



# ЗЕМЕЛЬНЫЕ ОТНОШЕНИЯ И ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО

Научная статья

УДК 631.4

doi: 10.55186/25876740\_2024\_67\_4\_364

## ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИ КОНТРАСТНЫХ СТРУКТУР ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ПАХОТНЫХ УГОДИЙ ПРИ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Д.И. Рухович<sup>1</sup>, Д.А. Шаповалов<sup>2</sup>, П.В. Королева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Россия

<sup>2</sup> Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия

**Аннотация.** Пахотные угодья могут иметь разную степень контрастности плодородия в пределах одного сельскохозяйственного поля. Одной из причин формирования высококонтрастных структур почвенного покрова (ВКСПП) является разная глубина подстилания четвертичных отложений пермскими отложениями. ВКСПП на чередовании четвертичных и пермских отложений распространены в республиках Татарстан и Башкортостан, Оренбургской, Самарской и Ульяновской областях. Развитие методов обработки больших данных дистанционного зондирования (БДДЗ) с использованием нейронных сетей (построение мультивременной линии почвы), позволяет вскрыть распространение ВКСПП на больших территориях с детальностью систем точного земледелия. Распределение различной продуктивности сельскохозяйственных культур пространственно совпадает с ВКСПП и определяется контрастными свойствами почвенного покрова. Наибольшие различия в продуктивности сельскохозяйственных культур отмечены для подсолнечника и составляют более 2,5 раз от одной зоны плодородия к другой. Кольцеобразный рисунок ВКСПП и неоднократное чередование колец позволяет повысить продуктивность территории только в рамках систем точного земледелия на основе БДДЗ.

**Ключевые слова:** структура почвенного покрова, большие данные, мультивременная линия почвы, точное земледелие

**Благодарности:** исследование выполнено в рамках государственного задания FGUR-2022-0009.

Original article

## DETECTION OF GEOLOGICALLY CONTRASTING STRUCTURES OF THE SOIL COVER OF ARABLE LAND USING NEURAL NETWORK FILTERING OF BIG REMOTE SENSING DATA

Д.И. Рухович<sup>1</sup>, Д.А. Шаповалов<sup>2</sup>, П.В. Королева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russia

<sup>2</sup> The State University of Land Use Planning, Moscow, Russia

**Abstract.** Cropland can have varying degrees of fertility contrast within the same agricultural field. One of the reasons for the formation of high-contrast soil cover structures (HCSCS) is the different depth of the underlying Quaternary sediments by Permian sediments. HCSCS on alternating Quaternary and Permian deposits are common in the republics of Tatarstan and Bashkortostan, Orenburg, Samara and Ulyanovsk regions. The development of methods for processing big remote sensing data (BRSD) using neural networks (constructing a multi-temporal soil line) makes it possible to reveal the spread of HCSCS over large areas with the detail of precision farming systems. The distribution of different crop productivity spatially coincides with the HCSCS and is determined by the contrasting properties of the soil cover. The greatest differences in the productivity of agricultural crops are noted for sunflower and amount to more than 2.5 times from one fertility zone to another. The ring-shaped pattern of the HCSCS and the repeated alternation of rings makes it possible to increase the productivity of the territory only within the framework of precision farming systems based on BRSD.

**Keywords:** soil cover structure, big data, multi-temporal soil line, precision agriculture

**Acknowledgments:** the research was carried out within the framework of state assignment FGUR-2022-0009.

**Введение.** Развитие точного земледелия с 1989 года [1] актуализирует развитие картографирования структуры почвенного покрова (СПП) и развитие учения о СПП [2]. Еще в 1895 г. В.В. Докучаев разделял географию и топографию почв, т.е. общие закономерности распространения почвенного покрова (ПП) и детальные вариации почвенных комбинаций в крупном масштабе [3]. Практическая же крупномасштабная почвенная картография сложилась десятилетиями позже. Введение терминов педон и полипедон [4] вызывало критику с точки зрения возможности картографирования ПП и практического выделения СПП [5]. Аналогичные русские термины «почвенный индивидуум» [6] и «элементарный почвенный ареал» [2] имели большую практическую и картографическую направленность, которая требовала уже не крупномасштабного почвенного и агрохимического обследования, а детального картографирования в масштабах крупнее 1 : 10 000. Обеспеченность сельскохозяйственных угодий России

почвенными картами крупных масштабов велика [7]. К середине 80-х годов прошлого века все пахотные угодья СССР были обеспечены почвенными картами масштабов 1 : 10 000 и 1 : 25 000. Но не все почвенные карты создавались с учетом выделения СПП. Более детальное почвенное картографирование носило и носит до сих пор характер съемки на ключевых участках, т.е. имеет очень небольшую площадь распространения.

Классическое крупномасштабное почвенное картографирование в СССР не имело четкой внутриполевой направленности [8], т.к. все рекомендации для сельскохозяйственного использования давались для всего сельскохозяйственного поля [9]. Термин «устойчивая внутриполевая неоднородность» (УВН) [8] или внутрипольная неоднородность [10] стал употребляться именно в связи с точным земледелием.

Существуют различные методы распознавания причин неоднородности почвенного покрова, которые можно сгруппировать по основным



принципам исследования: традиционные наземные, моделирование на основе обработки цифровых моделей рельефа и климатических данных, обработка данных дистанционного зондирования (ДДЗ). При обработке ДДЗ могут использоваться отдельные снимки, внутригодовые ряды, мультивременные (многолетние) ряды. При индикации разных почв и их пространственной неоднородности используют как вегетационные индексы (ВИ), отражающие чаще всего растительный покров, так и открытую поверхность почвы (ОПП).

Большую точность [11] и большую трудоемкость вскрытия СПП [12, 13] наземными методами отмечали с самого начала работ по точному земледелию [14]. Альтернативой всегда виделись ДДЗ в начале в виде аэрофотосъемки [12], затем спутниковых данных [15, 16] и БПЛА [17]. Вне этого ряда находятся работы по обработке больших спутниковых данных [18, 19].

Вскрыть высококонтрастные структуры почвенного покрова (ВКСПП) традиционными методами, методами моделирования и методами обработки отдельных кадров ДДЗ ранее не удавалось. ВКСПП не отображены ни на крупномасштабных почвенных картах исследуемой территории, ни в описаниях почв республики Татарстан [20]. Для картографических работ с ВКСПП потребовались новые методы картографирования УВН на больших площадях и на основе новых материалов и новых методов их обработки [19]. В обновлении почвенных карт [8] и составлении карт видов деградации почв [19] удается применить методы обработки больших данных дистанционного зондирования и нейронные сети. Критерием качества новых методов остается анализ наземных характеристик, получаемых при полевых изысканиях.

**Цели работы:** 1. Выявить специфические высококонтрастные структуры почвенного покрова и установить их влияние на продуктивность сельского хозяйства.

2. Показать высокую точность детектирования ВКСПП для применения в системах точного земледелия.

**Объект исследования.** Объект исследования находится в лесостепной зоне на границе республики Татарстан и Самарской области (рис. 1) — Бугульминско-Белебеевская возвышенность. Сумма активных температур — 2175, коэффициент увлажнения — 0,84. Исследовались пахотные угодья на черноземах типичных и выщелоченных. Полевые исследования проведены в 2021–2022 гг.

#### Методы.

1. Нейросетевая фильтрация больших данных дистанционного зондирования.
  - 1.1. Нейросетевая фильтрация сочетаний сцена ДДЗ/сельскохозяйственное поле — отбор подходящих для расчетов ВИ.
  - 1.2. Распознавание ОПП на каждой сцене ДДЗ для расчетов мультивременной линии почвы (МЛП).
2. Построение карт устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв на основе усреднения мультивременных рядов ВИ.
3. Вычисление коэффициентов МЛП и построение карт коэффициента «С» МЛП. [19]
4. Полевые почвенные изыскания на основе карт внутриполевой неоднородности и коэффициента «С». При полевых изысканиях закладывались почвенные разрезы и отбирались образцы для лабораторных измерений содержания почвенного органического вещества (ПОВ) и карбонатов. Также визуально определялась степень каменистости пахотного горизонта.
5. Замеры урожайности по зонам плодородия. Замеры велись на основе карты устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв.

**Результаты.** Карта ОПП — карта коэффициента «С» МЛП. На рис. 2 приведен фрагмент карты коэффициента «С» МЛП построенной на часть Лениногорского района республики Татарстан и Клявлинского района Самарской области. Фрагмент охватывает площадь в 3 500 га. на которой на 10 полях видны кольцеобразные структуры, чередующихся смен мультивременных спектральных яркостей ОПП. На отдельных сценах ДДЗ проследить широту распространения явления сложно (рис. 3). Важно понять, что кольцевые структуры характерные для данного региона, широко распространены и состоят из одинаковых спектральных элементов.

Более темные кольца (оттенки синего цвета) на рис. 2 представлены более гумусированными мощными выщелоченными черноземами. Более светлые (коричневые и желтые оттенки) — это черноземы карбонатные каменистые с неполным или укороченным профилем.

**Карта УВН.** На рис. 4 приведена карта УВН — карта усреднения мультивременных карт ВИ. Красным показаны зоны пониженного плодородия, желтым среднего, а зеленым повышенного. СПП на рис. 1, 4, 5 идентична. Мощные многогумусные выщелоченные черноземы с низкой отражательной способностью являются наиболее плодородными участками полей

и ВКСПП. Каменистые укороченные карбонатные черноземы имеют самое низкое плодородие. Если карта коэффициента «С» МЛП отображает чередование спектральных характеристик ОПП, то карта УВН отражает чередование участков с разной продуктивностью сельскохозяйственных угодий.

**Плодородие.** Зоны плодородия карты УВН связаны с мощностью почвенного профиля и степенью каменистости. Но эти факторы по-разному влияют на разные культуры. При неглубокой, разветвленной корневой системе мощности 30–50 см достаточно для нормальной вегетации овса, яровой пшеницы и гороха. Понижение плодородия для этих культур определяется меньшим запасом влаги в красных зонах пониженного плодородия, т.к. запас влаги формируется в глинистой и суглинистой толще. Соотношение урожайности яровой пшеницы (15,98 ц/га и 19,29 ц/га) и гороха (15,78 ц/га и 19,24 ц/га) красной зоны к зеленой составляют только четыре к пяти.

При глубокой, стержневой корневой системе подстилание плотными породами даже на глубине 1 м сильно влияет на формирование культуры. При мощностях почвенного профиля менее 50 см урожайность резко снижается. Для подсолнечника (4,41 ц/га и 12,41 ц/га) соотношение урожайности красной и зеленой зон составляет более чем, один к двум с половиной.

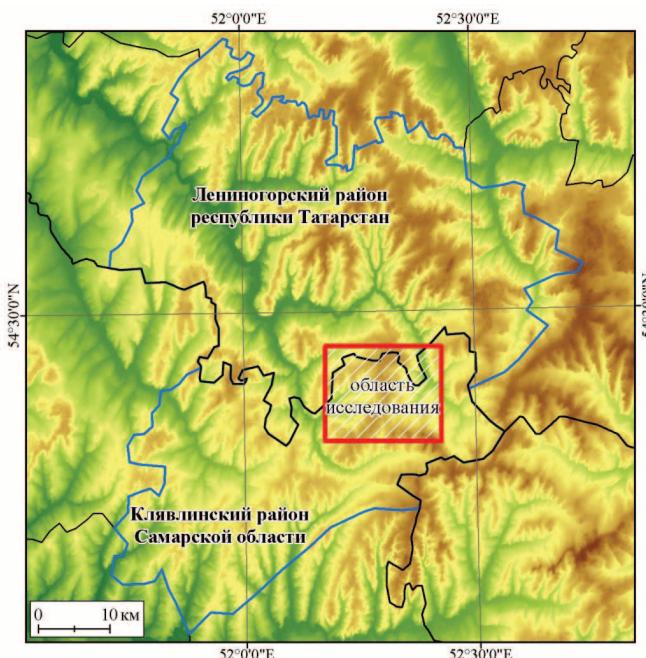


Рисунок 1. Местоположение области исследования  
Figure 1. Location of study area

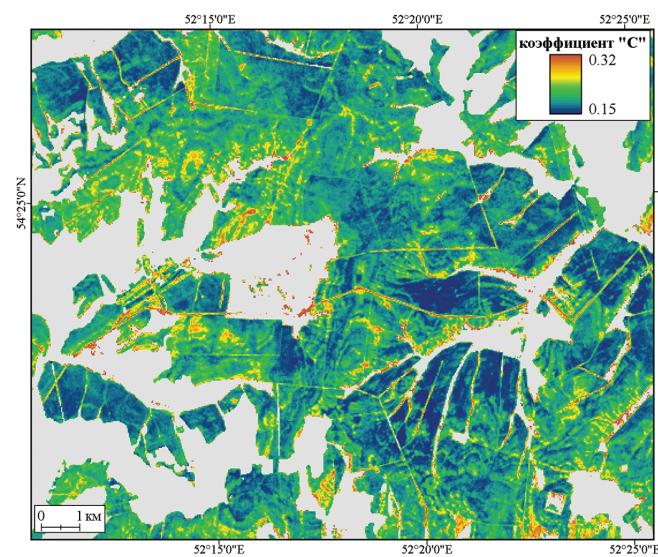


Рисунок 2. Карта коэффициента «С» мультивременной линии почвы  
Figure 2. The map of the «С» coefficient of multi-temporal soil line



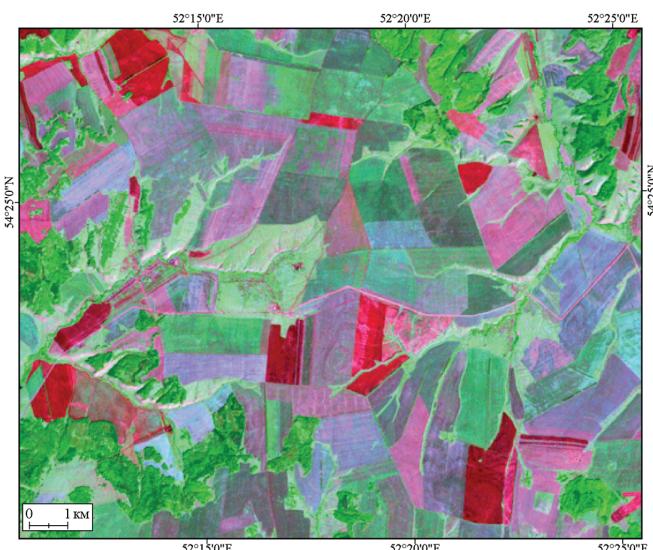


Рисунок 3. ДДЗ Landsat, 30 августа 1994 г  
Figure 3. Landsat 5 image, 30 August 1994

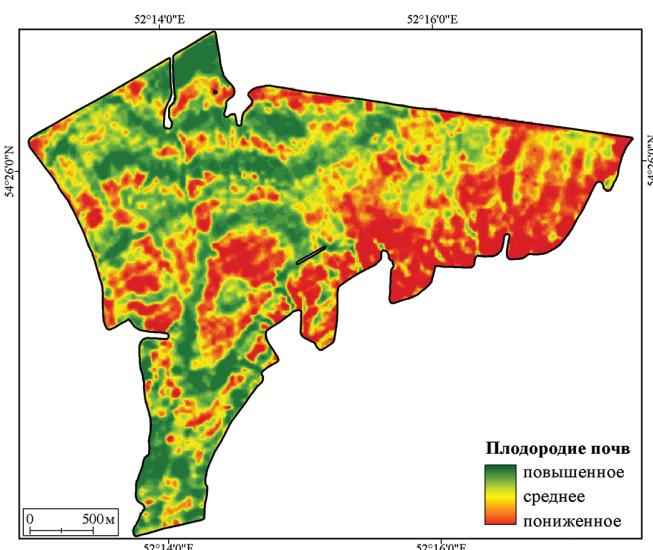


Рисунок 4. Карта устойчивой внутрипольевой неоднородности  
Figure 4. The map of stable intra-field heterogeneity of soil fertility

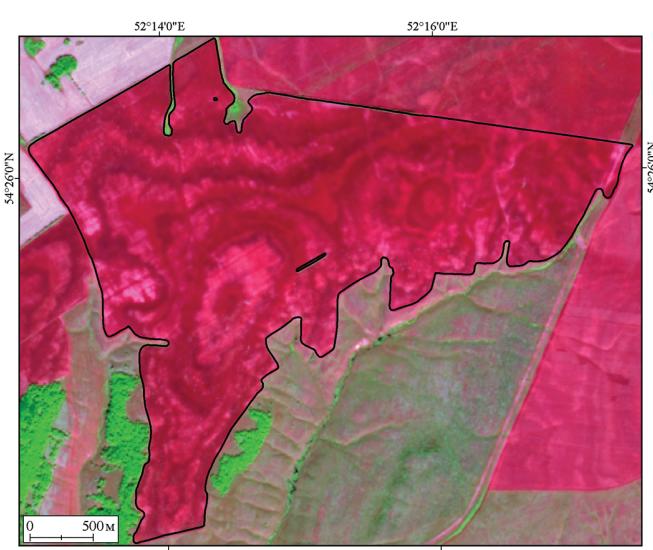


Рисунок 5. ДДЗ Sentinel 5 сентября 2020 г.  
Figure 5. Sentinel 5 image, 5 September 2020

**Обсуждение.** Термин «агатоподобные структуры» почвенного покрова. Для ВКСПП исследуемого района предлагается термин «агатоподобные структуры почвенного покрова» в связи с характерным рисунком ОПП на синтезированных псевдоцветных изображениях ДДЗ. На рисунке 5 приведен синтез каналов SWIR, NIR, GREEN. Рисунок изображения напоминает срез Тиманского агата. Как и на срезе агата чередуются кольцеобразные образования одинакового генезиса и со сходными химическими характеристиками.

**Генезис.** Чернозем выщелоченный формируется на четвертичных глинистых и суглинистых отложениях по всей территории исследования. Четвертичные отложения подстилаются слоистыми пермскими отложениями. Слои составляют плотные карбонатные образования и красноцветные рыхлые отложения. Гумусовый профиль черноземов выщелоченных не зависит от глубины подстилания пермских отложений и состоит из горизонтов А и АВ суммарной мощностью 40-50 см. Укороченность профиля происходит за счет уменьшения или отсутствия горизонтов В и С, т.е. органогенные горизонты залегают непосредственно на подстилающей породе — горизонте D.

При некоторой деградации почвенного покрова пашни, в пахотный горизонт может быть вовлечен горизонт D и выщелоченный чернозем становится каменистым и карбонатным. Выщелоченные черноземы с мощностью более 50 см. имеют низкую отражательную способность. Это обусловлено низким содержанием карбонатов, высоким содержанием гумуса и большим влагозапасом. Отражательная способность повышается с уменьшением мощности и увеличением содержания карбонатов, а затем и появлением каменистости. Максимальная яркость фиксируется при наибольшей каменистости пахотного горизонта.

**Точное земледелие.** Внесение минеральных удобрений не может повлиять на контрастность ВКСПП. Средства химизации не могут снизить негативное влияние на формирование корневой системы подстилания плотными породами или изменить мощность суглинистой толщи, удерживающей влагу. Следовательно внесение одинаковых доз удобрений в среднем по полю приводит к перерасходу удобрений в одних элементах ВКСПП (зонах низкого плодородия) и сильной недостаче элементов питания в других (зонах повышенного плодородия). Конечно это характерно если норма внесения удобрений была рассчитана исходя из валовых измерений урожая со всего поля. Т.е., если дозы удобрений должны компенсировать вынос элементов питания с урожаем.

При составлении карт заданий точного внесения удобрений (ТВУ) под каждую культуру можно рассчитать насколько понизить дозы удобрений в красных зонах без снижения урожайности. Высвободившиеся дозы удобрений можно перенести в зоны повышенного плодородия. При этом общий расход удобрений на поле остается неизменным.

При ТВУ при сохранении неизменной урожайности красной зоны, удалось изменить соотношения урожайности красной и зеленой зон. Для подсолнечника соотношение составило один к семи, а для яровой пшеницы и гороха два к трем. ТВУ позволяет более полно использовать продуктивность отдельных элементов ВКСПП, что повышает общую урожайность полей (валовые сборы).

**Заключение.** Карта высококонтрастных (агатоподобных) структур почвенного покрова является следствием достижения архивами ДДЗ состояния больших данных и развитием нейросетевых методов обработки БДДЗ. Более тысячи сцен Landsat 4, 5, 7, 8 отфильтровываются для каждого пикселя сельскохозяйственного поля. Отбираются фрагменты ДДЗ пригодные для построения ВИ или оценки спектральных характеристик открытой поверхности почвы. Отфильтрованные десятки и сотни сцен ДДЗ сворачиваются в единый показатель в виде карт устойчивой внутрипольевой неоднородности плодородия почв для ВИ или карты коэффициента «С» мультивременной линии почвы для ОПП. Обе карты позволяют картографировать распространение ВКСПП.

ВКСПП формируются на четвертичных отложениях мощностью от 0,5 до 5 м., подстилаемых плотными пермскими отложениями. Различная мощность четвертичных отложений приводит к формированию черноземов выщелоченных разной мощности и каменистости. В ВКСПП кольцеобразно чередуются через несколько десятков метров мощные выщелоченные черноземы и черноземы карбонатные укороченные каменистые. Укороченные черноземы могут иметь полный профиль органогенных горизонтов (А и АВ).

Достигнутая точность детектирования (картографирования) АСПП, позволяет создавать карты задания для систем точного земледелия. Точное земледелие в виде дифференцированного применения удобрений и семян, позволяет увеличить валовые сборы с каждого сельскохозяйственного поля без увеличения затрат на удобрения.



## Список источников

1. Kukutai A. Can Digital Farming Deliver on its Promise. 2016. URL: <http://www.agnewscenter.com/archives.cfm?news=9903>
2. Фридланц В.М. Структура почвенного покрова. М.: Мысль, 1972. 423 с.
3. Скрябина О.А. Структура почвенного покрова, методы ее изучения. Пермь: Пермская ГСХА, 2008. 151 с.
4. Johnson W.M. The pedon and polypedon // Soil Science Society of America, Proceedings. 1963. V. 27, pp. 212-215.
5. Webster, R. Fundamental objections to the 7th Approximation. // Journal of Soil Science. 1968. V. 19(2), pp. 354-366. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1968.tb01546.x
6. Козловский Ф.И. Почвенный инвидуум и методы его определения. Закономерности пространственного варьирования свойств почв и информационно-статистические методы их изучения. М.: Наука, 1970. С. 42-59.
7. Симакова М.С. Почвенные карты. Картографическая изученность России (топографические и тематические карты): РАН; Институт географии. Москва, 1999. С. 113-133.
8. Kulyanitsa A.L., Rukhovich D.I., Koroleva P.V., Vilchevskaya E.V., Kalinina N.V. Analysis of the informativity of big satellite precision-farming data processing for correcting large-scale soil maps. Eurasian Soil Science. 2020. V. 53(12), pp. 1709-1725. DOI: 10.1134/S1064229320110083.
9. Кириюшин В.И. Управление плодородием почв и продуктивностью агроценозов в адаптивно-ландшафтных системах земпределия // Почвоведение. 2019. № 9, С. 1130-1139. DOI: 10.1134/S0032180X19070062
10. Белоусов А.А., Белоусова Е.Н. Влияние внутривильной неоднородности почвенного плодородия на выбор элементов методики полевого опыта // Вестник КрасГАУ. 2013. № 6(81), С. 55-62.
11. Wollenhaupt N.C., Wolkowski R.P. Grid soil sampling // Better Crops. 1994. V. 78(4), pp. 6-9.
12. Yang C., Anderson G.L. Airborne Videography to Identify Spatial Plant Growth Variability for Grain Sorghum // Precision Agriculture 1, 67-79 (1999). <http://doi.org/10.1023/A:1009917617316>
13. Hong S.Y., Sudduth K.A., Kitchen N.R., Drummond S.T., Palm H.L., Wiebold W.J. Estimating within-field variation in soil properties from airborne hyperspectral images // Pecora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS 2002 Conference Proceeding. 2002. <http://www.isprs.org/commission1/proceedings02/paper/00025.pdf>
14. Robert P.C. (1982). Evaluation of some remote sensing techniques for soil and crop management. Ph.D. Dissertation, University of Minnesota, St. Paul, MN.
15. Ziliani M.G., Altaf M.U., Aragon B., Houborg R., Franz T.E., Lu Y., Sheffield J., Hoteit I., McCabe M.F. Intra-field crop yield variability by assimilating CubeSat LAI in the APSIM crop model. // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2022. XLIII-B3-2022, pp. 1045-1052. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2022-1045-2022
16. Samsonova V.P., Meshalkina J.L., Blagoveschensky Y.N., Yaroslavtsev A.M., Stoorvogel J.J. The role of positional errors while interpolating soil organic carbon contents using satellite imagery. // Precision Agric. 2018. 19, pp. 1085-1099. DOI: 10.1007/s11119-018-9575-4
17. Bento N.L., Silva Ferraz G.A., Santana L.S., de Oliveira Faria R., da Silva Amorim J., de Lourdes Oliveira e Silva M., Silva M.M. A., Alonso D.J. C. Soil compaction mapping by plant height and spectral responses of coffee in multispectral images obtained by remotely piloted aircraft system. // Precision Agric. 2024. 25, pp. 729-750. DOI: 10.1007/s11119-023-10090-0
18. Liu P., Di L., Du Q., Wang L. Remote Sensing Big Data: Theory, Methods and Applications. // Remote Sensing. 2018. V. 10(5), 711. DOI: 10.3390/rs10050711
19. Rukhovich D.I., Koroleva P.V., Rukhovich D.D., Rukhovich A.D., Recognition of the bare soil using deep machine learning methods to create maps of arable soil degradation based on the analysis of multi-temporal remote sensing data. // Remote Sensing. 2022. V. 14(9), 2224. DOI: 10.3390/rs14092224.
20. Номенклатура и таксономия основных типов почв Республики Татарстан / Сост. А.А. Шинкарев, А.В. Гусаров, К.Г. Гинятуллин, Л.В. Мельников, М.К. Латыпов. Казань: Издательство Казанского государственного университета. 2008. 32 с.
21. References
1. Kukutai, A. (2016). Can Digital Farming Deliver on its Promise. Available at: <http://www.agnewscenter.com/archives.cfm?news=9903> (accessed 06 June 2024)

## Информация об авторах:

**Рухович Дмитрий Иосифович**, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией почвенной информатики, ведущий научный сотрудник, Почвенный институт им. В.В.Докучаева, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8002-0698>, [landmap@yandex.ru](mailto:landmap@yandex.ru)

**Шаповалов Дмитрий Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры высшей математики, физики и информатики, Государственный университет по землеустройству, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8268-911X>, [shapoval\\_ecology@mail.ru](mailto:shapoval_ecology@mail.ru)

**Королева Полина Владимировна**, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник лаборатории почвенной информатики, Почвенный институт им. В.В.Докучаева, ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-0689-4621>, [soilmap@yandex.ru](mailto:soilmap@yandex.ru)

## Information about the authors:

**Dmitry I. Rukhovich**, candidate of biological sciences, head of the laboratory of soil informatics, leading researcher, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8002-0698>, [landmap@yandex.ru](mailto:landmap@yandex.ru)

**Dmitry A. Shapovalov**, doctor of technical sciences, professor, department of higher mathematics, physics and computer science, State University of Land Use Planning, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8268-911X>, [shapoval\\_ecology@mail.ru](mailto:shapoval_ecology@mail.ru)

**Polina V. Koroleva**, candidate of agricultural sciences, researcher at the soil informatics laboratory, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-0689-4621>, [soilmap@yandex.ru](mailto:soilmap@yandex.ru)

 [shapoval\\_ecology@mail.ru](mailto:shapoval_ecology@mail.ru)

