемых отдельными элементами поверхности, также рассчитывалась ошибка спектрального разделения, величина которой связана с теми компонентами, спектральная отражательная способность которых не была учтена при спектральном разделении. Сюда, как правило, относятся тени и/или трещины.

Таким образом, для каждой точки полевого обследования и пикселя анализируемых изображений рассчитывалась доля корки и “некорки” (почвенные агрегаты), а также ошибка спектрального разделения, величина которой зависит от площади, занимаемой тенями и/или трещинами. При анализе спутниковых данных для каждого выбранного срока съемки были получены карты, отражающие пространственное варьирование доли корки в пикселе и ошибки спектрального разделения.

Моделирование свойств пахотных почв

Сначала анализировались спектральные параметры, рассчитанные по данным полевого спектрометрирования. Предварительно из дальнейшего анализа исключались те параметры, которые сильно скоррелированы друг с другом. Для этого рассчитывались коэффициенты корреляции между ними. И далее, если коэффициент корреляции между параметрами превышал 0.7, то один из параметров исключался из дальнейшего анализа. В итоге в анализ включались только те параметры, коэффициент корреляции между которыми не превышал 0.7. Отбор проводился в программе R с помощью пакета *usdm* и функции *vifcor* (<https://cran.r-project.org/web/packages/usdm/index.html>).

Оставшиеся после отбора параметры включались в регрессионное моделирование, которое осуществлялось методом множе-

ственной линейной регрессии с помощью функции *lm* пакета *stats* программы R (<https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/stats/html/stats-package.html>).

Для каждого свойства моделирование проводилось в двух вариантах: 1) без учета информации о состоянии поверхности в момент проведения полевых работ; 2) с учетом информации о состоянии поверхности. При учете состояния поверхности в модель дополнительно в качестве предикторов включалась доля корки и ошибка спектрального разделения.

В каждом варианте сначала в модель включались все отобранные параметры, далее последовательно проводилось исключение параметров с уровнем значимости (*p-value*) более 0.05 до тех пор, пока в модели для каждого анализируемого свойства не оставались только статистически значимые параметры.

Те спектральные параметры, которые для конкретного свойства попали в модели по результатам анализа данных полевого спектрометрирования, затем использовались для моделирования этого свойства по спутниковым данным. Моделирование проводилось также в двух вариантах: без учета и с учетом состояния поверхности в конкретный срок съемки. Построение моделей проводилось так же, как и в случае данных полевого спектрометрирования.

Оценка качества полученных моделей

Для проверки моделей, полученных как по данным полевого спектрометрирования, так и по спутниковым данным, проводилась процедура кросс-валидации. Выборка случайным образом делилась на 10 блоков, из которых один использовался для проверки, а остальные для обучения. Для устойчивости значений параметров оценки качества подобное деление повторялось 100 раз. Для кросс-валидации использовался пакет *caret* программы R (<https://cran.r-project.org/web/packages/caret/vignettes/caret.html>).

Основными параметрами для оценки качества моделей по результатам кросс-валидации являлись следующие: коэффициент детерминации (R^2_{cv}), среднеквадратическая ошибка предсказания ($RMSE_{cv}$), и отношение межквартильного размаха (IQR) к среднеквадратической ошибке предсказания ($RPIQ$). Чем выше коэффициент детерминации и $RPIQ$, и ниже среднеквадратическая ошиб-

ка предсказания по результатам валидации, тем лучше модель. В целом RPIQ меньше 2 говорит о невысокой предсказательной способности модели.

Построение карт свойств пахотных почв

Для построения карт использовались наилучшие модели, полученные по спутниковым данным, с наибольшим R^2_{cv} и RPIQ и наименьшим RMSE_{cv}. Для этого в программе ILWIS 3.3 Academic по спутниковым данным Landsat 8-9 OLI для соответствующих сроков съемки рассчитывались информативные параметры, включенные в данные модели. Затем строились карты пространственного варьирования анализируемых свойств на основе отобранных регрессионных уравнений. После чего построенные карты обрезались по границам тестового поля, поскольку считалось, что за его пределами построенные модели не работают.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Лабораторный анализ отобранных образцов показал, что содержание в них обменного калия варьирует в пределах 168.3 – 1816.9 млн⁻¹ (табл. 3). При этом коэффициент вариации для данного свойства превышает 80%. Также высокий коэффициент вариации отмечается для массовой доли соединений фосфора (141.7%), массовая доля которых изменяется от 0 до 1%. Для обменных катионов кальция коэффициент вариации превышает 50%, изменяясь от 1.5 до 15.5 ммоль/100 г. В случае органического вещества, обменных катионов магния и общего азота коэффициент вариации превышает 40% и составляет 42.1% и 40.9 % соответственно. При этом содержание органического вещества изменяется от 1.8 до 6.5%, обменных катионов магния – от 0.5 до 2.6 ммоль/100 г, а массовая доля общего азота – от 0.1 до 0.4%. Меньше всего варьирует рН водной и солевой вытяжек с коэффициентом вариации 7.3% и 10.8% соответственно. рН водной вытяжки изменяется от 5.2 до 7.4, а солевой вытяжки – от 4.1 до 6.5.

Таблица 3. Свойства пахотных почв тестового поля
Table 3. Properties of arable soils of the test field

	Обменный калий, млн ⁻¹	рН солевой вытяжки	Общий азот, %	рН водной вытяжки	Органическое вещество, %	Соединения фосфора (P ₂ O ₅)	Обменные катионы (ммоль/100 г)	
							Ca	Mg
Минимум	168.3	4.1	0.1	5.2	1.8	0.0	1.5	0.5
Максимум	1816.9	6.5	0.4	7.4	6.5	1.0	15.5	2.6
Среднее	328.6	4.8	0.2	6.2	3.8	0.1	7.5	1.5
Стандартное отклонение	283.8	0.5	0.1	0.5	1.6	0.2	4.1	0.6
Коэффициент вариации	86.4	10.8	40.9	7.3	41.1	141.7	53.8	42.1

Корреляционный анализ показал, что анализируемые свойства достаточно хорошо коррелируют друг с другом (рис. 3). Содержание обменного калия сильнее всего коррелирует с массовой долей соединений фосфора с коэффициентом корреляции 0.96. В остальных случаях коэффициент корреляции не превышает 0.6. В случае рН солевой вытяжки, наибольшая корреляция отмечается между данным свойством и рН водной вытяжки (коэффициент корреляции 0.95). Также высокие значения коэффициента корреляции отмечаются между рН солевой вытяжки и содержанием обменных катионов кальция и магния (коэффициенты корреляции 0.88 и 0.84 соответственно). Массовая доля общего азота сильнее всего коррелирует с содержанием органического вещества и обменных катионов кальция (коэффициенты корреляции 0.87 и 0.86 соответственно). Содержание органического вещества сильнее всего скоррелировано с содержанием обменных катионов кальция

(коэффициент корреляции составляет 0.93). Содержание обменных катионов кальция, в свою очередь, сильнее всего коррелирует с содержанием обменных катионов магния (коэффициент корреляции 0.97). При этом следует отметить, что все свойства, кроме содержания обменного калия и массовой доли соединений фосфора (коэффициент корреляции <0.3), характеризуются достаточно высокой корреляцией (коэффициент корреляции >0.7) с содержанием органического вещества.

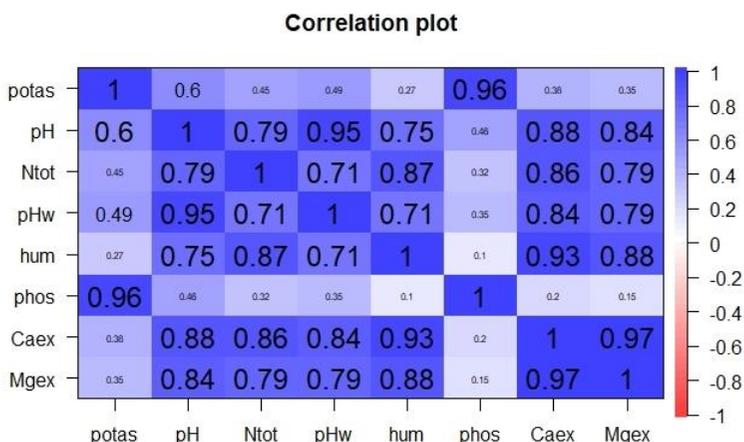


Рис. 3. Корреляция между свойствами пахотных почв тестового поля (potas – содержание обменного калия, pH – pH солевой вытяжки, Ntot – массовая доля общего азота, pHw – pH водной вытяжки, hum – содержание органического вещества, phos – массовая доля соединений фосфора, Caex – содержание обменных катионов кальция, Mgex – содержание обменных катионов магния).

Fig. 3. Correlation between the properties of arable soils of the test field (potas – the content of exchangeable potassium, pH – pH of the salt extract, Ntot – the mass fraction of total nitrogen, pHw – pH of the water extract, hum – the content of organic matter, phos – the mass fraction of phosphorus compounds, Caex – the content of exchangeable calcium cations, Mgex – the content of exchangeable magnesium cations).

Оценка состояния открытой поверхности пахотных почв тестового поля в день проведения полевых работ показала, что доля корки на поверхности в точках отбора образцов варьировала от 0 до 1, среднее значение составило 0.48, коэффициент вариации оказался выше 80% (83.8%). Ошибка спектрального разделения находилась в диапазоне 0.005–0.159 со средним значением 0.031, коэффициент вариации при этом составил 120.1%.

Доля корки оказалось достаточно сильно отрицательно скоррелирована с содержанием органического вещества (рис. 4) и со свойствами, которые показали высокую корреляцию с содержанием органического вещества (рис. 3). Содержание органического вещества, поскольку от него зависит стабильность почвенных агрегатов, определяет скорость и интенсивность коркообразования. Соответственно, почвы с низким содержанием органического вещества более склонны к коркообразованию, чем почвы с высоким содержанием органического вещества.

Ошибка спектрального разделения, в свою очередь, показала высокую положительную корреляцию с массовой долей соединений фосфора и обменным калием.

При моделировании свойств пахотных почв по данным полевого спектрометрирования худшие по качеству модели были получены для свойств с низкой корреляцией с содержанием органического вещества: обменный калий и соединения фосфора (табл. 4). В случае обменного калия R^2_{cv} моделей изменялся от 0.62 для модели без учета состояния поверхности до 0.64 для модели с учетом состояния поверхности. RPIQ в обоих случаях оказался очень низким (0.14) из-за высокой ошибки предсказания.

Что касается соединений фосфора, R^2_{cv} полученных моделей варьировал от 0.68 (без учета состояния поверхности) до 0.69 (с учетом состояния поверхности). RPIQ оказался чуть выше, чем в случае обменного калия, но все равно значения были очень низкими (0.4–0.5) также из-за высокой ошибки предсказания.

Наилучшая модель была получена для содержания органического вещества без учета состояния поверхности с $R^2_{cv} = 0.90$ и RPIQ = 4.7. R^2_{cv} для модели с учетом состояния поверхности составил 0.83, RPIQ – 3.4.

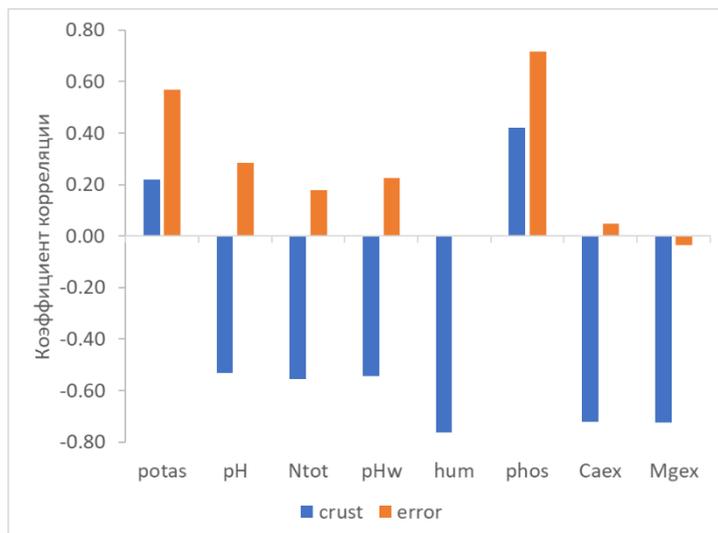


Рис.4. Связь между состоянием открытой поверхности пахотных почв и их свойствами: crust – доля корки на открытой поверхности пахотных почв в точках отбора образцов, error – ошибка спектрального разделения.
Fig. 4. Relationship between the state of the open surface of arable soils and their properties: crust – the area of the crust on the open surface of arable soils at sampling points, error – the spectral unmixing error.

Для pH водной солевой вытяжки были получены модели с достаточно высоким R^2_{cv} , но при этом RPIQ оказался меньше 2. Для pH солевой вытяжки R^2_{cv} полученных моделей варьировал от 0.70 (без учета состояния поверхности) до 0.79 (с учетом состояния поверхности), а RPIQ изменялся от 1.5 до 1.8 соответственно. В случае pH водной вытяжки R^2_{cv} моделей с учетом и без учета состояния поверхности был одинаковым и составил 0.74, RPIQ также получился достаточно близким по значению 1.7–1.8 соответственно.

Таблица 4. Модели, построенные по данным полевого спектрометрирования

Table 4. Models developed based on field spectrometry data

Свойство	Информативные параметры	R ² _{cv}	RMSE _{cv}	RPIQ
Обменный калий	HI, Band1	0.62	235.8	0.14
	Band1, Crust	0.64	228.7	0.14
pH солевой вытяжки	HI, Band1	0.70	0.47	1.5
	Band1, Crust	0.79	0.40	1.8
Общий азот	R34, HI, Band1	0.77	0.05	2.6
	HI, Error	0.73	0.06	2.2
pH водной вытяжки	HI	0.74	0.32	1.8
	Crust, Error	0.74	0.33	1.7
Органическое вещество	R34, HI, Band1	0.90	0.63	4.7
	Crust	0.83	0.91	3.2
Соединения фосфора	HI, Band1	0.68	0.12	0.4
	Band1, Crust	0.69	0.11	0.5
Обменные катионы кальция	HI, Band1	0.84	2.42	2.5
	Crust, Error	0.81	2.52	2.4
Обменные катионы магния	R34, HI	0.86	0.33	3.1

Примечание. HI – спектральный индекс из табл. 2, Band1 – спектральная отражательная способность, измеренная полевым спектрорадиометром и пересчитанная в канал 1 Landsat 8-9 OLI, R34 – отношение спектральной отражательной способности, пересчитанной в канал 3 Landsat 8-9 OLI, к спектральной отражательной способности, пересчитанной в канал 4 Landsat 8-9 OLI, Crust – доля корки на открытой поверхности пахотных почв тестового поля, Error – ошибка спектрального разделения.

Note. HI – spectral index from Table 2, Band1 – spectral reflectance measured by field spectroradiometer and recalculated to Landsat 8-9 OLI channel 1, R34 – ratio of spectral reflectance recalculated to Landsat 8-9 OLI channel 3 to spectral reflectance recalculated to Land-sat 8-9 OLI channel 4, Crust – fraction of crust on the open surface of arable soils of the test field, Error – spectral separation error.

Что касается общего азота, R^2_{cv} полученных моделей варьировал от 0.73 (с учетом состояния поверхности) до 0.77 (без учета состояния поверхности). RPIQ изменялся в районе 2.2–2.6 соответственно.

При моделировании содержания обменных катионов кальция R^2_{cv} полученных моделей варьировал от 0.81 (с учетом состояния поверхности) до 0.84 (без учета состояния поверхности). RPIQ изменялся в районе 2.4–2.5 соответственно.

В случае обменных катионов магния статистически достоверная модель была получена только без учета состояния поверхности с $R^2_{cv} = 0.86$ и RPIQ = 3.1.

Таким образом, привлечение информации о состоянии поверхности позволило повысить качество моделей, полученных по результатам полевого спектрометрирования, для таких свойств, как обменный калий, рН солевой вытяжки, соединения фосфора. В остальных случаях модели без информации о состоянии поверхности оказались более высокого качества. При этом для рН водной вытяжки и обменных катионов кальция модели, учитывающие информацию о состоянии поверхности, содержали только данные о доле корки и ошибке спектрального разделения, а для органического вещества – только данные о доле корки. Информативность доли корки при картографировании содержания органического вещества в случае, когда открытая поверхность почвы достаточно сильно трансформирована, уже отмечалась нами ранее в других исследованиях ([Prudnikova, Savin, 2021](#)).

Анализ состояния открытой поверхности по данным Landsat 8-9 OLI за выбранные сроки съемки показал, что поверхность тестового поля была более трансформирована на снимке от 06.05.2022 поскольку минимальное, среднее и максимальное значение доли корки в пикселе в эту дату оказалось выше, чем на снимке от 12.04.2022 (табл. 5).

Карты, отражающие пространственное варьирование доли корки и ошибки спектрального разделения в выбранные сроки съемки, представлены ниже на рисунке 5. В северо-западной части тестового поля выделяется область, которая сильнее всего подвержена трансформации и, соответственно, коркообразованию

(рис. 5 а, в). В этой части поля также отмечается достаточно интенсивное растрескивание (рис. 5 б, г).

Таблица 5. Варьирование доли корки и ошибки спектрального разделения по данным Landsat 8-9 OLI для тестового поля (414 пикселей)
Table 5. Variation in crust area and spectral separation error from Landsat 8-9 OLI data for a test field (414 pixels)

	12.04.2022				
	минимум	максимум	среднее	стандартное отклонение	Коэффициент вариации
Доля корки	0	0.71	0.32	0.2	62.5
Ошибка спектрального разделения	0	0.004	0.002	0.002	100
	06.05.2022				
Доля корки	0.43	1	0.72	0.16	22.2
Ошибка спектрального разделения	0.001	0.0205	0.0095	0.0062	65.3

При моделировании свойств по спутниковым данным, в случае обменного калия и соединений фосфора статистически достоверные модели были получены только для майского срока съемки (табл. 6). При этом ошибка предсказания осталась достаточно высокой как без учета, так и с учетом состояния поверхности. Данные свойства характеризуются достаточно высокой вариабельностью с коэффициентом вариации, превышающим 80% (табл. 3), и наименьшей корреляцией с содержанием органического вещества (коэффициент корреляции <0.3) (рис. 3).

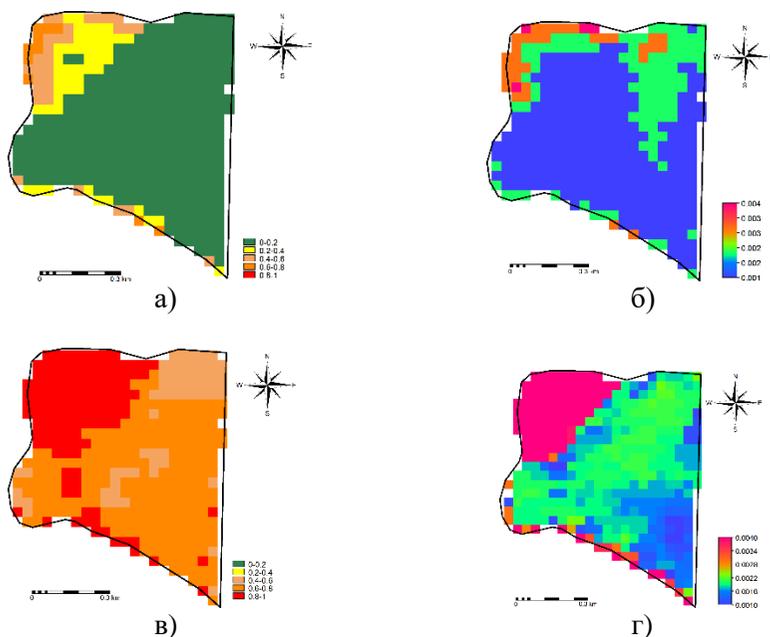


Рис. 5. Карты состояния открытой поверхности пахотных почв тестового поля для сцены от 12.04.2022 г. (**а** – доля корки, **б** – ошибка спектрального разделения) и от 06.05.2022 г. (**в** – доля корки, **г** – ошибка спектрального разделения).

Fig. 5. Maps of the state of the open surface of arable soils of the test field for the scene acquired at 12.04.2022 (**a** – crust area, **б** – spectral unmixing error) and at 06.05.2022 (**в** – crust area, **г** – spectral unmixing error).

Что касается pH солевой вытяжки, то статистически достоверные модели были получены для обоих анализируемых сроков съемки. Однако лучше оказалась модель для апрельской сцены без учета состояния поверхности.

В случае общего азота также статистически достоверные модели были получены как для апрельской, так и для майской сцен. При этом лучшая модель была получена для майской сцены с учетом состояния поверхности во время съемки.

Таблица 6. Модели, построенные по спутниковым данным Landsat 8-9 OLI
Table 6. Models built based on Landsat 8-9 OLI satellite data

Свойства	Срок съемки							
	12.04.2022				06.05.2022			
	параметры	R ² cv	RMSEcv	RPIQ	параметры	R ² cv	RMSEcv	RPIQ
Обменный калий	-	-	-	-	HI	0.62	215.7	0.2
	-	-	-	-	HI, Crust	0.62	216.8	0.2
pH солевой вытяжки	Band1	0.87	0.27	2.6	HI	0.72	0.36	1.9
	Error, Crust	0.84	0.28	2.5	HI, Crust	0.80	0.34	2.1
Общий азот	Band1	0.78	0.05	2.6	-	-	-	-
	Crust	0.81	0.05	2.6	Error	0.81	0.04	3.3
pH водной вытяжки	HI	0.72	0.36	1.6	HI	0.69	0.33	1.7
	Error, Crust	0.82	0.26	2.2	Error	0.81	0.28	2.0
Органическое вещество	R34, HI, Band1	0.88	0.67	4.4	R34, HI	0.88	0.80	3.7
	Error, Crust	0.91	0.69	4.3	HI, Band1, Error	0.91	0.63	4.7
Соединения фосфора	-	-	-	-	HI, Band1, Crust	0.57	0.13	0.4
Обменные катионы кальция	Band1	0.89	1.73	3.5	R34, HI	0.86	2.1	2.9
	Error, Crust	0.91	1.71	3.5	HI, Error, Crust	0.90	1.90	3.2
Обменные катионы магния	R34, HI	0.80	0.45	2.3	R34, HI	0.85	0.35	2.9
	Error, Crust	0.89	0.28	3.6	HI, Error, Crust	0.89	0.31	3.3

Что касается pH водной вытяжки, лучшая модель была получена с учетом состояния поверхности для апрельского срока съемки. Однако модель для данного варианта для майского срока съемки оказалась достаточно близкой по предсказательной способности.

В случае содержания органического вещества лучшая модель также была получена с учетом состояния поверхности. При этом при одинаковом R^2_{cv} для майского срока ошибка предсказания оказалась чуть ниже, чем для апрельского.

Для обменных катионов кальция и магния лучшая модель была получена с учетом состояния поверхности для апрельского срока съемки. При этом модели с учетом состояния поверхности для разных сроков отличаются незначительно по величине R^2_{cv} и по ошибке предсказания.

Привлечение информации о состоянии открытой поверхности пахотных почв для большинства свойств позволило получить модели более высокого качества и предсказательной способности вне зависимости от срока съемки. Исключение составил обменный калий, в случае которого привлечение информации о состоянии поверхности почв привело к увеличению ошибки предсказания при неизменности R^2_{cv} . Также для pH солевой вытяжки привлечение информации о состоянии поверхности для апрельского срока съемки привело к снижению R^2_{cv} и небольшому увеличению ошибки предсказания.

В целом модели для разных сроков съемки с учетом состояния поверхности имели достаточно близкий R^2_{cv} и незначительно отличались по ошибке предсказания. Похожие результаты были получены для содержания органического вещества для тестового поля с серыми лесными почвами ([Prudnikova, Savin, 2021](#)), когда привлечение информации о состоянии открытой поверхности почвы также позволило получить стабильные модели с близкой предсказательной способностью вне зависимости от срока съемки. В ряде случаев для моделирования было достаточно только информации о состоянии открытой поверхности.

Карты свойств пахотных почв тестового поля, построенные на основе лучших по качеству моделей (выделены в табл. 6 жирным шрифтом), представлены ниже на рисунке 6. Следует отме-

титель, что северо-западная часть тестового поля, которая более склонна к коркообразованию, отличается более низкими значениями анализируемых свойств.

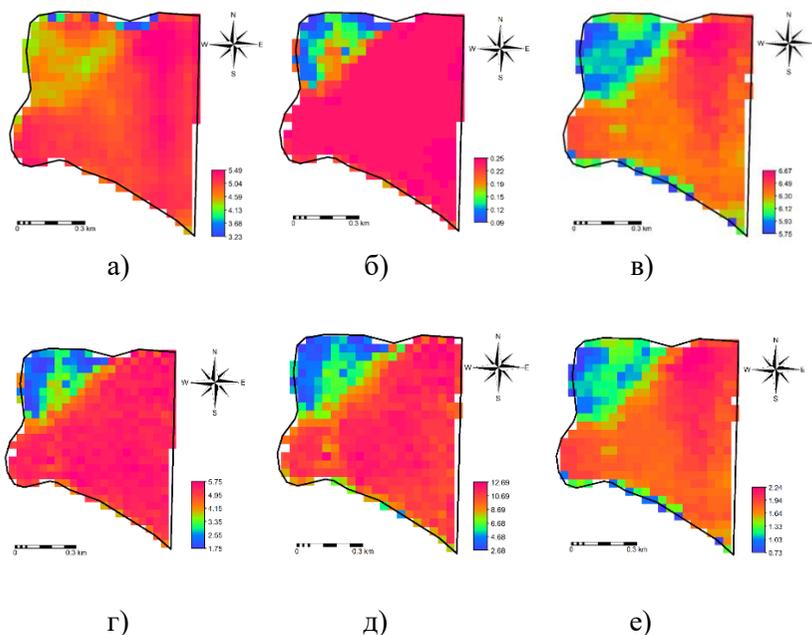


Рис. 6. Карты свойств пахотных почв тестового поля, построенные по спутниковым данным Landsat 8-9 OLI: **а)** pH солевой вытяжки; **б)** общий азот; **в)** pH водной вытяжки; **г)** органическое вещество; **д)** обменные катионы кальция; **е)** обменные катионы магния.

Fig. 6. Maps of the properties of arable soils of the test field, built based on Landsat 8-9 OLI satellite data: **a)** pH of the salt extract; **б)** total nitrogen; **в)** pH of the water extract; **г)** organic matter; **д)** exchangeable calcium cations; **е)** exchangeable magnesium cations.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере тестового поля, расположенного в Серебряно-Прудском районе Московской области, была проведена демонстрация метода спутниковой оценки агрономически важных

свойств пахотных почв с привлечением информации о состоянии их поверхности. В зависимости от свойства R^2_{cv} моделей, построенных по спутниковым данным Landsat 8-9 OLI, варьировал от 0.57 до 0.91. Наилучшие модели $R^2_{cv} > 0.8$ были получены для органического вещества, обменных катионов кальция и магния, общего азота, рН водной и солевой вытяжек. На основе полученных моделей в рамках демонстрации метода были построены карты пространственного варьирования агрономически важных свойств пахотных почв поля.

Привлечение информации о состоянии открытой поверхности пахотных почв для большинства свойств позволило получить по спутниковым данным модели более высокого качества и предсказательной способности вне зависимости от срока съемки. При этом следует отметить, что в оба выбранных срока съемки открытая поверхность находилась в трансформированном состоянии, т. е. была затронута процессом коркообразования.

На возможность дистанционной оценки агрономически важных свойств в данном случае преимущественно повлияла величина их корреляции с содержанием органического вещества, а также вариабельность самих свойств.

Полученные модели могут быть использованы для дистанционного мониторинга анализируемых свойств пахотных почв тестового поля, за исключением обменного калия и соединений фосфора. Для данных свойств необходимы поиск подходов, учитывающих их высокую пространственную вариабельность, а также предварительная оценка информативности сроков съемки, в которые открытая поверхность почвы нетрансформирована.

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 им. 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. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки.
3. ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее рН по методу ЦИНАО.

4. *ГОСТ 26213-91*. Почвы. Методы определения органического вещества.
5. *ГОСТ Р 54650-2011*. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО.
6. *ГОСТ 26210-91*. Почвы. Определение обменного калия по методу Масловой.
7. *ГОСТ 26107-84*. Почвы. Методы определения общего азота.
8. Орлов Д.С., Суханова Н.И., Розанова М.С. Спектральная отражательная способность почв и их компонентов. М.: МГУ, 2001. 176 с.
9. Почвенная карта совхоза им. Карла Маркса Серебряно-Прудского района Московской области (масштаб 1 : 10 000). М.: Мосгипроводхоз, 1991 г.
10. Прудникова Е.Ю., Варламов Е.Б., Чурилин Н.А., Чурилина А.Е. Дифференциация и баланс минералов при трансформации открытой поверхности пахотных почв под воздействием атмосферных осадков // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 98. С. 105–131. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-98-105-131](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-105-131).
11. Савин И.Ю. Влияние ливневого дождя на интегральную отражательную способность поверхности черноземных почв // Почвоведение. 1995. №. 8. С. 976–980.
12. Савин И.Ю., Столбовой В.С., Иванов А.Л., Прудникова Е.Ю., Жоголев А.В., Воронин А.Я. Технологии составления и обновления почвенных карт. М.: Перо, 2019. 328 с.
13. Bellinaso H., Demattê J.A.M., Romeiro S.A. Soil spectral library and its use in soil classification // Revista Brasileira de Ciência do Solo. 2010. Vol. 34. P. 861–870. DOI: [10.1590/S0100-06832010000300027](https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300027).
14. Ben-Dor E., Banin A. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties // Soil Sci. Soc. Am. J. 1995. Vol. 59 (2). P. 364–372. DOI: [10.2136/sssaj1995.03615995005900020014x](https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900020014x).
15. Ben-Dor E., Goldshleger N., Benyamini Y., Agassi M.R., Blumberg D.G. The spectral reflectance properties of soil structural crusts in the 1.2-to 2.5- μm spectral region // Soil Science Society of America Journal. 2003. Vol. 67 (1). P. 289–299. DOI: [10.2136/sssaj2003.2890](https://doi.org/10.2136/sssaj2003.2890).
16. Chen J., Yuan Zhang M., Wang L., Shimazaki H., Tamura M. A new index for mapping lichen-dominated biological soil crusts in desert areas // Remote Sensing of Environment. 2005. Vol. 96. P. 165–175. DOI: [10.1016/j.rse.2005.02.011](https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.02.011).
17. Deering D.W. Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors: Ph.D. Thesis. Texas A&M University. College Station, TX, USA. 1978.

18. *Demattê J.A., Ramirez-Lopez L., Marques K.P.P., Rodella A.A.* Chemometric soil analysis on the determination of specific bands for the detection of magnesium and potassium by spectroscopy // *Geoderma*. 2017. Vol. 288. P. 8–22. DOI: [10.1016/j.geoderma.2016.11.013](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.11.013).
19. *Fang Q., Hong H., Zhao L., Kukulich S., Yin K., Wang C.* Visible and near-infrared reflectance spectroscopy for investigating soil mineralogy: A review // *Journal of Spectroscopy*. 2018. Vol. 2018. DOI: [10.1155/2018/3168974](https://doi.org/10.1155/2018/3168974).
20. *Huete A.R.* A soil-adjusted vegetation index (SAVI) // *Remote sensing of environment*. 1988. Vol. 25. P. 295–309. DOI: [10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).
21. *Jiang Z., Huete A., Didan K., Miura T.* Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band // *Remote Sensing of Environment*. 2008. Vol. 112. P. 3833–3845. DOI: [10.1016/j.rse.2008.06.006](https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006).
22. *Karnieli A.* Development and implementation of spectral crust index over dune sands // *International Journal of Remote Sensing*. 1997. Vol. 18. P. 1207–1220. DOI: [10.1080/014311697218368](https://doi.org/10.1080/014311697218368).
23. *Kuang B., Mahmood H.S., Quraishi M.Z., Hoogmoed W.B., Mouazen A.M., Henten E.J.V.* Sensing soil properties in the laboratory, in situ, and on-line: a review // *Adv. Agr.* 2012. Vol. 114. P. 155–223. DOI: [10.1016/B978-0-12-394275-3.00003-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394275-3.00003-1).
24. *Lesaignoux A., Fabre S., Briotter X., Oliosio A.* Influence of surface soil moisture on spectral reflectance of bare soil in the 0.4–15 μM domain // 6. *EARSel; Imaging spectroscopy: innovative tool for scientific and commercial environmental applications*. 2009. 6 p.
25. *McFeeters K., Stuart K.* The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // *International journal of remote sensing*. 1996. Vol. 17.7. P. 1425–1432. DOI: [10.1080/01431169608948714](https://doi.org/10.1080/01431169608948714).
26. *Mathieu R., Pouget M., Cervelle B., Escadafal R.* Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typical soil color of an arid environment // *Remote sensing of environment*. 1998. Vol. 66. P. 17–28. DOI: [10.1016/S0034-4257\(98\)00030-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00030-3).
27. *Mouazen A.M., Kuang B.* On-line visible and near infrared spectroscopy for in-field phosphorous management // *Soil Till. Res.* 2016. Vol. 155. P. 471–477. DOI: [10.1016/j.still.2015.04.003](https://doi.org/10.1016/j.still.2015.04.003).
28. *Prudnikova E., Savin I., Vindeker G., Grubina P., Shishkonakova E., Sharychev D.* Influence of soil background on spectral reflectance of winter wheat crop canopy // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11 (16). P. 1932. DOI: [10.3390/rs11161932](https://doi.org/10.3390/rs11161932).

29. Prudnikova E., Savin I. Some peculiarities of arable soil organic matter detection using optical remote sensing data // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. No. 12. P. 2313. DOI: [10.3390/rs13122313](https://doi.org/10.3390/rs13122313).
30. Rikimaru A., Roy P. S., Miyatake S. Tropical Forest cover density mapping // Tropical ecology. 2002. Vol. 43 (1). P. 39–47.
31. Savin I.Y., Vindeker G.V. Some specifics in using optical properties of soil surface for moisture detection // Eurasian Soil Science. 2021. Vol. 54. No. 7. P. 1019–1027. DOI: [10.1364/JOT.83.000642](https://doi.org/10.1364/JOT.83.000642).
32. Stenberg B., Viscarra Rossel R.A., Mouazen A.M., Wetterlind J. Visible and near-infrared spectroscopy in soil science // Adv. Agr. 2010. Vol. 107. P. 163–215. DOI: [10.1016/S0065-2113\(10\)07005-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)07005-7).
33. Viscarra Rossel R.A., Walvoort D.J.J., McBratney A.B., Janik L.J., Skjemstad J.O. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties // Geoderma. 2006. Vol. 131. P. 59–75. DOI: [10.1016/j.geoderma.2005.03.007](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.007).
34. Xiao J., Shen, Y., Tateishi R., Bayaer W. Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing // International Journal of Remote Sensing. 2006. Vol. 27. P. 2411–2422. DOI: [10.1080/01431160600554363](https://doi.org/10.1080/01431160600554363).

REFERENCES

1. Vindeker G.V., Prudnikova E.Yu., Savin I.Yu., 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. State Standard, GOST 26423-85, Soils. Methods for determination of specific electric conductivity, pH and solid residue of water extract.
3. State Standard, GOST 26483-85, Soils. Preparation of salt extract and determination of its pH by CINAO method.
4. State Standard, GOST 26213-91, Soils. Methods for determination of organic matter.
5. State Standard, GOST R 54650-2011, Soils. Determination of mobile phosphorus and potassium compounds by Kirsanov method modified by CINAO.
6. State Standard, GOST 26210-91, Soils. Determination of exchangeable potassium by Maslova method.
7. State Standard, GOST 26107-84, Soils. Methods for determination of total nitrogen.

8. Orlov D.S., Suhanova N.I., Rozanova M.S., *Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost' pochv i ih komponentov* (Spectral reflective capacity of soils and their components), Moscow: Moscow State University, 2001, 176 p.
9. Pochvennaya karta sovhoza im. Karla Marksa Serebrjano-Prudskogo rajona Moskovskoj oblasti (masshtab 1 : 10 000) (Soil map of the state farm of Karl Marx Serebryano-Prudsky district of the Moscow region (scale 1 : 10 000)), Moscow, Mosgiprovodhoz, 1991.
10. Prudnikova E.Yu., Varlamov E.B., Churilin N.A., Churilina A.E., Differentiation and balance of minerals during transformation of the open surface of arable soils under the impact of rain, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, Vol. 98, pp. 105–131, DOI: [10.19047/0136-1694-2019-98-105-131](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-105-131).
11. Savin I.Yu., Vliyanie livneвого dozhdya na integral'nyu otrazhatel'nyu sposobnost' poverkhnosti chernozemnykh pochv (The influence of heavy rainfall on the integral surface reflectance of chernozem soil), *Pochvovedenie*, 1995, No. 8, pp. 976–980.
12. Savin I.Yu., Stolbovoi V.S., Ivanov A.L., Prudnikova E.Yu., Zhogolev A.V., Voronin A.Ya., *Tekhnologii sostavleniya i obnovleniya pochvennykh kart* (Technologies for compiling and updating soil maps), Moscow: Pero, 2019, 328 p.
13. Bellinaso H., Demattê J.A.M., Romeiro S.A., Soil spectral library and its use in soil classification, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2010, Vol. 34, pp. 861–870, DOI: [10.1590/S0100-06832010000300027](https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300027).
14. Ben-Dor E., Banin A., Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1995, Vol. 59 (2), pp. 364–372, DOI: [10.2136/sssaj1995.03615995005900020014x](https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900020014x).
15. Ben-Dor E., Goldshleger N., Benyamini Y., Agassi M.R., Blumberg D.G., The spectral reflectance properties of soil structural crusts in the 1.2- to 2.5- μm spectral region, *Soil Science Society of America Journal*, 2003, Vol. 67 (1), pp. 289–299, DOI: [10.2136/sssaj2003.2890](https://doi.org/10.2136/sssaj2003.2890).
16. Chen J., Yuan Zhang M., Wang L., Shimazaki H., Tamura M., A new index for mapping lichen-dominated biological soil crusts in desert areas, *Remote Sensing of Environment*, 2005, Vol. 96, pp. 165–175, DOI: [10.1016/j.rse.2005.02.011](https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.02.011).
17. Deering D.W., *Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors*: Ph.D. Thesis. Texas A&M University. College Station, TX, USA. 1978.
18. Demattê J.A., Ramirez-Lopez L., Marques K.P.P., Rodella A.A., Chemometric soil analysis on the determination of specific bands for the detection of magnesium and potassium by spectroscopy, *Geoderma*, 2017, Vol. 288, pp. 8–22, DOI: [10.1016/j.geoderma.2016.11.013](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.11.013).

19. Fang Q., Hong H., Zhao L., Kukolich S., Yin K., Wang C. Visible and near-infrared reflectance spectroscopy for investigating soil mineralogy: A review, *Journal of Spectroscopy*, 2018, Vol. 2018, DOI: [10.1155/2018/3168974](https://doi.org/10.1155/2018/3168974).
20. Huete A.R., A soil-adjusted vegetation index (SAVI), *Remote sensing of environment*, 1988, Vol. 25, pp. 295–309, DOI: [10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).
21. Jiang Z., Huete A., Didan K., Miura T., Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, pp. 3833–3845, DOI: [10.1016/j.rse.2008.06.006](https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006).
22. Karnieli A. Development and implementation of spectral crust index over dune sands, *International Journal of Remote Sensing*, 1997, Vol. 18, pp. 1207–1220, DOI: [10.1080/014311697218368](https://doi.org/10.1080/014311697218368).
23. Kuang B., Mahmood H.S., Quraishi M.Z., Hoogmoed W.B., Mouazen A.M., Henten E.J.V., Sensing soil properties in the laboratory, in situ, and on-line: a review, *Adv. Agr.*, 2012, Vol. 114, pp. 155–223, DOI: [10.1016/B978-0-12-394275-3.00003-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394275-3.00003-1).
24. Lesaignoux A., Fabre S., Briotter X., Oliosio A., Influence of surface soil moisture on spectral reflectance of bare soil in the 0.4–15 μM domain, In: 6. *EARSeL: Imaging spectroscopy: innovative tool for scientific and commercial environmental applications*, 2009, 6 p.
25. McFeeters K., Stuart K., The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International journal of remote sensing*, 1996, Vol. 17 (7), pp. 1425–1432, DOI: [10.1080/01431169608948714](https://doi.org/10.1080/01431169608948714).
26. Mathieu R., Pouget M., Cerveille B., Escadafal R., Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typical soil color of an arid environment, *Remote sensing of environment*, 1998, Vol. 66, pp. 17–28, DOI: [10.1016/S0034-4257\(98\)00030-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00030-3).
27. Mouazen A.M., Kuang B., On-line visible and near infrared spectroscopy for in-field phosphorous management, *Soil Till. Res.*, 2016, Vol. 155, pp. 471–477, DOI: [10.1016/j.still.2015.04.003](https://doi.org/10.1016/j.still.2015.04.003).
28. Prudnikova E., Savin I., Vindeker G., Grubina P., Shishkonakova E., Sharychev D., Influence of soil background on spectral reflectance of winter wheat crop canopy, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11 (16), pp. 1932, DOI: [10.3390/rs11161932](https://doi.org/10.3390/rs11161932).
29. Prudnikova E., Savin I. Some peculiarities of arable soil organic matter detection using optical remote sensing data, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, No. 12, pp. 2313, DOI: [10.3390/rs13122313](https://doi.org/10.3390/rs13122313).

30. Rikimaru A., Roy P. S., Miyatake S., Tropical Forest cover density mapping, *Tropical ecology*, 2002, Vol. 43 (1), pp. 39–47.
31. Savin I.Y., Vindeker G.V., Some specifics in using optical properties of soil surface for moisture detection, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No. 7, pp. 1019–1027, DOI: [10.1364/JOT.83.000642](https://doi.org/10.1364/JOT.83.000642).
32. Stenberg B., Viscarra Rossel R.A., Mouazen A.M., Wetterlind J., Visible and near-infrared spectroscopy in soil science, *Adv. Agr.*, 2010, Vol. 107, pp. 163–215, DOI: [10.1016/S0065-2113\(10\)07005-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)07005-7).
33. Viscarra Rossel R.A., Walvoort D.J.J., McBratney A.B., Janik L.J., Skjemstad J.O., Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties, *Geoderma*, 2006, Vol. 131, pp. 59–75, DOI: [10.1016/j.geoderma.2005.03.007](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.007).
34. Xiao J., Shen, Y., Tateishi R., Bayaer W., Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing, *International Journal of Remote Sensing*, 2006, Vol. 27, pp. 2411–2422, DOI: [10.1080/01431160600554363](https://doi.org/10.1080/01431160600554363).