



Почвоведение и агрохимия Soil science and agrochemistry

DOI: 10.22363/2312-797X-2023-18-2-197-212

EDN KRIQXB

УДК 631.472.71:528.8.041.3

Научная статья / Research article

Информативность данных инфракрасного диапазона съемки для детектирования свойств пахотных почв

П.Г. Грубина¹  , И.Ю. Савин^{1, 2} ¹ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», г. Москва, Российская Федерация²Российский университет дружбы народов, г. Москва, Российская Федерация grubina_pg@esoil.ru

Аннотация. Приведены результаты анализа возможности детектирования параметров почвенного плодородия на основе использования данных тепловой съемки на примере тестового участка в Ясногорском районе Тульской области. На тестовом участке представлены серые лесные слабоэродированные пахотные почвы, расположенные в плоской части склона. Во время полевых работ проводилась съемка открытой поверхности почв с использованием тепловизора FLIR VUE 512 (диапазон 7,5–13,5 мкм), также из слоя 0–5 см производился отбор почвенных образцов и измерение влажности почвы в слое 15–20 см. Практически для всех параметров почвенного плодородия (рН, содержание гумуса, содержание калия, обменные катионы — Mg⁺⁺, K⁺, Na⁺) была установлена статистически значимая корреляция ($r = 0,4–0,7$), между ними и данными съемки в тепловом диапазоне спектра. Для умеренных корреляций были составлены уравнения полиномиальной регрессии. Из исследуемых параметров плодородия значимый коэффициент детерминации ($R^2 > 0,60$) с тепловым диапазоном спектра имели рН сол. ($R^2 = 0,61$), содержание оксида калия ($R^2 = 0,60$) и обменных катионов калия ($R^2 = 0,63$). Полученные результаты показали, что использование съемки в тепловом диапазоне может применяться для картографирования некоторых параметров почвенного плодородия региона исследования. Для тестового поля оказалось невозможным на основе данных тепловой съемки надежно отдетектировать все основные параметры плодородия почв поля. Однако данные тепловой почвенной съемки можно использовать как вспомогательные при съемке в видимом и ближнем ИК диапазонах, что поможет повысить точность бесконтактного почвенного мониторинга.

Ключевые слова: тепловая съемка, почвенные свойства, параметры плодородия почв, Тульская область

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Грубина П.Г., Савин И.Ю., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Финансирование. Благодарности. Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта РФ в лице Минобрнауки (соглашение № 075-15-2022-321).

История статьи: поступила в редакцию 12 мая 2022 г., принята к публикации 28 февраля 2023 г.

Для цитирования: Грубина П.Г., Савин И.Ю. Информативность данных инфракрасного диапазона съемки для детектирования свойств пахотных почв // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2023. Т. 18. № 2. С. 197—212. doi: 10.22363/2312-797X-2023-18-2-197-212

Informative value of infrared survey data for detecting properties of arable soils

Praskovya G. Grubina¹  , Igor Y. Savin^{1,2} 

¹V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russian Federation

²RUDN University, Moscow, Russian Federation

 grubina_pg@esoil.ru

Abstract. Possibility of detecting soil fertility parameters based on the use of thermal survey data was studied on the test area of Yasnogorsky District, Tula region, Russia. The test area has gray forest slightly eroded arable soils located in the flat part of the slope. During the field works, an open soil surface was photographed using a FLIR VUE 512 thermal imager (range 7.5–13.5 μm), soil samples were also taken from a layer of 0–5 cm and soil moisture was measured in a layer of 15–20 cm. For almost all parameters of soil fertility (pH, humus content, potassium content, exchange cations — Mg^{++} , K^+ , Na^+), a statistically significant correlation was established ($r = 0.4\text{--}0.7$) between them and the survey data in the thermal range of the spectrum. For moderate correlations, polynomial regression equations were compiled. Among the studied fertility parameters, the pH of the salt extract, the content of potassium oxide and potassium exchange cations had significant coefficient of determination ($R^2 > 0.60$) with the thermal range of the spectrum — $R^2 = 0.61$, $R^2 = 0.60$ and $R^2 = 0.63$, respectively. The obtained results have shown that thermal imaging can be used to map some parameters of soil fertility for the region. Nevertheless, it turned out to be impossible to reliably detect all the main parameters of soil fertility of the test field on the basis of thermal survey data. However, the thermal soil survey data can be used as auxiliary data when shooting in the visible and near-IR ranges, which helps to improve the accuracy of contactless soil monitoring.

Key words: thermal infrared imaging, soil properties, soil fertility parameters, Tula region

Funding. The research was carried out with the financial support of the project of the Russian Federation represented by the Ministry of Education and Science (no. 075-15-2022-321).

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Article history: Received: 12 May 2022. Accepted: 28 February 2023.

For citation: Grubina PG, Savin IY. Informative value of infrared survey data for detecting properties of arable soils. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2023; 18(2):197—212. doi: 10.22363/2312-797X-2023-18-2-197-212

Введение

Широкое внедрение спутниковых технологий открыло возможности для разработки новых методов картографирования свойств почв, основанных на их использовании. Показано, что с помощью методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) можно достаточно надежно картографировать отдельные свойства почв [1].

Наиболее широко используются данные видимого и ближнего ИК-диапазонов. По ним на тестовых полях определяют такие свойства как содержание органического вещества почв [2], гипса и карбонатов [3], калия и магния [4], азота, калия и фосфора [5, 6], песка и глины [7] и влажность почв [8]. Но обычно достичь высокой точности детектирования на основе этих данных не удается, поэтому ведется анализ возможностей использования данных и других спектральных диапазонов. Одним из перспективных является тепловой диапазон.

В [9] показана возможность использования теплового канала (10,6...11,19 мкм) спутника Landsat-8 и совокупности мультиспектральных данных для картирования влажности почвы в провинции Цзянсу, Китай. Коэффициент детерминации модели был равен 0,62.

В [10] показана возможность определения влажности верхнего горизонта почвы в лабораторных условиях с помощью радиометра CIMEL Electronique CE-312 (измерения проведены в тепловом диапазоне 8...13 мкм), были использованы образцы почв из США и Бразилии. Коэффициент детерминации модели был равен 0,90.

Санчез с коллегами [11] в центральной Аризоне (США) изучали влияние влажности почвы на коэффициент теплового излучения почв. Исследование проходило в полевых условиях также с помощью радиометра CIMEL Electronique CE312–2 (в диапазоне 8–13 мкм) и показало, что наличие трещин на поверхности почвы увеличивает коэффициент теплового излучения при одинаковом содержании почвенной влаги.

В полевом опыте в Ставропольском крае с помощью БПЛА проводилась тепловизионная съемка тестового участка. Полученные значения температуры варьировались от 19,5 до 5,2 °С. Эти исследования помогают анализировать поля, подверженные загрязнению и другим опасным факторам, а также дополняют полевые выезды [12].

В 2012 г. было проведено исследование в округе Хэйнэ (Китай), в ходе которого выявили взаимосвязи между данными теплового диапазона спектра (8...11 мкм) и температурой почв. Тепловые данные были получены в результате аэросъемки тестового участка с помощью инфракрасного бортового сканера (WiDAS). Коэффициент детерминации модели был равен 0,88 [13].

В [14] показано определение поверхностной температуры почвы на лесной территории на границе Вирджинии и северной Каролины (США) при помощи объединения данных тепловых каналов (10,5...12,5 мкм) спутников Landsat-8 и MODIS (MOD11). Коэффициент детерминации модели был равен 0,76.

Также была продемонстрирована возможность детектирования глинистых минералов и оксида железа тропических почв в штате Сан-Паулу (Бразилия) в тепловом канале спутника ASTER (8000–14000 нм) [15].

В районе города Маллева (Западная Австралия) на полузасушливых почвах исследование показало взаимосвязи между содержанием песка и глины в тепловом диапазоне спектра (8...14 мкм), полученном с помощью бортового Фурье-спектрометра TASI-600. Коэффициент детерминации модели был равен 0,93 [16].

В 2019 г. группой ученых [17] проведено создание глобальной карты засоления почв на основе тепловых каналов спутников Landsat-5 and Landsat-8 (10,4–12,5 мкм). Точность составленной карты достигала 67...70 %.

В [18] провели лабораторный эксперимент, в ходе которого установили взаимосвязи между тепловым диапазоном спектра и тремя типами засоления почв. Тепловой диапазон почв (8...14 мкм) измеряли с помощью ИК-Фурье спектрометра, а образцы почвы отбирали на юге пустыни Курбантонгут (Китай) и добавляли растворы солей (NaCl , Na_2SO_4 , Na_2CO_3) в лаборатории. Коэффициенты детерминации моделей: $\text{NaCl} = 0,67$; $\text{Na}_2\text{SO}_4 = 0,71$; $\text{Na}_2\text{CO}_3 = 0,69$.

В провинции Гириин на северо-востоке Китая было проведено детектирование рН почвы на основе данных теплового канала спутника Landsat-8 (10,5...12,5 мкм), карты высот (ELV) и среднегодовое количество осадков (MAP). Коэффициент детерминации модели был равен 0,73 [19].

Все эти исследования показали перспективность данных тепловой съемки. Тем не менее их все еще недостаточно для создания технологии детектирования свойств почв на основе данных тепловой съемки.

Цель исследования — анализ связей отдельных свойств почв с изображением их поверхности на данных дистанционной съемки в тепловом диапазоне спектра на примере тестового участка на пашне Ясногорского района Тульской области.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования — почвенный покров тестового поля Почвенного института им. В.В. Докучаева, расположенного в Ясногорском районе Тульской области. Площадь поля составляет около 13,5 га (рис. 1).

Тестовое поле расположено в плоской части склона, который имеет уклон 2–3 градуса и западную экспозицию. Почвообразующие породы — пылеватые суглинки. Их подстиляет коричневато-бурый опесчаненный валунный суглинок [20].

На участке представлены серые лесные слабоэродированные пахотные почвы. В пахотном горизонте почв содержится в среднем около 3 % гумуса, с варьированием от 1,86 до 7,3 %. Реакция почвенной среды нейтральная, $\text{pH}_{\text{вод}} = 6,14$ и $\text{pH}_{\text{сол.}} = 5,3$. Среднее содержание общего азота 0,18 %, фосфора и калия — 118, 3 и 227 мг/кг почвы соответственно. Обменные катионы (по Шелленбергу), мг-экв/100 г почвы: $\text{K}^+ = 0,44$; $\text{Na}^+ = 0,07$; $\text{Ca}^{2+} = 19,5$; $\text{Mg}^{2+} = 2,7$.

Полевые исследования проходили в середине августа 2019 г., в течение года поле находилось под паром. Всего было заложено 30 точек опробования (см. рис. 1).

Образцы отбирались из 0–5 см слоя пахотного горизонта почв. На каждой точке отбирался смешанный образец в радиусе около 3 м.



Рис. 1. Тестовое поле. Расположение точек полевого опробования показано красными точками
Источник: сделано авторами

Fig. 1. Test field. The location of field testing points is shown by red points
Source: made by the authors

Анализы выполнялись в испытательном лабораторном центре (ИЛЦ) Почвенного института им. В.В. Докучаева и включали такие параметры почвенного плодородия, как содержание гумуса, водный и солевой pH почвы, подвижный фосфор (по Кирсанову), обменный калий (по Масловой), общий азот (стандартизированная методика [21]), обменные основания по Шолленбергеру (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+).

Во время полевого выезда проходило измерение влажности с помощью влагомера почвы TR-46908, в пахотном слое 15–20 см. Измерения проводили в 5 повторностях на каждой точке [22].

Отбор образцов проводился сопряженно со съемкой открытой поверхности почвы с высоты 135–150 см в трехкратной повторности с помощью тепловизора FLIR VUE 512, который фиксирует отражение электромагнитных волн от поверхности в диапазоне $7,5 \sim 13,5 \text{ мкм}^1$ (рис. 2).

Изображения тепловизора загружались в пакет прикладных программ ILWIS², в котором проводился анализ полученных с помощью тепловизора изображений. Для каждого изображения определяли следующие показатели: среднее арифметическое значение, минимальная и максимальная величины, медианное и преобладающее значения, а также стандартное отклонение тона изображения открытой поверхности почв на изображениях, полученных с помощью тепловизора.

¹ Официальный сайт Teledyne FLIR. Режим доступа: <https://www.flir.com/products/vue-pro> Дата обращения: 03.05.202

² Официальный сайт University of Twente. Режим доступа: <https://www.itc.nl/ilwis/download/ilwis33> Дата обращения: 03.05.2023

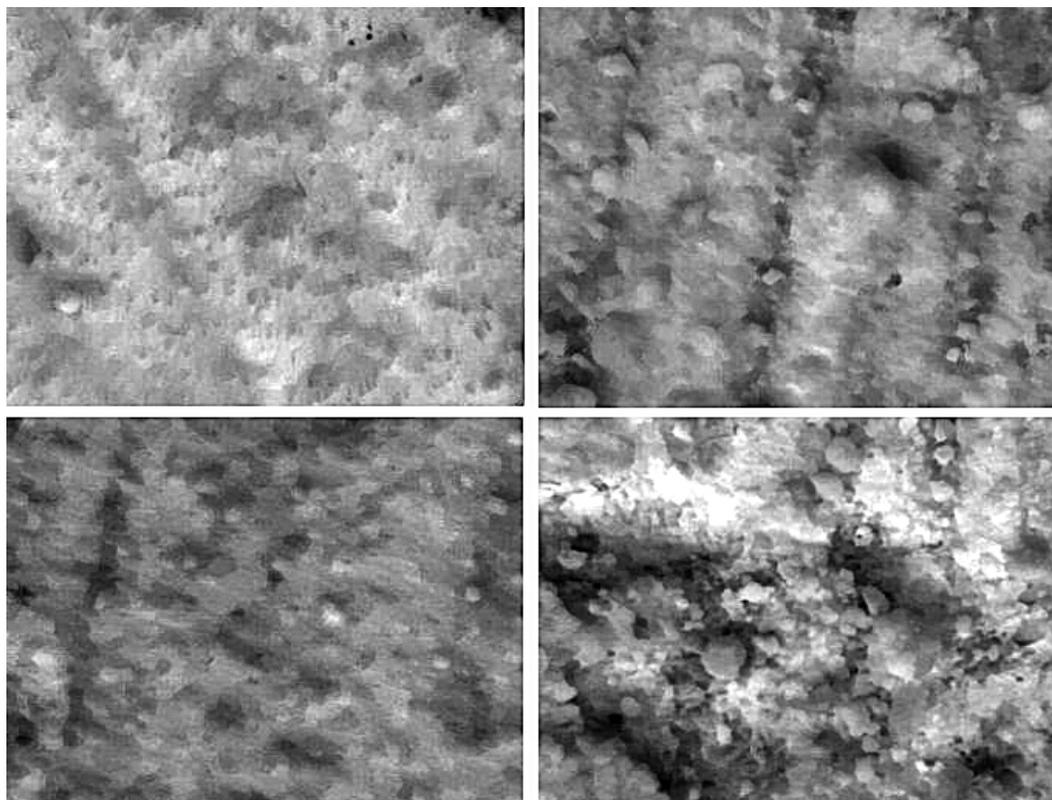


Рис. 2. Примеры тепловых изображений открытой поверхности почв тестового поля
Источник: сделано авторами

Fig. 2. Examples of thermal images of open soil surfaces in test field
Source: made by the authors

В программе EXCEL³ осуществляли статистическую обработку данных (корреляционный анализ, определение коэффициента детерминации R^2 , построение уравнений регрессии).

Для корреляционного анализа вычисляли коэффициент Пирсона r . Проверку статистически значимых коэффициентов корреляции проводили при уровне значимости $p < 0,01$ ($t_{\text{табл}} = 2,76$).

Также выполняли регрессионный анализ для статистически значимых коэффициентов корреляции. Установление достоверности моделей вели по пороговому значению скорректированного $R^2 > 0,60$. Этот порог достоверности неоднократно применялся для выделения взаимосвязей между тепловым диапазоном спектра и почвенными свойствами [9, 23, 24].

Результаты исследования и обсуждение

Исходные данные показаны в табл. 1. Результаты корреляционного анализа приведены в табл. 2.

³ Официальный сайт Microsoft. Режим доступа: <https://www.microsoft.com/ru-ru/microsoft-365/excel/> Дата обращения: 03.05.2023

Таблица 1

Исходные фактические данные

Номер точки	min	max	mean	med	std	Pred	pH	humus	pH	P ₂ O ₅	N	K ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Влажность, %
1	42	175	123	125	20	126	5.90	2.90	5.13	182.65	0.18	324.69	12.73	2.94	0.07	0.71	68.23
2	39	185	125	128	21	137	5.70	2.33	4.86	112.64	0.14	218.67	11.79	2.88	0.08	0.47	46.78
3	42	174	120	122	19	125	5.78	2.43	4.92	100.47	0.15	185.53	14.96	2.84	0.09	0.38	40.76
4	44	170	125	126	18	137	5.97	2.38	4.88	115.69	0.13	182.19	14.41	3.14	0.10	0.37	40.04
5	31	194	130	131	22	137	6.19	1.96	5.07	164.39	0.09	249.81	15.25	3.29	0.09	0.49	53.79
6	24	217	125	128	26	137	5.90	2.53	5.02	85.25	0.19	141.57	14.36	2.46	0.11	0.28	31.76
7	15	232	130	134	33	143	5.81	2.53	4.94	100.47	0.16	212.48	14.60	3.10	0.07	0.40	46.13
8	23	227	138	142	28	149	5.81	2.27	4.91	112.64	0.13	176.36	15.18	3.18	0.08	0.34	39.03
9	36	184	124	125	18	131	6.07	2.43	5.19	127.86	0.09	197.15	16.12	2.89	0.07	0.38	43.32
10	41	177	123	125	18	125	5.82	1.91	4.88	103.51	0.13	163.87	15.11	2.86	0.07	0.30	36.44
11	43	174	123	126	20	131	5.83	2.02	4.86	100.47	0.13	183.09	14.69	3.11	0.10	0.35	40.27
12	40	186	122	124	19	125	5.84	2.17	4.86	112.64	0.10	169.95	17.52	3.07	0.08	0.32	38.19
13	39	188	123	123	18	126	6.11	1.82	5.02	118.73	0.16	184.51	15.37	2.99	0.08	0.35	40.66
14	43	174	119	121	20	126	6.12	2.17	5.01	109.60	0.06	182.90	12.87	2.68	0.05	0.35	39.77
15	47	160	114	114	14	119	5.69	2.59	4.90	100.47	0.15	159.18	13.49	2.95	0.07	0.30	35.20
16	43	184	122	123	16	131	5.71	2.22	4.86	121.77	0.14	216.35	14.56	3.17	0.06	0.37	46.90
17	38	177	131	133	19	137	5.65	2.43	4.87	106.55	0.12	176.94	9.66	2.19	0.08	0.34	37.84
18	40	185	117	119	19	125	5.63	2.74	4.93	103.51	0.15	183.34	14.01	2.63	0.06	0.34	40.08
19	33	191	117	118	24	129	5.92	2.84	5.21	149.17	0.08	200.90	14.96	2.24	0.05	0.34	43.70
20	25	202	124	124	24	126	6.18	1.54	5.28	243.52	0.49	227.00	20.02	2.97	0.08	0.44	50.10
21	39	167	110	111	16	113	7.13	5.32	6.48	1746.63	0.25	293.33	30.55	1.89	0.05	0.57	65.28
22	35	186	131	137	26	143	6.57	5.77	6.01	1564.11	0.31	287.08	47.27	2.17	0.07	0.56	67.43
23	56	145	111	111	10	113	5.92	3.78	5.22	231.15	0.18	283.24	15.06	2.48	0.05	0.52	60.27
24	42	164	122	123	15	125	6.05	3.53	5.25	109.47	0.35	208.88	17.52	2.73	0.06	0.39	45.92
25	56	151	118	121	15	131	6.02	3.46	5.19	100.34	0.17	208.60	18.36	2.86	0.06	0.35	46.05

Окончание Табл. 1

Номер точки	min	max	mean	med	std	Pred	pH	humus	pH	P ₂ O ₅	N	K ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Влажность, %
26	56	166	133	135	13	135	6.06	3.97	5.15	164.22	0.15	271.50	17.24	2.82	0.06	0.52	58.43
27	57	132	101	102	8	102	6.49	4.10	5.71	559.06	0.19	395.04	24.48	2.45	0.04	0.75	84.55
28	49	158	122	123	12	126	7.43	7.31	6.88	3541.36	0.33	281.90	47.64	1.95	0.05	0.57	66.42
29	58	139	106	106	11	107	7.44	5.19	6.74	2750.46	0.23	310.94	35.31	2.05	0.04	0.59	69.79
30	57	133	107	108	9	113	7.55	6.35	6.89	2841.72	0.34	332.59	41.49	2.16	0.05	0.68	75.39

Свойство почв

pHвод — pH водный

Humus — содержание гумуса, %

pHsol — pH солевой

P₂O₅ — фосфор подвижный, мг/кгK₂O — калий обменный, мг/кг

N — азот общий, %

Ca²⁺ — обменный катион кальция, мг-экв/100гMg²⁺ — обменный катион магния, мг-экв/100 гNa⁺ — обменный катион натрия, мг-экв/100 гK⁺ — обменный катион калия, мг-экв/100 г

Значения тона изображения тепловизора

min — минимальное значение

max — максимальное значение

mean — среднее значение

med — модальное значение

std — стандартное отклонение

pred — преобладающее значение

Table 1

Initial data

Point number	min	max	mean	med	std	Pred	pH	humus	pH	P ₂ O ₅	N	K ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Moisture content %
1	42	175	123	125	20	126	5.90	2.90	5.13	182.65	0.18	324.69	12.73	2.94	0.07	0.71	68.23
2	39	185	125	128	21	137	5.70	2.33	4.86	112.64	0.14	218.67	11.79	2.88	0.08	0.47	46.78
3	42	174	120	122	19	125	5.78	2.43	4.92	100.47	0.15	185.53	14.96	2.84	0.09	0.38	40.76
4	44	170	125	126	18	137	5.97	2.38	4.88	115.69	0.13	182.19	14.41	3.14	0.10	0.37	40.04
5	31	194	130	131	22	137	6.19	1.96	5.07	164.39	0.09	249.81	15.25	3.29	0.09	0.49	53.79
6	24	217	125	128	26	137	5.90	2.53	5.02	85.25	0.19	141.57	14.36	2.46	0.11	0.28	31.76
7	15	232	130	134	33	143	5.81	2.53	4.94	100.47	0.16	212.48	14.60	3.10	0.07	0.40	46.13
8	23	227	138	142	28	149	5.81	2.27	4.91	112.64	0.13	176.36	15.18	3.18	0.08	0.34	39.03
9	36	184	124	125	18	131	6.07	2.43	5.19	127.86	0.09	197.15	16.12	2.89	0.07	0.38	43.32
10	41	177	123	125	18	125	5.82	1.91	4.88	103.51	0.13	163.87	15.11	2.86	0.07	0.30	36.44
11	43	174	123	126	20	131	5.83	2.02	4.86	100.47	0.13	183.09	14.69	3.11	0.10	0.35	40.27

Ending table 1

Point number	min	max	mean	med	std	Pred	pH	humus	pH	P ₂ O ₅	N	K ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Moisture content %
12	40	186	122	124	19	125	5.84	2.17	4.86	112.64	0.10	169.95	17.52	3.07	0.08	0.32	38.19
13	39	188	123	123	18	126	6.11	1.82	5.02	118.73	0.16	184.51	15.37	2.99	0.08	0.35	40.66
14	43	174	119	121	20	126	6.12	2.17	5.01	109.60	0.06	182.90	12.87	2.68	0.05	0.35	39.77
15	47	160	114	114	14	119	5.69	2.59	4.90	100.47	0.15	159.18	13.49	2.95	0.07	0.30	35.20
16	43	184	122	123	16	131	5.71	2.22	4.86	121.77	0.14	216.35	14.56	3.17	0.06	0.37	46.90
17	38	177	131	133	19	137	5.65	2.43	4.87	106.55	0.12	176.94	9.66	2.19	0.08	0.34	37.84
18	40	185	117	119	19	125	5.63	2.74	4.93	103.51	0.15	183.34	14.01	2.63	0.06	0.34	40.08
19	33	191	117	118	24	129	5.92	2.84	5.21	149.17	0.08	200.90	14.96	2.24	0.05	0.34	43.70
20	25	202	124	124	24	126	6.18	1.54	5.28	243.52	0.49	227.00	20.02	2.97	0.08	0.44	50.10
21	39	167	110	111	16	113	7.13	5.32	6.48	1746.63	0.25	293.33	30.55	1.89	0.05	0.57	65.28
22	35	186	131	137	26	143	6.57	5.77	6.01	1564.11	0.31	287.08	47.27	2.17	0.07	0.56	67.43
23	56	145	111	111	10	113	5.92	3.78	5.22	231.15	0.18	283.24	15.06	2.48	0.05	0.52	60.27
24	42	164	122	123	15	125	6.05	3.53	5.25	109.47	0.35	208.88	17.52	2.73	0.06	0.39	45.92
25	56	151	118	121	15	131	6.02	3.46	5.19	100.34	0.17	208.60	18.36	2.86	0.06	0.35	46.05
26	56	166	133	135	13	135	6.06	3.97	5.15	164.22	0.15	271.50	17.24	2.82	0.06	0.52	58.43
27	57	132	101	102	8	102	6.49	4.10	5.71	559.06	0.19	395.04	24.48	2.45	0.04	0.75	84.55
28	49	158	122	123	12	126	7.43	7.31	6.88	3541.36	0.33	281.90	47.64	1.95	0.05	0.57	66.42
29	58	139	106	106	11	107	7.44	5.19	6.74	2750.46	0.23	310.94	35.31	2.05	0.04	0.59	69.79
30	57	133	107	108	9	113	7.55	6.35	6.89	2841.72	0.34	332.59	41.49	2.16	0.05	0.68	75.39

Soil properties

pH_{vod} – pH water extract
 Humus – humus content, %
 pH_{sol} – pH salt extract
 P₂O₅ – mobile phosphorus, mg/kg
 K₂O – exchangeable potassium, mg/kg
 N – total nitrogen, %

Thermal imaging tone values

min – minimum value
 max – maximum value
 mean – mean value
 med – median value
 std – standard deviation
 pred – predicted value

Ca²⁺ – exchangeable Ca²⁺, mg-equiv/100g
 Mg²⁺ – exchangeable Mg²⁺, mg-equiv/100g
 Na⁺ – exchangeable Na⁺, mg-equiv/100g
 K⁺ – exchangeable K⁺, mg-equiv/100g

Таблица 2

Результаты корреляционного анализа

Параметры	min	max	mean	med	st d	pred	pH vod	humus	N	pH sol	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	Na	K	Влаж
min	1,00																
max	-0,95	1,00															
mean	-0,63	0,75	1,00														
med	-0,63	0,75	0,99	1,00													
st d	-0,94	0,94	0,70	0,73	1,00												
(pred)	-0,66	0,77	0,94	0,96	0,78	1,00											
pHvod	0,39	-0,51	-0,47	-0,46	-0,45	-0,49	1,00										
humus	0,49	-0,56	-0,39	-0,36	-0,48	-0,38	0,85	1,00									
N	0,05	-0,19	-0,18	-0,18	-0,14	-0,25	0,55	0,51	1,00								
pHsol	0,40	-0,52	-0,49	-0,48	-0,45	-0,50	0,98	0,92	0,59	1,00							
P ₂ O ₅	0,37	-0,46	-0,39	-0,37	-0,40	-0,40	0,94	0,90	0,53	0,96	1,00						
K ₂ O	0,51	-0,60	-0,52	-0,51	-0,55	-0,55	0,73	0,73	0,44	0,75	0,64	1,00					
Ca	0,30	-0,40	-0,29	-0,25	-0,30	-0,29	0,88	0,90	0,62	0,92	0,92	0,68	1,00				
Mg	-0,33	0,45	0,47	0,44	0,35	0,45	-0,68	-0,78	-0,38	-0,77	-0,72	-0,53	-0,66	1,00			
Na	-0,53	0,57	0,62	0,61	0,56	0,62	-0,53	-0,61	-0,21	-0,59	-0,49	-0,65	-0,44	0,59	1,00		
K	0,47	-0,57	-0,48	-0,46	-0,52	-0,51	0,76	0,74	0,46	0,77	0,68	0,98	0,70	-0,53	-0,56	1,00	
Влаж	0,50	-0,59	-0,51	-0,49	-0,53	-0,54	0,78	0,79	0,48	0,81	0,71	0,99	0,75	-0,57	-0,64	0,98	1,00

Table 2

Results of the correlation analysis

Variables	min	max	mean	med	st d	pred	pH vod	humus	N	pH sol	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	Na	K	Moist
min	1.00																
max	-0.95	1.00															
mean	-0.63	0.75	1.00														
med	-0.63	0.75	0.99	1.00													
st d	-0.94	0.94	0.70	0.73	1.00												
(pred)	-0.66	0.77	0.94	0.96	0.78	1.00											
pHvod	0.39	-0.51	-0.47	-0.46	-0.45	-0.49	1.00										
humus	0.49	-0.56	-0.39	-0.36	-0.48	-0.38	0.85	1.00									
N	0.05	-0.19	-0.18	-0.18	-0.14	-0.25	0.55	0.51	1.00								
pHsol	0.40	-0.52	-0.49	-0.48	-0.45	-0.50	0.98	0.92	0.59	1.00							
P ₂ O ₅	0.37	-0.46	-0.39	-0.37	-0.40	-0.40	0.94	0.90	0.53	0.96	1.00						
K ₂ O	0.51	-0.60	-0.52	-0.51	-0.55	-0.55	0.73	0.73	0.44	0.75	0.64	1.00					
Ca	0.30	-0.40	-0.29	-0.25	-0.30	-0.29	0.88	0.90	0.62	0.92	0.92	0.68	1.00				
Mg	-0.33	0.45	0.47	0.44	0.35	0.45	-0.68	-0.78	-0.38	-0.77	-0.72	-0.53	-0.66	1.00			
Na	-0.53	0.57	0.62	0.61	0.56	0.62	-0.53	-0.61	-0.21	-0.59	-0.49	-0.65	-0.44	0.59	1.00		
K	0.47	-0.57	-0.48	-0.46	-0.52	-0.51	0.76	0.74	0.46	0.77	0.68	0.98	0.70	-0.53	-0.56	1.00	
Влаж	0.50	-0.59	-0.51	-0.49	-0.53	-0.54	0.78	0.79	0.48	0.81	0.71	0.99	0.75	-0.57	-0.64	0.98	1.00

В табл. 2 жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты корреляции, обладающие высокой ($r = 0,7 \dots 1$) и умеренной ($r = 0,4 \dots 0,7$) силой связи. В табл. 3 показаны t-критерии Стьюдента, жирным шрифтом выделены значимые ($t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$) при уровне значимости $p < 0,01$.

**Расчет фактического t-критерия Стьюдента для проверки
статистической значимости***

Параметры	min	max	mean	med	st d	pred	pH vod	humus	N	pH sol	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	Na	K
min																
max	52,08															
mean	5,56	9,08														
med	5,55	8,98	381,92													
st d	42,24	45,11	7,27	8,1												
(pred)	10,2	44,61	58,73	10,62												
pHvod	2,48	3,64	3,19	3,14	3	3,47										
humus	3,37	4,26	2,43	2,18	3,27	2,34	16,3									
N	0,26	1,04	0,98	1	0,78	1,41	4,16	3,67								
pHsol	2,53	3,8	3,46	3,29	3,01	3,55	119,8	30,42	4,76							
P205	2,3	3,11	2,42	2,29	2,56	2,48	43,48	24,21	3,93	67,99						
K20	3,64	4,92	3,8	3,64	4,14	4,23	8,33	8,31	2,84	9,1	5,67					
Ca	1,77	2,48	1,65	1,42	1,72	1,68	21,12	26,43	5,4	30,49	31,2	6,61				
Mg	1,95	3,03	3,24	2,92	2,14	3	6,69	10,76	2,34	10,1	7,87	3,85	6,26			
Na	3,9	4,43	5,29	5,17	4,26	5,41	3,88	5,05	1,15	4,82	3,44	5,85	2,92	4,79		
K	3,23	4,49	3,26	3,11	3,76	3,69	9,58	8,82	3,13	10,08	6,64	152,18	7,41	3,85	4,29	
Влажн	3,52	4,82	3,61	3,42	3,93	3,98	10,81	10,95	3,33	12,21	7,43	429,64	9,24	4,40	5,74	152,72

* уровень значимости $p < 0,01$; $t_{табл} = 2,76$.

Table 3

Calculation of the actual Student's t-test for verification of statistical significance*

Variables	min	max	mean	med	st d	pred	pH vod	humus	N	pH sol	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	Na	K
min																
max	52.08															
mean	5.56	9.08														
med	5.55	8.98	381.92													
st d	42.24	45.11	7.27	8.1												
(pred)	10.2	44.61	58.73	10.62												
pHvod	2.48	3.64	3.19	3.14	3	3.47										
humus	3.37	4.26	2.43	2.18	3.27	2.34	16.3									
N	0.26	1.04	0.98	1	0.78	1.41	4.16	3.67								
pHsol	2.53	3.8	3.46	3.29	3.01	3.55	119.8	30.42	4.76							
P ₂ O ₅	2.3	3.11	2.42	2.29	2.56	2.48	43.48	24.21	3.93	67.99						
K ₂ O	3.64	4.92	3.8	3.64	4.14	4.23	8.33	8.31	2.84	9.1	5.67					
Ca	1.77	2.48	1.65	1.42	1.72	1.68	21.12	26.43	5.4	30.49	31.2	6.61				
Mg	1.95	3.03	3.24	2.92	2.14	3	6.69	10.76	2.34	10.1	7.87	3.85	6.26			
Na	3.9	4.43	5.29	5.17	4.26	5.41	3.88	5.05	1.15	4.82	3.44	5.85	2.92	4.79		
K	3.23	4.49	3.26	3.11	3.76	3.69	9.58	8.82	3.13	10.08	6.64	152.18	7.41	3.85	4.29	
Moist	3.52	4.82	3.61	3.42	3.93	3.98	10.81	10.95	3.33	12.21	7.43	429.64	9.24	4.40	5.74	152.72

* $p < 0.01$; $t_{табл} = 2.76$.

Высокую и умеренную корреляцию между собой показывают такие параметры почвенного плодородия как показатель рН солевого и водного растворов, содержание гумуса и азота, содержание валового калия и обменного калия.

Для всех параметров плодородия почв и значений тона изображений тепловизора наблюдаются умеренные корреляции ($r = 0,4 \dots 0,7$), кроме содержания фосфора и обменного кальция — они имеют низкие корреляции ($r < 0,4$).

Для всех свойств почвенного плодородия, кроме азота и обменного кальция, установлена приемлемая корреляция ($r = 0,4 \dots 0,7$), между ними и данными съемки в тепловом диапазоне спектра. Для умеренных статистически значимых корреляций были составлены уравнения полиномиальной регрессии. Из исследуемых параметров плодородия значимый коэффициент детерминации ($R^2 > 0,60$) с тепловым диапазоном спектра имели рН_{сол.} ($R^2 = 0,61$), оксид калия ($R^2 = 0,60$), обменные катионы калия ($R^2 = 0,63$) (табл. 4). Скорее всего это обусловлено пространственным варьированием степени эродированности почв (присутствием в большем или меньшем количестве на поверхности почв (и, соответственно, в образце) отмытых от гумусных пленок минеральных зерен).

Таблица 4

Полиномиальные зависимости имеющие наивысшие коэффициенты детерминации R^2 между отдельными параметрами плодородия почв и данными теплового изображения

Параметр плодородия	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации
К	$y = 4E - 05x^2 - 0,005x + 0,49$	0,63
рН sol	$y = 0,0001x^2 - 0,015x + 5,21$	0,61
K ₂ O	$y = 0,0206x^2 - 2,62x + 261,31$	0,60

Table 4

Polynomial relationships with the highest normalized coefficients of determinacy between soil fertility parameters and thermal data

Fertility Parameter	Regression equation	Coefficient of determination
K	$y = 4E-05x^2 - 0.005x + 0.49$	0.63
pH sol	$y = 0.0001x^2 - 0.015x + 5.21$	0.61
K ₂ O	$y = 0.0206x^2 - 2.62x + 261.31$	0.60

Выявленные закономерности для тепловой области спектра и рН почвы подтверждают результаты исследований [19].

Также были подтверждены взаимосвязи между изображением в тепловой области спектра и содержанием катиона калия, которые выявили ранее на соседнем поле [25]. Но коэффициент корреляции ($K^+ = 0,63$) оказался несколько ниже, чем

ранее ($K^+ = 0,68$). Однако, не было выявлено взаимосвязей между содержанием органического вещества почвы и изображением в тепловой области спектра, установленных в исследованиях других авторов [26, 27]. Это может быть связано с тем, что варьирование содержания гумуса в образцах почв в нашем случае было гораздо меньшим, чем в случаях, рассматриваемых этими авторами.

Не было установлено взаимосвязи между изображением в тепловой области спектра и влажностью почв, хотя, согласно литературным данным, эта связь должна быть [9, 28, 29]. Ее отсутствие, вероятно, обусловлено тем, что влажность почвы внутри пахотного горизонта почвы может сильно отличаться от влажности открытой поверхности пахотных почв, которая и предопределяет характер формирования отражения почв и их изображения на данных тепловой съемки [8].

На рис. 3 и в табл. 5 показаны полиномиальные уравнения регрессии, наиболее достоверно демонстрирующие взаимосвязи между параметрами плодородия почв и изображением в тепловом диапазоне спектра.

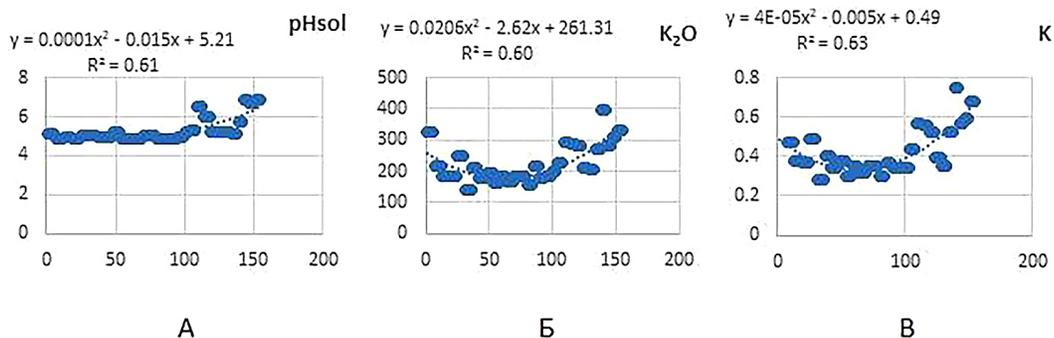


Рис. 3. Регрессионные зависимости между параметрами отражения электромагнитных волн в TIR диапазоне с pH sol (А), оксида калия (Б), обменного калия (В)

Источник: сделано авторами

Fig. 3. Regression relationships between electromagnetic wave reflections in the TIR diapason with soil contents of pH sol (A), potassium oxide (Б) and exchangeable potassium (В)

Source: made by the authors

Таблица 5

Результаты регрессионного анализа

Уравнение	Число степеней свободы	Критерий Фишера, уровень значимости 0,05		Средняя ошибка аппроксимации по результатам кросс-валидации, %
		F _{фактическое}	F _{табличное}	
Оксид калия	154	37,07428	3,90	18,01712
Калий	148	39,77087	3,92	17,97155
pH sol	154	35,076	3,90	6,622236

Results of the regression analysis

Equation	Number of degrees of freedom	Fisher's criterion, level significance 0.05		Average approximation error based on cross-validation results, %
		F _{fact}	F _{tabl}	
K ₂ O	154	37.07428	3.90	18.01712
K	148	39.77087	3.92	17.97155
pH sol	154	35.076	3.90	6.622236

Согласно регрессионному анализу, наиболее достоверными являются полиномиальные регрессии (см. табл. 5).

На рис. 3 показаны достоверные полиномиальные зависимости, имеющие наивысшие коэффициенты детерминации R².

Соответственно на основе данных тепловой съемки на исследуемой территории оказалось возможным надежно детектировать лишь содержание обменного калия, оксида калия, рН_{сол}.

Конечно же, эти зависимости справедливы лишь для изученного поля и не могут быть экстраполированы на другие поля.

Следовательно, съемка в тепловом диапазоне может применяться для картографирования некоторых параметров почвенного плодородия региона исследования. Исследования показали, что для тестового поля оказалось невозможным на основе данных тепловой съемки надежно отдетектировать все основные параметры плодородия почв поля. Но в качестве дополнительных данных к данным съемки в видимом и ближнем ИК диапазонах, подобные данные могут быть без сомнения полезными и могут повысить точность мониторинга параметров плодородия почв на основе данных дистанционного зондирования.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено:

- 1) для тестового участка из всех проанализированных параметров плодородия почв могут быть надежно детектированы лишь содержание обменного калия, оксида калия и рН почвы в пахотном горизонте почв;
- 2) полученные взаимосвязи можно использовать как основу для получения карт некоторых параметров почвенного плодородия исследуемой территории с помощью дистанционного мониторинга;
- 3) все выявленные зависимости строго привязаны к региону исследования и могут быть недостоверны для полей с отличающимся строением почвенного покрова.

Библиографический список/ References

1. Savin IY, Simakova MS. Sputnikovye tekhnologii dlya inventarizatsii i monitoringa pochv v Rossii [Satellite technologies for soil inventory and monitoring in Russia]. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2012;9(5):104–115. (In Russ.).

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.

2. Gomez C, Rossel RAV, McBratney AB. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study. *Geoderma*. 2008;146(3–4):403–411. doi: 10.1016/j.geoderma.2008.06.011

3. Khayamim F, Wetterlind J, Khademi H, Robertson J, Cano AF, Stenberg B. Using visible and near infrared spectroscopy to estimate carbonates and gypsum in soils in arid and subhumid regions of Isfahan, Iran. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. 2015;23(3):155–165. doi: 10.1255/jnirs.1157

4. Demattè JAM, Ramirez-Lopez L, Marques KP, Rodella AA. Chemometric soil analysis on the determination of specific bands for the detection of magnesium and potassium by spectroscopy. *Geoderma*. 2017;288:8–22. doi: 10.1016/j.geoderma.2016.11.013

5. Shao Y, He Y. Nitrogen, phosphorus, and potassium prediction in soils, using infrared spectroscopy. *Soil Research*. 2011;49(2):166–172. doi: 10.1071/SR10098

6. Rossel RAV, Walvoort DJJ, McBratney AB, Janik LJ, Skjemstad JO. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*. 2006;131(1–2):59–75. doi: 10.1016/j.geoderma.2005.03.007

7. Soriano-Disla JM, Janik LJ, Rossel RAV, Macdonald LM, McLaughlin MJ. The performance of visible, near-, and mid-infrared reflectance spectroscopy for prediction of soil physical, chemical, and biological properties. *Applied spectroscopy reviews*. 2014;49(2):139–186. doi: 10.1080/05704928.2013.811081

8. Savin, IY, Vindeker GV. Some specifics in using optical properties of soil surface for moisture detection. *Eurasian Soil Science*. 2021;54(7):1019–1027. (In Russ.). doi: 10.31857/S0032180X21070121

Савин И.Ю., Виндекер Г.В. Некоторые особенности использования оптических свойств поверхности почв для определения их влажности // Почвоведение. 2021. № 7. С. 806–814. doi: 10.31857/S0032180X21070121

9. Han L, Wang C, Liu Q, Wang G, Yu T, Gu X, et al. Soil moisture mapping based on multi-source fusion of optical, near-infrared, thermal infrared, and digital elevation model data via the Bayesian maximum entropy framework. *Remote Sensing*. 2020;12(23):3916. doi: 10.3390/rs12233916

10. Mira M, Valor E, Caselles V, Rubio E, Coll C, Galve JM, et al. Soil moisture effect on thermal infrared (8–13- μm) emissivity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2010;48(5):2251–2260. doi: 10.1109/TGRS.2009.2039143

11. Sanchez JM, French AN, Mira M, Hunsaker DJ, Thorp KR, Valor E, et al. Thermal infrared emissivity dependence on soil moisture in field conditions. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*. 2011;49(11):4652–4659. doi: 10.1071/SR10098

12. Ivannikov DI, Chekin VV, Melnik MS, Fedoseeva EV, Sivokon YV. Monitoring of agricultural land with using remote sensing technology. *Young Science*. 2014;1(2):52–55. (In Russ.).

Иванников Д.И., Чекин В.В., Мельник М.С., Федосеева Е.В., Сивоконь Ю.В. Мониторинг сельскохозяйственных угодий с использованием дистанционных технологий // Young Science. 2014. Т. 1. № 2. С. 52–55.

13. Liu Q, Yan C, Xiao Q, Yan G, Fang L. Separating vegetation and soil temperature using airborne multiangular remote sensing image data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2012;17:66–75. doi: 10.1016/j.jag.2011.10.003

14. Xu L, Wang Z, Hu J, Wang S, Nyongesah M. Estimation of soil salinity under various soil moisture conditions using laboratory based thermal infrared spectra. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2021;49:959–969. doi: 10.1007/s12524–020–01271–9

15. Silvero NEQ, Di Raimo LADL, Pereira GS, de Magalhães LP, da Silva Terra F, Dassan MAA, et al. Effects of water, organic matter, and iron forms in mid-IR spectra of soils: Assessments from laboratory to satellite-simulated data. *Geoderma*. 2020;375:114480. doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114480

16. Eisele A, Lau I, Hewson R, Carter D, Wheaton B, Ong C, et al. Applicability of the thermal infrared spectral region for the prediction of soil properties across semi-arid agricultural landscapes. *Remote Sensing*. 2012;4(11):3265–3286. doi:10.3390/rs4113265

17. Ivushkin K, Bartholomeus H, Bregt AK, Pulatov A, Kempen B, de Sousa L. Global mapping of soil salinity change. *Remote Sensing of Environment*. 2019;231:111260. doi: 10.1016/j.rse.2019.111260

18. Xu C, Qu J, Hao X, Zhu Z, Gutenberg L. Surface soil temperature seasonal variation estimation in a forested area using combined satellite observations and in-situ measurements. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2020;91:102156. doi: 10.1016/j.jag.2020.102156

19. Zhang Y, Shen H, Gao Q, Zhao L. Estimating soil organic carbon and pH in Jilin Province using Landsat and ancillary data. *Soil Science Society of America Journal*. 2020;84(2):556–567. doi: 10.1002/saj2.20056

20. Sorokina NP. *Struktura pochvennogo pokrova pakhotnykh zemel': tipizatsiya, kartografirovaniye, agroekologicheskaya otsenka* [Structure of soil cover of arable land: Typification, mapping, agroecological assessment]. Moscow; 2003. (In Russ.).

Сорокина Н.П. Структура почвенного покрова пахотных земель: типизация, картографирование, агроэкологическая оценка: дис. ... д-ра сельскохозяйственных наук. М., 2003. 294 с.

21. Interstate Council for Standardization, Methodology and Certification. GOST 26107–84. *Pochvy. Metody opredelenija obshhego azota* [Soils. Methods for determining total nitrogen]. Moscow; 1984. (In Russ.).

ГОСТ 26107–84. Почвы. Методы определения общего азота. М.: Изд-во стандартов, 1984. 11 с.

22. Kireev IM, Koval ZM. *Metod i sredstvo dlya ekspress-otsenki vlazhnosti pochvy* [Method and tool for rapid assessment of soil moisture]. *AgroForum*. 2019;(5):20–23. (In Russ.).

Киреев И.М., Коваль З.М. Метод и средство для экспресс-оценки влажности почвы // АгроФорум. 2019. № 5. С. 20–23.

23. Palombo A, Pascucci S, Loperte A, Lettino A, Castaldi F, Muolo MR, et al. Soil moisture retrieval by integrating TASI-600 airborne thermal data, WorldView 2 satellite data and field measurements: Petacciato case study. *Sensors*. 2019;19(7):1515. doi: 10.3390/s19071515

24. Hassan AM, Belal AA, Hassan MA, Farag FM, Mohamed ES. Potential of thermal remote sensing techniques in monitoring waterlogged area based on surface soil moisture retrieval. *Journal of African Earth Sciences*. 2019;155:64–74. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2019.04.005

25. Grubina PG, Savin IY, Prudnikova EY. The possibilities of using thermal infrared imaging data for detecting the main parameters of arable soil fertility. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2020;(105):146–172. (In Russ.). doi: 10.19047/0136–1694–2020–105–146–172

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. № 105. С. 146–172. doi: 10.19047/0136–1694–2020–105–146–172

26. Pascucci S, Casa R, Belviso C, Palombo A, Pignatti S, Castaldi F. Estimation of soil organic carbon from airborne hyperspectral thermal infrared data: a case study. *European Journal of Soil Science*. 2014;65(6):865–875. doi: 10.1111/ejss.12203

27. Eisele A, Chabrillat S, Hecker C, Hewson R, Lau IC, Rogass C, et al. Advantages using the thermal infrared (TIR) to detect and quantify semi-arid soil properties. *Remote Sensing of Environment*. 2015;163:296–311. doi: 10.1016/j.rse.2015.04.001

28. Ait Hssaine B, Chehbouni A, Er-Raki S, Khabba S, Ezzahar J, Ouaadi N, et al. On the Utility of High-Resolution Soil Moisture Data for Better Constraining Thermal-Based Energy Balance over Three Semi-Arid Agricultural Areas. *Remote Sensing*. 2021;13(4):727. doi: 10.3390/rs13040727

29. Yuan L, Li L, Zhang T, Chen L, Liu W, Hu S, et al. Modeling soil moisture from multisource data by stepwise multilinear regression: an application to the Chinese loess plateau. *ISPRS Int. J. Geo-Inf*. 2021;10(4):233. doi: 10.3390/ijgi10040233

Об авторах:

Грубина Прасковья Георгиевна — младший научный сотрудник, ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», 119017, Российская Федерация, г. Москва, Пыжевский пер. 7, стр. 2; e-mail: grubina_pg@esoil.ru
ORCID: 0000–0001–6325–4604

SPIN-код: 8805–9813

Савин Игорь Юрьевич — доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН, профессор Института экологии, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; главный научный сотрудник, ФИЦ «Почвенный институт имени В.В. Докучаева», Российская Федерация, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 7, стр. 2; e-mail: savin_iyu@esoil.ru

ORCID: 0000–0002–8739–5441

SPIN-код: 5132–0631

About authors:

Grubina Praskovya Georgievna — Junior Researcher, Dokuchaev Soil Science Institute, 7/2 Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russian Federation; e-mail: grubi-na_pg@esoil.ru

ORCID: 0000–0001–6325–4604 SPIN: 8805–9813

Savin Igor Yurievich — Doctor of Agricultural Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Institute of Ecology, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; Chief Researcher, Dokuchaev Soil Science Institute, 7/2 Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russian Federation; e-mail: savin_iyu@esoil.ru

ORCID: 0000–0002–8739–5441 SPIN: 5132–0631