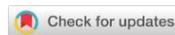


УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-146-172



Ссылки для цитирования:

Грубина П.Г., Савин И.Ю., Прудникова Е.Ю. Возможности использования данных тепловой съемки для детектирования основных параметров плодородия пахотных почв // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 105. С. 146-172. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-146-172

Cite this article as:

Grubina P.G., Savin I.Yu., Prudnikova E.Yu., The possibilities of using thermal infrared imaging data for detecting the main parameters of arable soil fertility, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 105, pp. 146-172, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-146-172

Благодарность:

Исследования выполнены при поддержке грантов РФФИ 18-016-0052/19 и РНФ (№ 20-67-46017). Авторы выражают благодарность сотрудникам Почвенного института им. В.В. Докучаева: Щепотьеву В.Н., Вернюку Ю.И., Шарычеву Д.Е., Шишконоковой Е.А., – за помощь в сборе полевых данных. Сбор полевых данных и лабораторные анализы почвенных образцов проведены с использованием оборудования ЦКП “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.

Acknowledgments:

The studies were carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) project No. 18-016-0052/19 and the Russian Science Foundation (No. 20-67-46017). The authors express their gratitude to the research staff of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute: Shchepotiev V.N., VERNYUK Yu.I., Sharychev D.E., Shishkonakova E.A., – for assistance in field data collection. Field data collection and laboratory analyses of soil samples were carried out using the equipment of the Center for Collective Use “Functions and Properties of Soils and Soil Cover” of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute.

Возможности использования данных тепловой съемки для детектирования основных параметров плодородия пахотных почв

© 2020 г. П. Г. Грубина^{1*}, И. Ю. Савин^{1,2**},
Е. Ю. Прудникова^{1,2***}

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

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

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

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

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

Поступила в редакцию 27.06.2020, принята к публикации 17.12.2020

Резюме: Проведен анализ возможности использования результатов тепловой съемки для детектирования параметров плодородия серых лесных и аллювиальных пахотных почв на примере ключевого участка в Тульской области. Совместно с отбором 25 образцов почв из слоя 0–10 см проводилась съемка открытой поверхности почв с использованием тепловизора FLIR VUE 512 и измерение спектральной отражательной способности почв. По результатам корреляционного анализа было установлено, что наиболее тесные связи наблюдаются с такими параметрами плодородия почв: содержание гумуса, азота, обменных магния и калия. Коэффициент корреляции между содержанием гумуса и отражением в видимой и ближней ИК-областях, а также со средним значением показаний тепловизора превышает 0.81. В разных диапазонах видимого спектра корреляция отражения с содержанием обменного магния и калия ниже, чем в тепловой области, где коэффициент корреляции с содержанием обменного магния составляет 0.81, а с содержанием обменного калия – 0.65. Построены степенные регрессионные уравнения для детектирования по отражению в тепловой области спектра таких параметров плодородия почв как содержание гумуса ($R^2 = 0.74$), обменного калия ($R^2 = 0.68$) и обменного магния ($R^2 = 0.72$). Регрессии, полученные с данными тепловизора и с данными отражения в видимом и ближнем ИК-диапазонах, близки по качеству для детектирования содержания гумуса и обменного калия, а для детектирования обменного магния немного выше. Полученные результаты показывают, что тепловая съемка применима для

детектирования наиболее значимых параметров плодородия почв тестового поля и может быть использована в качестве основы для их оперативного дистанционного мониторинга.

Ключевые слова: тепловизор, ИК-диапазон, агрохимические показатели плодородия почв, спектральная отражательная способность почв, Тульская область.

The possibilities of using thermal infrared imaging data for detecting the main parameters of arable soil fertility

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

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

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

²*Ecological Faculty of RUDN University,*

8/2 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation,

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

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

Received 27.06.2020, Accepted 17.12.2020

Abstract: The analysis of the possibility of using the thermal infrared images for detecting soil fertility parameters of gray forest and alluvial arable soils was carried out by the example of a test filed in Tula region of Russia. Together with the sampling of 25 soil probes from the 0–10 cm layer, the open surface of the soil was photographed using a FLIR VUE 512 thermal imager, and the spectral reflectance of the soil was measured. According to the results of the correlation analysis, it was found that the closest correlations for thermal images are observed with the following parameters of soil fertility: the content of humus, nitrogen, exchangeable magnesium and potassium. The correlation coefficient between the humus content and the reflectance in the visible and near IR-regions, as well as with the average value of the reflectance in thermal band exceeds 0.81. In different diapasons of the visible spectrum, the spectral reflectance correlation with the content of exchangeable magnesium and potassium is lower than in the thermal band, where the correlation coefficient with the content of exchangeable magnesium is 0.81, and with the content of exchangeable potassium is 0.65. Power regression equations were constructed for detecting such soil fertility parameters as humus content ($R^2 = 0.74$), exchangeable potassium content ($R^2 = 0.68$), and

exchangeable magnesium content ($R^2 = 0.72$) by reflection in the thermal band of the spectrum. The regressions obtained with the thermal imager data and with the spectral reflectance data in the visible and near IR-bands are similar in quality for detecting humus and exchangeable potassium content, while for detecting exchangeable magnesium content they are a bit higher. The obtained results show that thermal infrared images are applicable for detecting the most significant parameters of soil fertility in the test field and can be used as a basis for their real-time remote sensing monitoring.

Keywords: FLIR, infrared band, agrochemical soil fertility properties, spectral reflectivity of soil, Tula region.

ВВЕДЕНИЕ

Урожайность сельскохозяйственных культур во многом определяется состоянием почв и наличием в них доступных питательных веществ. Именно поэтому в сельскохозяйственном производстве важное значение имеет почвенное и агрохимическое обследование земель, результатом которого являются карты параметров почвенного плодородия. Картографирование параметров почвенного плодородия происходит на основе данных полевых работ и лабораторных исследований образцов почв. Работы проводятся в соответствии с утвержденными методиками ([Методические указания..., 2003](#)). Большая трудоемкость подобных работ и достаточно сильная изменчивость параметров плодородия почв (NPK, pH, содержание гумуса) приводят к тому, что получить оперативно подобные данные для больших территорий практически невозможно и очень затратно.

На протяжении последних десятилетий ведутся разработки в области создания новых методов картографирования параметров плодородия почв, основанных на использовании данных дистанционного зондирования ([Симакова, Савин, 1998](#)). Эти методы позволяют оперативно картографировать некоторые из параметров плодородия почв, но не все, не всегда и не везде ([Савин, Симакова, 2012](#)).

Исследования последних лет показали, что на основе анализа спектральной отражательной способности почв и данных дистанционного зондирования может быть детектирован широкий диапазон почвенных свойств. Выявлено, что для детектирования

свойств почв лучше всего подходит анализ отражения света в видимом (VIS), ближнем инфракрасном (NIR) и среднем инфракрасном (MIR) диапазонах спектра.

Так, по данным Soriano-Disla с коллегами ([Soriano-Disla et al., 2014](#)), многие физические и химические свойства почв (влажность, содержание песка и глины, фракции органического углерода, содержание неорганического углерода, обменных Ca и Mg, общего углерода, pH) уверенно детектируется в диапазонах MIR и NIR, а биологические свойства почв – в VIS-NIR диапазоне.

В статье Rossel с соавторами ([Rossel et al., 2006](#)) на примере тестового участка, расположенного в западной части Нового Южного Уэльса (Австралия), показано, что такие свойства почв как влажность, гранулометрический состав, содержание углерода в почве (C), емкость катионного обмена, кальций и магний (обменный), общий азот (N), pH, концентрация металлов/металлоидов, микробиологическая активность также могут быть успешно детектированы на основе анализа данных о спектральном отражении почв.

В работе ([Чинилин, Савин, 2018](#)) показаны возможности детектирования минералогического состава и вертикальной неоднородности почвообразующих пород по данным отражательной способности почв в видимом диапазоне спектра.

С помощью VIS-NIR диапазона ([Coutinho et al., 2019](#)) было спрогнозировано содержание калия и фосфора в почве, однако данные MIR диапазона не дали достоверных результатов. Содержание азота не было достоверно определено ни одним из этих методов. Объектом исследования были две почвы с низким естественным плодородием и контрастным гранулометрическим составом (глинистые и песчаные почвы) из штата Сан-Паулу, Бразилия.

Приведенные примеры показывают, что успешность детектирования отдельных свойств почв зависит как от региона работ (специфика почв), так и от диапазона используемых длин волн ([Савин, 2015](#)).

Одним из перспективных источников данных о почвенных свойствах может быть зондирование в тепловой области спектра. Это направление исследований быстро развивается в последние

годы в связи с решением ряда технических проблем, связанных с оперативным получением подобных данных для больших территорий.

Уже достаточно широко продемонстрированы возможности использования данных тепловой съемки для детектирования влажности и температуры почв ([Sanchez et al., 2011](#); [Анциферов, 2012](#); [Palombo et al., 2019](#)).

Известно, что влажность почв во многих случаях хорошо коррелирует с другими свойствами почв, что создает предпосылки для использования данных MIR диапазона и для их детектирования и мониторинга. Работы в этом направлении уже есть, но их пока немного. Так, в научных публикациях показаны возможности детектирования содержания гумуса и органического вещества почв ([Ma et al., 2016](#); [Dhawale et al., 2016](#)), минералогического состава ([Xia et al., 2018](#)), засоленности ([Csillag et al., 1993](#)) по данным этого диапазона спектра. Однако этих данных все еще не достаточно для получения надежных результатов.

В предлагаемой статье приведены результаты анализа возможностей использования данных тепловой съемки для детектирования параметров плодородия почв на примере ключевого участка на пашне в северной лесостепи Среднерусской возвышенности.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является почвенный покров тестового поля Почвенного института им. В.В. Докучаева, расположенного в Ясногорском районе Тульской области. Площадь поля составляет почти 90 га (рис. 1).

Рельеф территории исследований широковолнистый с преобладающими высотами 250 м. Присутствует расчленение овражно-балочной и речной сетью. На территории поля, охватывающего среднюю и нижнюю части мезосклона рельефа и верхнюю пойму реки Беспута, хорошо выражен микрорельеф, обусловленный протеканием эрозионных процессов и антропогенной деятельностью и представленный в основном промоинами и эрозионными врезамми ([Редькин и др., 1996](#); [Сорокина, 2003](#)).

Почвообразующими породами являются коричнево-бурые

пылеватые суглинки, которые распространены повсеместно на склоне. В нижних частях склона местами встречаются делювиальные отложения. Постилаются покровные отложения коричневатобурый опесчаненным валунным суглинком ([Ратников, 1960](#)).

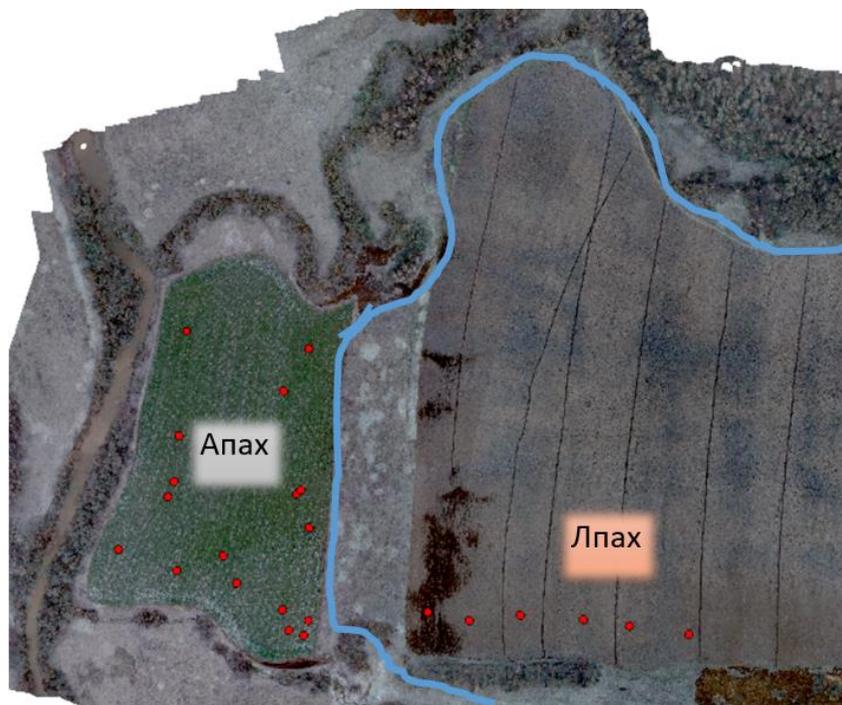


Рис. 1. Тестовое поле. Расположение точек полевого опробования показано красным (Апах – часть поля с преобладанием аллювиальных пахотных почв, Лпах – с преобладанием серых лесных пахотных почв), ареалы разделены синей линией (съемка с БПЛА – Ю.И. Вернук, 2018).

Fig. 1. Test field. The location of testing points on the field is shown by red dots (Апах – part of a field with predominance of alluvial arable soils, Лпах – with predominance of gray forest arable soils), different soils areas are separated by the blue line, (survey with UAV – Yu.I. Vernyk, 2018).

На участке выявлено два типа почв: аллювиальные пахотные на пойме и серые лесные слабо- и среднеэродированные па-

хотные почвы на склоне. Свойства пахотных горизонтов почв поля приведены в таблице 1.

Серая лесная почва характеризуется достаточно низким содержанием гумуса, повышенным содержанием фосфора, средним содержанием калия и низким – азота ([Ягодин, Жуков, 2002](#)). Реакция среды нейтральная.

Физические свойства пахотных горизонтов почв поля имеют следующую специфику: содержание агрономически ценных агрегатов составляет 71.9%, что является отличным агрегатным состоянием ([Вадюнина, Корчагина, 1985](#)), о чем также свидетельствует и коэффициент структурности 3 мм (> 1.5 мм). Общая порозность составляет 55%, что также является отличным показателем ([Качинский, 1965](#)). Плотность почвы составляет 1.16 г/см³ (соответствует градации “уплотненная” по Долгову С.И. ([Шеин, 2005](#))).

Полевые исследования проводились в августе и сентябре 2018 г. после уборки посевов. Всего было заложено 25 точек опробования (рис. 1).

Отбор образцов осуществлялся из пахотного горизонта. В ИЛЦ Почвенного института им. В.В. Докучаева были выполнены анализы следующих основных параметров плодородия почв: содержания гумуса, рН почвы (водн. и сол.), обменных оснований по Шолленбергеру (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+), P_2O_5 подвижного (по Кирсанову), K_2O обменного (по Масловой), общего азота (по стандартным методикам).

Одновременно с отбором образцов почв проводилась съемка свежепроборонованной открытой поверхности почвы с высоты 130–150 см в трехкратной повторности с использованием тепловизора FLIR VUE 512, работающего в ИК диапазоне 7.5 ~ 13.5 мкм (<https://www.flir.com/products/vue-pro/>) (рис. 2).

Параллельно происходило измерение спектральной отражательной способности (СОС) поверхности почв с высоты 15–20 см в пятикратной повторности с использованием спектрорадиометра HandHeld-2 (ASD, USA), определяющего отражательные свойства почв в диапазоне 350–1050 нм (<https://www.malvernpanalytical.com/en/support/product-support/asd-range/fieldspec-range/handheld-2-hand-held-vnir-spectroradiometer>).

Таблица 1. Свойства пахотных горизонтов почв тестового поля
Table 1. Properties of arable horizons of the soil of the test field

Почва	рН		Фосфор подв. (P_2O_5), мг/кг	Калий обмен- ный (K_2O), мг/кг	Азот общий, %	Гумус, %	Обменные катионы (по Шолленбергеру), мг-экв/100г			
	H ₂ O	KCl					K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Серая лесная пахотная	6.52	5.47	138.30	91.52	0.22	3.25	0.43	0.03	19.11	1.42
Аллювиаль- ная пахотная	7.55	6.13	224.29	82.46	0.28	4.05	0.34	0.11	51.70	3.35

Тепловые изображения были загружены в пакет прикладных программ ILWIS (<https://www.itc.nl/ilwis/download/ilwis33/>), с использованием которого для каждого изображения проводилось количественное определение величины отражения энергии поверхностью почвы в тепловом диапазоне. Определялось среднее отражение, минимальная и максимальная величина, медианное и модальное значение отражения открытой поверхности почв.

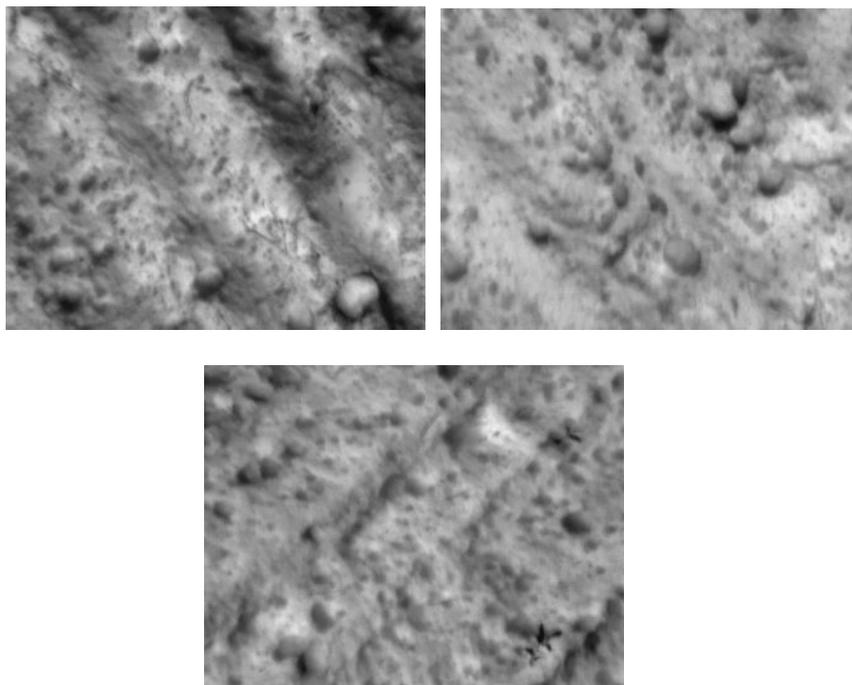


Рис. 2. Примеры тепловых изображений открытой поверхности почв тестового поля.

Fig. 2. Examples of thermal images of open soil surfaces of the test field.

Статистическую обработку данных – расчет средних значений, доверительных интервалов, оценку статистической значимости различий ($t_{0.05}$) – проводили с использованием пакета stats в

среде R (<https://www.r-project.org/>).

Далее проводился регрессионный анализ. Пороговым значением для определения достоверности моделей являлся скорректированный $R^2 > 0.65$. Далее все достоверные модели проходили дополнительную проверку с помощью кросс-валидации методом контроля по отдельным объектам (leave one out cross validation) с использованием библиотеки CARET.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные фактические данные приведены в таблице 2. В таблице 3 приведены результаты корреляционного анализа между приведенными в таблице 2 параметрами. Из таблицы 3 следует, что хорошо коррелируют между собой все показатели, полученные с помощью ИК камеры за исключением стандартного отклонения, которое не показало надежной корреляции ни с одним из рассматриваемых параметров. Также достаточно хорошо коррелируют между собой величины спектральной отражательной способности в анализируемых диапазонах съемки. Более того, установлена хорошая корреляция между параметрами, определяемыми по данным тепловой камеры и по данным о спектральной отражательной способности почв, что можно объяснить тем, что различия в цвете почв (отражении в видимой области спектра) приводят к разнице в температуре поверхности, что и фиксирует тепловизор.

Из параметров плодородия почв высокая корреляция отмечается между величинами рН водного и солевого растворов, между содержанием гумуса и азота, а также между содержанием доступного и обменного калия.

При анализе корреляции между параметрами плодородия почв и их отражательной способностью в разных диапазонах выявляются следующие закономерности.

Наиболее высокие коэффициенты корреляции отмечаются для содержания гумуса. Эта величина лучше всего коррелирует с отражением в ближней инфракрасной области спектра.

Таблица 2. Исходные фактические данные
Table 2. Initial evidence

№ точки	fIir_min	fIir_max	fIir_av	fIir_mode	fIir_std	pHvod	humus	pHsoi	P205	K2O	N	K+	Na+	Ca2+	Mg2+	400_500	500_600	600_700	700_800	800_900	400_900
1	38	135	77	85	28	8.26	5.01	6.87	74.14	90.29	0.37	0.46	0.48	165.82	1.91	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.08
2	26	113	65	69	24	8.18	6.11	5.81	176.59	119.63	0.45	0.43	0.13	157.95	2.15	0.04	0.04	0.05	0.05	0.07	0.06
3	28	98	61	64	20	8.25	6.12	6.85	93.01	128.62	0.41	0.51	0.16	153.45	2.28	0.04	0.04	0.05	0.05	0.07	0.05
4	29	100	62	65	20	7.35	6.54	5.93	187.37	108.65	0.43	0.41	0.29	42.34	2.64	0.03	0.04	0.04	0.05	0.07	0.05
5	41	118	76	80	22	8.09	4.43	6.77	306.00	70.69	0.29	0.34	0.07	54.93	2.14	0.05	0.06	0.07	0.09	0.11	0.08
6	64	151	102	103	22	8.04	2.79	6.47	311.39	86.32	0.18	0.30	0.00	20.12	3.80	0.08	0.10	0.13	0.15	0.18	0.14
7	72	151	107	109	21	8.51	1.89	6.89	300.60	66.20	0.14	0.23	0.12	30.85	6.07	0.09	0.13	0.16	0.20	0.24	0.18
8	73	134	100	104	17	7.19	3.27	5.85	206.24	82.60	0.21	0.28	0.04	19.35	3.69	0.07	0.09	0.12	0.14	0.17	0.13
9	60	134	93	97	21	7.05	2.84	5.58	176.59	93.18	0.23	0.35	0.10	21.81	3.53	0.07	0.09	0.11	0.14	0.17	0.13
10	75	151	114	113	20	7.88	2.05	6.49	184.68	74.45	0.17	0.28	0.02	21.07	4.28	0.07	0.10	0.13	0.16	0.19	0.14
11	60	149	105	104	25	6.72	2.74	5.25	168.50	74.78	0.20	0.32	0.06	15.06	2.31	0.08	0.10	0.13	0.16	0.20	0.15
12	72	178	123	124	29	8.04	2.74	6.65	370.70	69.41	0.21	0.30	0.16	34.30	10.32	0.07	0.10	0.13	0.15	0.19	0.14
13	65	163	113	114	25	8.15	2.21	6.64	346.44	72.25	0.21	0.28	0.11	25.77	5.89	0.07	0.09	0.12	0.15	0.18	0.13
14	66	131	96	99	18	6.43	3.05	5.17	146.93	78.20	0.21	0.36	0.11	20.66	2.44	0.06	0.07	0.09	0.11	0.14	0.10
15	53	123	81	84	19	6.16	5.11	5.03	130.76	54.04	0.34	0.26	0.05	24.38	1.18	0.05	0.06	0.07	0.09	0.11	0.09
16	61	119	86	89	16	6.24	3.59	5.11	165.80	65.66	0.25	0.30	0.03	20.09	1.97	0.06	0.07	0.09	0.11	0.14	0.10
17	53	123	76	84	19	7.27	6.43	6.07	283.08	74.94	0.32	0.31	0.04	33.59	1.50	0.05	0.05	0.06	0.08	0.10	0.08
18	42	123	70	78	21	8.05	6.01	6.83	408.44	74.44	0.33	0.31	0.06	69.01	1.28	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.08
19	43	109	80	76	19	7.54	2.85	6.44	0.00	129.85	0.20	0.66	0.02	19.73	0.90	0.05	0.06	0.08	0.09	0.11	0.08
20	26	114	80	73	25	6.50	2.69	5.45	260.16	109.69	0.19	0.49	0.04	18.10	1.23	0.05	0.07	0.08	0.10	0.13	0.09
21	38	106	77	73	20	6.41	2.00	5.12	128.06	80.61	0.16	0.36	0.02	16.94	1.67	0.05	0.06	0.08	0.10	0.13	0.09
22	38	115	76	75	20	6.05	3.53	5.07	109.19	72.17	0.23	0.33	0.03	17.82	1.31	0.04	0.05	0.07	0.09	0.11	0.08
23	39	103	74	72	18	6.13	3.95	5.05	98.40	73.81	0.21	0.34	0.03	17.94	1.50	0.04	0.05	0.06	0.08	0.11	0.07
24	42	104	73	72	17	6.49	4.48	5.68	95.71	83.00	0.30	0.39	0.04	24.14	1.92	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09	0.06

свойство почв	значения тепловизора	средние значения спектрального отражения в диапазонах, нм
pH _{вод} – pH водный	Flir_min – минимальное значение	500_600 – 500–600 нм
Humus – содержание гумуса, %	Flir_max – максимальное значение	600_700 – 600–700 нм
pH _{сол} – pH солевой	Flir_av – среднее значение	700_800 – 700–800 нм
P ₂ O ₅ – фосфор подвижный, мг/кг	Flir_mode – модальное значение	800_900 – 800–900 нм
K ₂ O – калий обменный, мг/кг	Flir_std – стандартное отклонение	400_900 – 400–900 нм
N – азот общий, %		
K ⁺ – обменный катион калия, мг-экв/100г		
Na ⁺ – обменный катион натрия, мг-экв/100г		
Ca ²⁺ – обменный катион кальция, мг-экв/100г		
Mg ²⁺ – обменный катион магния, мг-экв/100г		

Таблица 3. Результаты корреляционного анализа
Table 3. Results of the correlation analysis

	<i>flir_min</i>	<i>flir_max</i>	<i>flir_av</i>	<i>flir_mode</i>	<i>flir_std</i>	<i>pHvod</i>	<i>humus</i>	<i>pHsol</i>	<i>P205</i>	<i>K2O</i>	<i>N</i>	<i>K+</i>	<i>Na+</i>	<i>Ca2+</i>	<i>Mg2+</i>	400_500	500_600	600_700	700_800	800_900	400_900	
<i>flir_min</i>	1.00																					
<i>flir_max</i>	0.80	1.00																				
<i>flir_av</i>	0.89	0.92	1.00																			
<i>flir_mode</i>	0.93	0.96	0.98	1.00																		
<i>flir_std</i>	-0.05	0.54	0.30	0.31	1.00																	
<i>pHvod</i>	0.11	0.41	0.19	0.28	0.51	1.00																
<i>humus</i>	-0.66	-0.62	-0.82	-0.71	-0.13	0.07	1.00															
<i>pHsol</i>	0.11	0.36	0.16	0.25	0.43	0.94	0.05	1.00														
<i>P205</i>	0.36	0.57	0.41	0.47	0.37	0.45	-0.10	0.44	1.00													
<i>K2O</i>	-0.59	-0.46	-0.46	-0.50	0.09	0.26	0.27	0.20	-0.38	1.00												
<i>N</i>	-0.60	-0.47	-0.70	-0.58	0.06	0.21	0.93	0.15	-0.14	0.38	1.00											
<i>K+</i>	-0.65	-0.53	-0.52	-0.58	0.08	0.06	0.22	0.10	-0.56	0.87	0.29	1.00										
<i>Na+</i>	-0.24	0.06	-0.17	-0.06	0.50	0.41	0.34	0.38	-0.11	0.23	0.52	0.24	1.00									
<i>Ca2+</i>	-0.49	-0.20	-0.46	-0.35	0.38	0.55	0.59	0.44	-0.14	0.48	0.74	0.38	0.66	1.00								
<i>Mg2+</i>	0.64	0.81	0.77	0.79	0.47	0.45	-0.46	0.41	0.53	-0.29	-0.31	-0.44	0.14	-0.12	1.00							
400_500	0.85	0.87	0.90	0.91	0.26	0.30	-0.76	0.25	0.47	-0.42	-0.67	-0.54	-0.14	-0.38	0.64	1.00						
500_600	0.84	0.85	0.92	0.90	0.26	0.29	-0.80	0.24	0.45	-0.40	-0.71	-0.52	-0.17	-0.41	0.67	0.99	1.00					
600_700	0.84	0.85	0.92	0.90	0.24	0.25	-0.82	0.21	0.44	-0.41	-0.74	-0.52	-0.20	-0.44	0.67	0.98	1.00	1.00				
700_800	0.84	0.83	0.93	0.89	0.21	0.20	-0.84	0.17	0.41	-0.43	-0.77	-0.53	-0.23	-0.48	0.66	0.97	0.99	1.00	1.00			
800_900	0.85	0.81	0.93	0.89	0.17	0.13	-0.86	0.11	0.40	-0.47	-0.81	-0.55	-0.27	-0.53	0.64	0.96	0.98	0.99	1.00	1.00		
400_900	0.86	0.85	0.93	0.91	0.21	0.21	-0.82	0.18	0.44	-0.45	-0.75	-0.55	-0.22	-0.47	0.66	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00

Примечание. Расшифровка сокращений приведена в таблице 2, зеленым выделены наиболее высокие коэффициенты корреляции.

Коэффициент корреляции превышает значение 0.8 для всех рассматриваемых диапазонов видимой области спектра, а также для среднего значения отражения, полученного с использованием тепловизора. Связь между содержанием гумуса и всеми параметрами отражения обратная, что логично: более высокое содержание гумуса приводит к падению отражательной способности в видимом диапазоне спектра. А более высокая температура более темной поверхности в солнечный день приводит к повышенной потере влаги из поверхностных слоев почвы, что приводит к повышению отражения в среднем ИК диапазоне, и, как следствие, к проявлению обратной зависимости.

Содержание доступного азота лучше всего коррелирует с отражением в ближней инфракрасной области спектра ($K_{\text{кор}}$ -0.81). Корреляция с данными, полученными с использованием тепловизора, оказалась не очень высокой ($K_{\text{кор}}$ около -0.5 – -0.7). Закономерности, полученные для азота, очень схожи с таковыми, полученными для гумуса, что также логично с учетом тесной связи этих параметров плодородия между собой.

Из остальных параметров плодородия значимой корреляцией с отражательными свойствами поверхности почв отличается содержание магния и калия (табл. 3). Причем разница коэффициентов корреляции между этими показателями и разными параметрами отражательной способности почв не очень велика. Немного больше коэффициент корреляции между содержанием магния и значением максимума отражения, полученного с использованием тепловизора ($K_{\text{кор}}$ +0.81). Корреляция с отражением в видимой области спектра была ниже, а в ближней инфракрасной области спектра – еще ниже. Это хорошо согласуется с установленным ранее фактом большего влияния минеральной части почв на отражение в более коротковолновой области спектра, а органики – в более длинноволновой области ([Islam et al., 2003](#)).

Содержание поглощенного калия в наибольшей степени коррелирует со значениями минимума на изображениях, полученных с использованием тепловизора ($K_{\text{кор}}$ -0.65). Значения минимума показывают отражение в среднем ИК диапазоне затененной поверхности почв. Температурные различия затененной поверхности почв, скорее всего, связаны с пространственными неоднород-

ностями влажности, физических свойств почв и содержанием органики. По-видимому, изменение этих свойств приводит к микроразрывированию процессов выщелачивания калия в поверхностных горизонтах менее влажных и богатых органикой почв, что и выражается в негативной корреляции с отражением.

Корреляция остальных параметров плодородия почв с показателями отражательной способности низкая.

Необходимо отметить, что выявленные закономерности для отражения в видимой области спектра в целом хорошо согласуются с полученными ранее результатами других исследователей ([Stenberg et al., 2010](#); [Vasat et al., 2014](#); [Camargo et al., 2015](#); [Hong et al., 2018](#)).

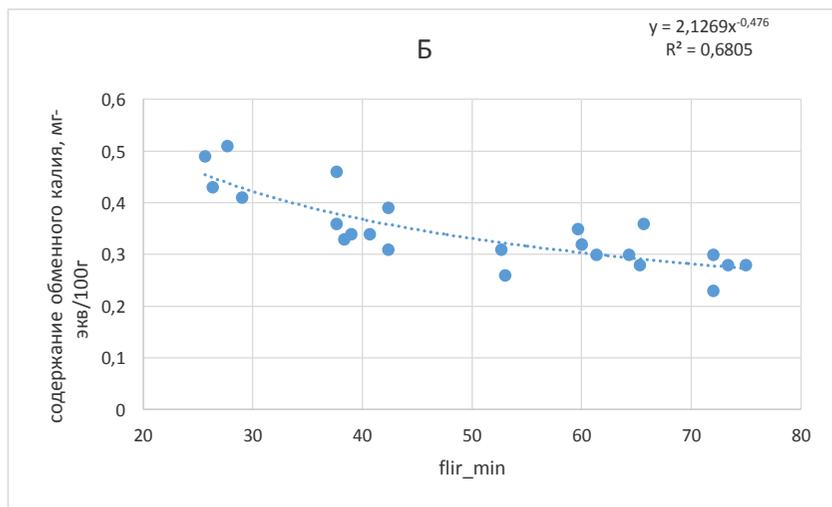
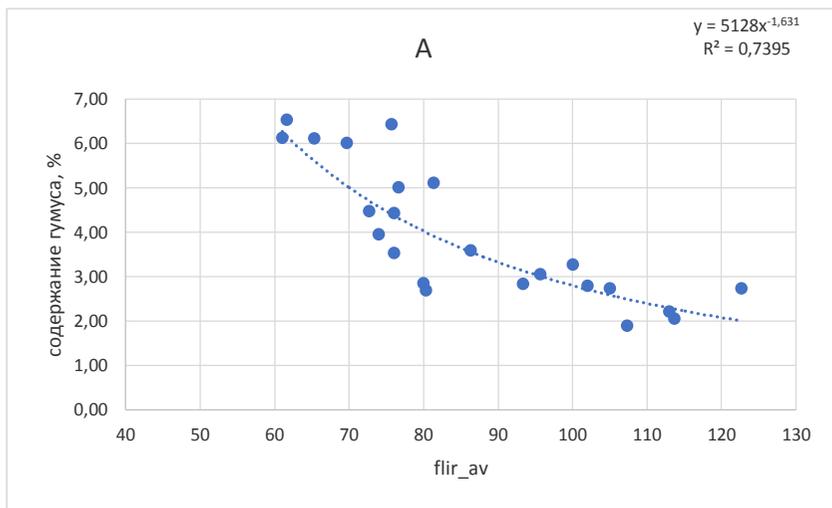
Регрессионный анализ (табл. 4) показал, что наиболее достоверными являются степенные регрессии, что согласуется с теоретическими представлениями о возможной связи параметров плодородия с отражательными свойствами поверхности почв, которые были установлены ранее другими исследователями ([Карманов, 1974](#); [Михайлова, Орлов, 1986](#); [Nanni, Dematte, 2006](#); [Rossel et al., 2010](#)).

На рисунке 3 представлены достоверные степенные зависимости с наиболее высокими нормированными коэффициентами детерминации между отдельными параметрами плодородия почв и данными тепловой съемки.

Из рисунка 3 и таблицы 4 следует, что на основе данных тепловой съемки на тестовом поле могут быть достаточно надежно детектированы такие свойства как содержание гумуса, содержание обменного калия и обменного магния. При этом если в качестве предиктора использовать отражение света в видимой и ближней ИК зонах спектра, то качество регрессии для гумуса и калия будет таким же, как и в случае использования тепловизора, а в случае содержания обменного магния – хуже, чем по данным съемки в MIR диапазоне (табл. 5).

Следовательно, использование тепловизора позволяет получать одинаковые по качеству зависимости для детектирования содержания гумуса и обменного калия в пахотном горизонте почв по сравнению с использованием съемки в видимом и ближнем ИК диапазонах. Но качество регрессии для детектирования содержа-

ния обменного магния оказалось несколько выше.



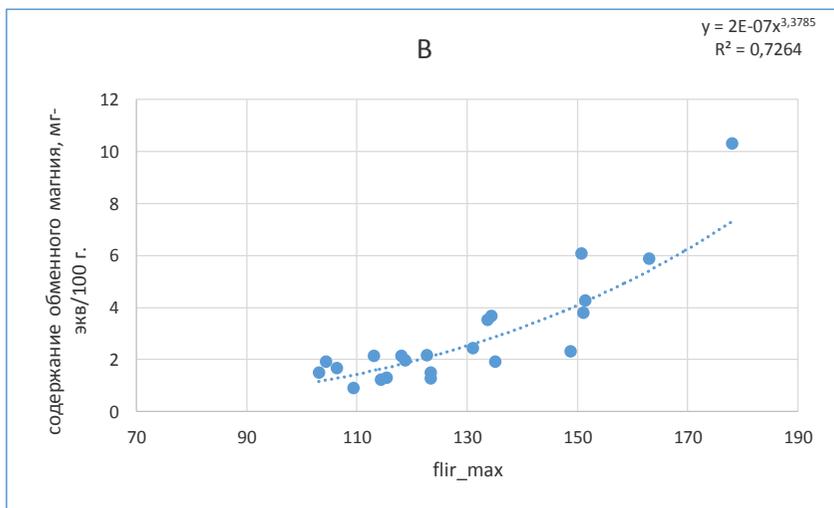


Рис. 3. Регрессионные зависимости между показателями отражения электромагнитных волн в MIR диапазоне с содержанием в почвах гумуса (А), обменного калия (Б) и обменного магния (В).

Fig. 3. Regression relationships between electromagnetic wave reflections in the MIR diapason with soil contents of humus (A), exchangeable potassium (Б) and exchangeable magnesium (В).

Это означает, что использование съемки в среднем ИК диапазоне для картографирования и мониторинга основных параметров плодородия почв региона исследований может быть более перспективным, чем использование для этих же целей многоканальной или гиперспектральной съемки в видимой и ближней ИК области спектра электромагнитных волн. Дополнительным преимуществом тепловой съемки также без сомнения является то, что, по литературным данным, она позволяет более надежно получать информацию и о влажности почв ([Leng et al., 2015](#); [Wang et al., 2018](#)).

Таблица 4. Степенные зависимости с наиболее высокими нормированными коэффициентами детерминации между отдельными параметрами плодородия почв и данными тепловой съемки

Table 4. Power relationships with the highest normalized coefficients of determination between soil fertility parameters and thermal imaging data

Уравнение	Число степеней свободы	Критерий Фишера, уровень значимости 0.05		Средняя ошибка аппроксимации по результатам кросс-валидации, %
		F фактическое	F табличное	
$K^+ = 2.1269 * flir_min^{-0.476}$	21	43.2	4.32	8.5
$Mg^{2+} = 2E-07 * flir_max^{3.3785}$	22	30.1	4.30	20.4
$Humus = 5128 * flir_av^{-1.631}$	21	58.4	4.32	13.6

Таблица 5. Степенные зависимости с наиболее высокими нормированными коэффициентами детерминации между отдельными параметрами плодородия почв и данными отражения света в видимой и ближней ИК области спектра

Table 5. Power relationships with the highest normalized coefficients of determination between selected soil fertility parameters and light reflection data in the visible and near-IR spectrum

Параметр плодородия	Отражение света в диапазоне длин волн (нм)	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации
содержание гумуса	400_500	$y = 0.1046x^{-0.525}$	0.52
	500_600	$y = 0.1598x^{-0.697}$	0.62
	600_700	$y = 0.2191x^{-0.781}$	0.67
	700_800	$y = 0.2793x^{-0.807}$	0.72
	800_900	$y = 0.3384x^{-0.787}$	0.73
	400_900	$y = 0.2293x^{-0.701}$	0.66
содержание обменного калия	400_500	$y = 0.0254x^{-0.709}$	0.35
	500_600	$y = 0.0273x^{-0.834}$	0.33
	600_700	$y = 0.0313x^{-0.899}$	0.33
	700_800	$y = 0.038x^{-0.916}$	0.34
	800_900	$y = 0.0473x^{-0.914}$	0.37
	400_900	$y = 0.0377x^{-0.865}$	0.37
содержание обменного магния	400_500	$y = 0.0419x^{0.3264}$	0.53
	500_600	$y = 0.0489x^{0.3954}$	0.54
	600_700	$y = 0.0594x^{0.417}$	0.53
	700_800	$y = 0.0745x^{0.4019}$	0.51
	800_900	$y = 0.0956x^{0.3668}$	0.48
	400_900	$y = 0.0714x^{0.3729}$	0.53

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований установлено, что:

1. для территории исследований содержание гумуса в пахотном горизонте почв, содержание обменных форм калия и магния и хорошо коррелирующее с ними содержание доступных форм азота и калия может быть успешно определено на основе данных об отражательной способности почв как в видимом диапазоне спектра электромагнитных волн, так и в ближнем и среднем инфракрасном диапазонах;

2. использование данных тепловой съемки (средний ИК диапазон) позволяет получать более надежные зависимости для определения содержания обменного магния, что, с учетом возможности более надежного детектирования влажности пахотного горизонта почв по этим данным, позволяет считать данные тепловой съемки более перспективными для детектирования основных параметров плодородия почв региона;

3. полученные регрессионные зависимости могут быть использованы в качестве основы для оперативного дистанционного мониторинга основных параметров плодородия почв тестового поля;

4. выявленные зависимости без сомнения региональны и могут иметь другой вид для полей с иным строением почвенного покрова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроклиматический справочник по Тульской области. Л.: Гидрометеиздат, 1958. 128 с.
2. *Анциферов А.Ю.* Технологические особенности идентификации состояния почв методами дистанционного зондирования // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2012. С. 76–80.
3. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат. 1986 г. 416 с.
4. *Карманов И.И.* Спектральная отражательная способность и цвет почв как показатели их свойств. М.: Колос, 1974. 351 с.
5. *Качинский Н.А.* Физика почвы. Часть 1. М.: Высшая школа, 1965. 321 с.

6. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: ФГНУ “Росинформагротех”, 2003. 240 с.
7. Михайлова Н.А., Орлов Д.С. Оптические свойства почв и почвенных компонентов. М.: Наука, 1986. 119 с.
8. Обухов А.И., Орлов Д.С. Спектральная отражательная способность главнейших типов почв и возможности использования диффузного отражения при почвенных исследованиях // Почвоведение. 1964. № 2. С. 83–93.
9. Орлов Д.С., Суханова Н.И., Розанова М.С. Спектральная отражательная способность почв и их компонентов. М.: МГУ, 2001. 176 с.
10. Ратников А.И. Почвы Тульской области: Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. М., 1960. 25 с.
11. Редькин Ф.Б., Геннадиев А.Н., Савин И.Ю. Антропогенно измененные почвы севера Среднерусской возвышенности: эволюция и классификация // Ветн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1996. № 2. С. 31–36.
12. Савин И.Ю. Современный спутниковый мониторинг почв и посевов: достижения и проблемы // В сборнике: Применение средств дистанционного зондирования земли в сельском хозяйстве. 2015. С. 29–32.
13. Савин И.Ю., Симакова М.С. Спутниковые технологии для инвентаризации и мониторинга почв в России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 104–115.
14. Симакова М.С., Савин И.Ю. Использование материалов аэро-и космической съемки в картографировании почв: пути развития, состояние, задачи // Почвоведение. 1998. № 11. С. 1339–1347.
15. Сорокина Н.П. Структура почвенного покрова пахотных земель: Типизация, картографирование, агроэкологическая оценка: Дисс. ... докт. с.-х. наук: 03.00.27. М., 2003. 294 с.
16. Чинилин А.В., Савин И.Ю. Потенциальные возможности дистанционной индикации характера почвообразующих и подстилающих пород черноземных почв по цветовым характеристикам их поверхности // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2018. № 1. С. 48–59.
17. Шейн Е.В. Курс физики почв. М.: МГУ, 2005. 432 с.
18. Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И. Агрохимия. М.: Колос, 2002. 584 с.

19. *Camargo L.A., Marques J., Barron V., Ferraciu Alleoni L.R., Barbosa R.S., Pereira G.T.* Mapping of clay, iron oxide and adsorbed phosphate in Oxisols using diffuse reflectance spectroscopy // *Geoderma*. 2015. Vol. 251. P. 124–132.
20. *Coutinho M.A.N., Alari F. de O., Ferreira M.M.C.* Influence of soil sample preparation on the quantification of NPK content via spectroscopy // *Geoderma*. 2019. Vol. 338. P. 401–409.
21. *Csillag F., Pasztor L., Biehl L.L.* Spectral band selection for the characterization of salinity status of soils // *Remote Sensing of Environment*. 1993. Vol. 43 (4). P. 231–242.
22. *Dhawale N.M., Adamchuk V.I., Prasher S.O., Rossel R.A.V., Ismail A.A., Kaur J.* Proximal soil sensing of soil texture and organic matter with a prototype portable mid-infrared spectrometer // *European journal of soil science*. 2016. Vol. 66. P. 661–669.
23. *Hong Y., Yu L., Chen Y., Liu Y., Cheng H.* Prediction of Soil Organic Matter by VIS-NIR Spectroscopy Using Normalized Soil Moisture Index as a Proxy of Soil Moisture // *Remote sensing*. 2018. Vol. 10. 28 p.
24. *Islam K., Singh B., McBratney A.* Simultaneous Estimation of Several Soil Properties by Ultra-Violet, Visible, and Near-Infrared Reflectance Spectroscopy // *Australian Journal of Soil Research*. 2003. Vol. 41. P. 1101–1114.
25. *Leng P., Song X., Li Z.L., Wang Y., Wang D.* Effects of vegetation and soil texture on surface soil moisture retrieval using multi-temporal optical and thermal infrared observations // *International journal of remote sensing*. 2015. Vol. 36. P. 4972–4985.
26. *Ma F., Du C., Zhou J.* A Self-Adaptive Model for the Prediction of Soil Organic Matter Using Mid-Infrared Photoacoustic Spectroscopy // *Soil science society of America journal*. 2016. Vol. 80. P. 238–246.
27. *Nanni M.R., Dematte J.A.M.* Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis // *Soil science society of America journal*. 2006. Vol. 70. P. 393–407.
28. *Palombo A., Pascucci S., Loperte A.* Soil Moisture Retrieval by Integrating TASI-600 Airborne Thermal Data // *Sensors*. 2019. Vol. 19. P. 1515.
29. *Rossel R.A.V., 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.
30. *Rossel R.A.V., Rizzo R., Dematte J.A.M., Behrens T.* Spatial Modeling of a Soil Fertility Index using Visible-Near-Infrared Spectra and Terrain Attributes // *Soil science society of America journal*. 2010. Vol. 74. P. 1293–1300.

31. *Sanchez J.M., French A.N., Mira M., Hunsaker D.J., Thorp K. R., Valor E., Caselles V.* Thermal Infrared Emissivity Dependence on Soil Moisture in Field Conditions // IEEE transactions on geoscience and remote sensing. 2011. Vol. 49. P. 4652–4659.
32. *Soriano-Disla J.M., Janik L.J., Rossel R.A.V., Macdonald, L. M. McLaughlin M.J.* The Performance of Visible, Near-, and Mid-Infrared Reflectance Spectroscopy for Prediction of Soil Physical, Chemical, and Biological Properties // Applied spectroscopy reviews. 2014. Vol. 49. P. 139–186.
33. *Stenberg B., Rossel R.A.V., Mouazen A. M., Wetterlind J.* Visible and near infrared spectroscopy in soil science // Advances in agronomy. 2010. Vol. 107. P. 163–215.
34. *Vasat R., Kodesova R., Boruvka L., Klement A., Jaksik O., Gholizadeh A.* Consideration of peak parameters derived from continuum-removed spectra to predict extractable nutrients in soils with visible and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy (VNIR-DRS) // Geoderma. 2014. Vol. 232–234. P. 208–218.
35. *Wang Y., Peng J., Song X., Leng P., Ludwig R., Loew A.* Surface Soil Moisture Retrieval Using Optical/Thermal Infrared Remote Sensing Data // IEEE transactions on geoscience and remote sensing. 2018. Vol. 56. No. 9. P. 5433–5442.
36. *Xia Y., Ugarte C.M., Guan K., Pentrak M.* Developing Near- and Mid-Infrared Spectroscopy Analysis Methods for Rapid Assessment of Soil Quality in Illinois // Soil science society of America journal. 2018. Vol. 82. No. 6. P. 1415–1427.

REFERENCES

1. *Agroklimaticheskii spravochnik po Tulskoi oblasti* (Agroclimatic guide to the Tula region), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1958, 128 p.
2. *Antsiferov A.Yu., Tekhnologicheskie osobennosti identifikatsii sostoyaniya pochv metodami distantsionnogo zondirovaniya* (Technological features of identification of soil condition by remote sensing methods), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii, Geodeziya i aerofotosemka*, 2012, pp. 76–80.
3. *Vadyunina A.F., Korchagina Z.A., Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv* (Methods of studying the physical properties of soils), Moscow: Agropromizdat, 1986, 416 p.
4. *Karmanov I.I., Spektralnaya otrazhatelnaya sposobnost i tsvet pochv kak pokazateli ikh svoystv* (Spectral reflectivity and color of soils as indicators of their properties), Moscow: Kolos, 1974, 351 p.

5. Kachinskii N.A., *Fizika pochvy* (Soil physics), Moscow: Vysshaya shkola, 1965, 321 p.
6. *Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu kompleksnogo monitoringa plodorodiy pochv zemel selskokhozyaistvennogo naznacheniya* (Guidelines for the comprehensive monitoring of soil fertility of agricultural lands), Moscow: FGNU "Rosinformagrotekh", 2003, 240 p.
7. Mikhailova N.A., Orlov D.S., *Opticheskie svoystva pochv i pochvennykh komponentov* (Optical properties of soils and soil components), Moscow: Nauka, 1986, 119 p.
8. Obukhov A.I., Orlov D.S., *Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost glavneishikh tipov pochv i vozmozhnosti ispolzovaniya diffuznogo otrazheniya pri pochvennykh issledovaniyakh* (Spectral reflectivity of the most important soil types and the possibility of using diffuse reflection in soil studies), *Pochvovedenie*, Moscow, 1964, No. 2, pp. 83–93.
9. Orlov D.S., Sukhanova N.I., Rozanova M.S., *Spektral'naya otrazhatelnaya sposobnost pochv i ikh komponentov* (Spectral reflectivity of soils and their components), Moscow: MGU, 2001, 176 p.
10. Ratnikov A.I., *Pochvy Tul'skoi oblasti: Avtoref. diss. ... kand. s.-kh. nauk* (Soils of the Tula region: Extended Abstract of Cand. agric. sci. thesis), Moscow, 1960, 25 p.
11. Red'kin F.B., Gennadiev A.N., Savin I.Yu., *Antropogenno izmenennyye pochvy severa Srednerusskoi vozvysheynosti: evolyutsiya i klassifikatsiya* (Anthropogenically modified soils of the north of the Central Russian Upland: evolution and classification), *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*, Moscow, 1996, No. 2, pp. 31–36.
12. Savin I.Yu., *Sovremennyyi sputnikovyy monitoring pochv i posevov: dostizheniya i problemy* (Modern satellite monitoring of soils and crops: achievements and challenges), In: *Primenenie sredstv distantsionnogo zondirovaniya zemli v selskom khozyaistve* (Application of remote sensing tools in agriculture), 2015, pp. 29–32.
13. Savin I.Yu., Simakova M.S., *Sputnikovyye tekhnologii dlya inventarizatsii i monitoringa pochv v Rossii* (Satellite technologies for soil inventory and monitoring in Russia), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 104–115.
14. Simakova M.S., Savin I.Yu., *Ispolzovanie materialov aero-i kosmicheskoi semki v kartografirovaniy pochv: puti razvitiya, sostoyaniye, zadachi* (The use of aerial and satellite imagery in soil mapping: development paths, status, tasks), *Pochvovedenie*, 1998, No. 11, pp. 1339–1347.
15. Sorokina N.P., *Struktura pochvennogo pokrova pakhotnykh zemel: Tipizatsiya, kartografirovaniye, agroekologicheskaya otsenka: Diss. ... dokt. s.-kh. nauk: 03.00.27* (The structure of the soil cover of arable land: Typification,

mapping, agroecological assessment: Doctor of agric. sci. thesis), Moscow, 2003, 294 p.

16. Chinilin A.V., Savin I.Yu., Potentsial'nye vozmozhnosti distantsionnoi indikatsii kharaktera pochvoobrazuyushchikh i podstilayushchikh porod chernozemnykh pochv po tsvetovym kharakteristikam ikh poverkhnosti (Potential remote indication of the nature of soil-forming and underlying rocks of chernozem soils by the color characteristics of their surface), *Izvestiya Timiryazevskoi selskokhozyaistvennoi akademii*, 2018, No. 1, pp. 48–59.

17. Shein E.V., *Kurs fiziki pochv* (Soil physics course), Moscow: MGU, 2005, 432 p.

18. Yagodin B.A., Zhukov Yu.P., Kobzarenko V.I., *Agrokimiya* (Agrochemistry), Moscow: Kolos, 2002, 584 p.

19. Camargo L.A., Marques J., Barron V., Ferracciu Alleoni L.R., Barbosa R.S., Pereira G.T., Mapping of clay, iron oxide and adsorbed phosphate in Oxisols using diffuse reflectance spectroscopy, *Geoderma*, 2015, Vol. 251, pp. 124–132.

20. Coutinho M.A.N., Alari F. de O., Ferreira M.M.C., Influence of soil sample preparation on the quantification of NPK content via spectroscopy, *Geoderma*, 2019, Vol. 338, pp. 401–409.

21. Csillag F., Pasztor L., Biehl L.L., Spectral band selection for the characterization of salinity status of soils, *Remote Sensing of Environment*, 1993, Vol. 43 (4), pp. 231–242.

22. Dhawale N.M., Adamchuk V.I., Prasher S.O., Rossel R.A.V., Ismail A.A., Kaur J., Proximal soil sensing of soil texture and organic matter with a prototype portable mid-infrared spectrometer, *European journal of soil science*, 2016, Vol. 66, pp. 661–669.

23. Hong Y., Yu L., Chen Y., Liu Y., Cheng H., Prediction of Soil Organic Matter by VIS-NIR Spectroscopy Using Normalized Soil Moisture Index as a Proxy of Soil Moisture, *Remote sensing*, 2018, Vol. 10, p. 28.

24. Islam K., Singh B., McBratney A., Simultaneous Estimation of Several Soil Properties by Ultra-Violet, Visible, and Near-Infrared Reflectance Spectroscopy, *Australian Journal of Soil Research*, 2003, Vol. 41, pp. 1101–1114.

25. Leng P., Song X., Li Z.L., Wang Y., Wang D., Effects of vegetation and soil texture on surface soil moisture retrieval using multi-temporal optical and thermal infrared observations, *International journal of remote sensing*, 2015, Vol. 36, pp. 4972–4985.

26. Ma F., Du C., Zhou J., A Self-Adaptive Model for the Prediction of Soil Organic Matter Using Mid-Infrared Photoacoustic Spectroscopy, *Soil science society of America journal*, 2016, Vol. 80, pp. 238–246.

27. Nanni M.R., Dematte J.A.M., Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis, *Soil science society of America journal*, 2006, Vol. 70, pp. 393–407.
28. Palombo A., Pascucci S., Loperte A., Soil Moisture Retrieval by Integrating TASI-600 Airborne Thermal Data, *Sensors*, 2019, Vol. 19, p. 1515.
29. Rossel R.A.V., 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.
30. Rossel R.A.V., Rizzo R., Dematte J.A.M., Behrens T., Spatial Modeling of a Soil Fertility Index using Visible-Near-Infrared Spectra and Terrain Attributes, *Soil science society of America journal*, 2010, Vol. 74, pp. 1293–1300.
31. Sanchez J.M., French A.N., Mira M., Hunsaker D.J., Thorp K.R., Valor E., Caselles V., Thermal Infrared Emissivity Dependence on Soil Moisture in Field Conditions, *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2011, Vol. 49, pp. 4652–4659.
32. Soriano-Disla J.M., Janik L.J., Rossel R.A.V., Macdonald, L.M. McLaughlin M.J., The Performance of Visible, Near-, and Mid-Infrared Reflectance Spectroscopy for Prediction of Soil Physical, Chemical, and Biological Properties, *Applied spectroscopy reviews*, 2014, Vol. 49, pp. 139–186.
33. Stenberg B., Rossel R.A.V., Mouazen A.M., Wetterlind J., Visible and near infrared spectroscopy in soil science, *Advances in agronomy*, 2010, Vol. 107, pp. 163–215.
34. Vasat R., Kodesova R., Boruvka L., Klement A., Jaksik O., Gholizadeh A., Consideration of peak parameters derived from continuum-removed spectra to predict extractable nutrients in soils with visible and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy (VNIR-DRS), *Geoderma*, 2014, Vol. 232–234, pp. 208–218.
35. Wang Y., Peng J., Song X., Leng P., Ludwig R., Loew A., Surface Soil Moisture Retrieval Using Optical/Thermal Infrared Remote Sensing Data, *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2018, Vol. 56, No. 9, pp. 5433–5442.
36. Xia Y., Ugarte C.M., Guan K., Pentrak M., Developing Near- and Mid-Infrared Spectroscopy Analysis Methods for Rapid Assessment of Soil Quality in Illinois, *Soil science society of America journal*, 2018, Vol. 82, No. 6, pp. 1415–1427.