



## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ГУМУСА В ПОЧВАХ НА ОСНОВЕ БПЛА-СЪЁМКИ

© 2023 А. Н. Чащин , Н. М. Мудрых , И. А. Самофалова 

ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ, ул. Петропавловская, 23, г. Пермь, 614990, Россия. E-mail: [chascshin@mail.ru](mailto:chascshin@mail.ru), [nata020880@hotmail.com](mailto:nata020880@hotmail.com), [samofalovairaida@mail.ru](mailto:samofalovairaida@mail.ru)

**Цель исследования.** Оценить возможности пространственного моделирования содержания гумуса в почвах по показателям цифровой модели рельефа на основе БПЛА-съёмки с использованием геостатистического и регрессионного методов.

**Место и время проведения.** Ключевой участок расположен на учебно-научном опытном поле ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ (56°34-37' с. ш. и 57°92-93' в. д.) в Среднем Предуралье (Пермский муниципальный район Пермского края), южно-таёжная зона Среднерусской провинции. Отбор почвенных образцов провели буром из слоя 0–20 см в мае 2023 г.

**Методы.** Данные съёмки получили с помощью БПЛА – DJI mini 2 с высоты 50 м. Ортофотоплан и цифровую модель высот ключевого участка выполнили в программе Drone Deploy. Объектом исследования послужил почвенный покров ключевого участка, представленный дерново-подзолистыми почвами. Содержание гумуса в почвенных образцах определили методом дихроматного окисления. Обработку данных с БПЛА выполнили в системе QGIS 3.22 и программе SAGA 9. Пространственное моделирование провели геостатистическим методом «Обычный Кригинг», инструментом Geostatistical Analyst геоинформационной системы ArcGIS 10.8.

**Основные результаты.** Содержание гумуса в слое 0–20 см почв варьировало от 0,9 до 3,0%, при этом совокупность значений соответствовала нормальному распределению; это позволило не проводить трансформацию данных по методу нормальных меток. U-образная форма свидетельствует о выраженном направлении тренда с севера на юг и с запада на восток. Корреляционный анализ показал зависимость содержания гумуса в почвах от морфометрических показателей, коэффициенты корреляции варьировали от -0,48 до 0,75. Построено регрессионное уравнение прогноза содержания гумуса в почвах с показателями, имеющими максимальные значения коэффициента корреляции: высота (ELEV), расстояние до водотоков (Channel Network Distance) и относительное положение склонов (Relative Slope Position); коэффициент корреляции составил, соответственно, 0,75, 0,75 и 0,66. Данное уравнение моделирует содержание гумуса в пространстве с относительной разницей с Кригинг-интерполяцией -0,6-1,1%.

**Заключение.** Использование высоко детальных БПЛА-снимков для установления влияния геоморфологических условий на свойства почв позволяет не только определить их пространственное распределение, установить взаимосвязь с высотными отметками, расстоянием до водотоков, но и смоделировать изменение свойств в результате антропогенного вмешательства, являющегося фактором усиления водной эрозии.

**Ключевые слова:** БПЛА; дерново-подзолистые почвы; гумус; морфометрические показатели; рельеф; пространственная изменчивость.

**Цитирование:** Чащин А.Н., Мудрых Н.М., Самофалова И.А. Пространственное моделирование содержания гумуса в почвах на основе БПЛА-съёмки // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 3. e226. DOI: [10.31251/pos.v6i3.226](https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.226).

### ВВЕДЕНИЕ

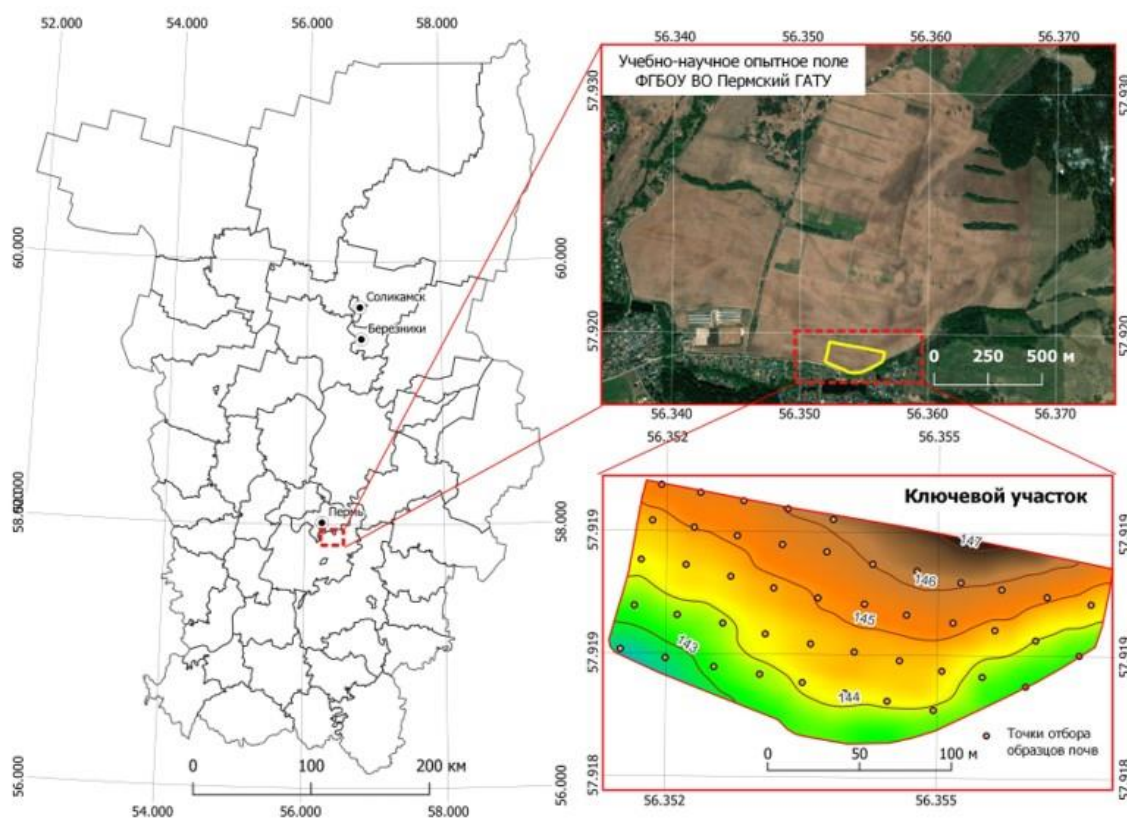
Одним из значимых показателей почвенного плодородия является содержание гумуса, а в сложных геоморфологических условиях Пермского Прикамья, имеющего высокий эрозионный потенциал, данный показатель может сильно варьировать в пределах одного поля. Возможности оценки пространственного распределения гумуса в почвах в зависимости от рельефа на основе цифрового моделирования были установлены рядом исследователей (Гопп и др., 2017, 2023; Чинилин и др., 2018; Мудрых, Самофалова, 2019; Ларькин и др., 2023; Gopp et al., 2019; Buryak, 2023); показано, что рельеф является ведущим фактором внутрипольной неоднородности гумусного состояния почв. В качестве стационаров по исследованию распределения гумуса, могут быть опытные поля с выраженным рельефом даже имеющие небольшую площадь. В данном случае они представляют ключевой участок, а при изучении неоднородности почвенных свойств в пределах

ключевого участка должна быть проведена съёмка рельефа местности (Скрябина, 2007). В современных условиях наиболее доступным инструментом получения цифровой модели рельефа опытного поля (ключевого участка) являются **беспилотные авиационные системы (БАС)** (Чашин и др., 2021; Кузнецова и др., 2023; Турк, Карачёв, 2023); информация, полученная с них, открывают новые возможности исследований почвенного покрова (Савин и др., 2015). Стоимость приобретения беспилотного летательного аппарата невысока по сравнению с регулярным проведением топографической съёмки на различных ключевых участках. На основе полученных в видимом диапазоне электромагнитного спектра снимков, методами фотограмметрии создаётся цифровая модель поверхности, которая при условии отсутствия каких-либо высотных объектов на поле является цифровой моделью рельефа. В 2023 году основным условием проведения нашего исследования было успешное получение разрешения на выполнение авиационных работ.

Цель исследования – оценить возможности пространственного моделирования содержания гумуса по показателям цифровой модели рельефа на основе БПЛА-съёмки с использованием геостатистического и регрессионного методов.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования послужил почвенный покров ключевого участка, расположенного на территории учебно-научного опытного поля ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ в Пермском муниципальном районе Пермского края (рис. 1). Преобладающие почвы ключевого участка – дерново-подзолистые (Классификация ..., 1977) или Retisols по классификации IUSS Working Group WRB (2014).



**Рисунок 1.** Местоположение ключевого участка.

Площадь ключевого участка равна 2,62 га. В качестве исходных материалов использованы данные съёмки с БПЛА коптерного типа. Модель БПЛА – DJI mini 2 (учётный номер РОСАВИАЦИИ 0u66296). Дата проведения съёмки 22.06.2023 г. Съёмка выполнялась с высоты 50 м. Для проведения съёмки было получено разрешение Единой системы организации воздушного движения (ЕС ОрВД). Номер режима ВР 5442. Запрос временного режима осуществлялся через систему «Небосвод» (Модели кригинга, 2023). Средняя высота растительного покрова (многолетние травы) поля в день съёмки составляла 10 см, что не оказывает влияние на уровень погрешности при создании модели высот. Полученный ортофотоплан имеет пространственное

разрешение 0,2 см на пиксель. Результат наложения ортофотоплана (0,2 см на пиксель) на высокодетальный космический снимок покрытия ESRI World Imagery (31 см на пиксель) и границы векторизованного ключевого участка (опытного поля) представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Слой ортофотоплана на подложке снимка ESRI World Imagery.

Создание ортофотоплана и цифровой модели высот (пространственное разрешение ортофотоплана – 0,0265 м, модели высот – 0,265 м) по снимкам с БПЛА выполнялось в программе Drone Deploy (веб-приложение по обработке данных с БПЛА). Дальнейшая обработка данных с БПЛА проведена в геоинформационной системе QGIS 3.22 и программе SAGA 9 (Conrad et al., 2015) и включала в себя: преобразование исходных данных в систему координат проекции для Пермского края WGS 84/UTM zone 40N; векторизация границ ключевого участка по ортофотоплану; расчёт морфометрических показателей рельефа, расчёт корреляции растров морфометрических показателей рельефа и содержания гумуса в почве.

Исследования по содержанию гумуса в почвах включали: отбор проб в 45 точках (рис. 1) буром из слоя 0–20 см, лабораторное определение методом дихроматного окисления (метод Тюрин, ГОСТ 26213-84) и пространственное моделирование геостатистическим методом «Обычный Кригинг», инструментом Geostatistical Analyst в геоинформационной системе ArcGIS 10.8 (ArcGIS Geostatistical..., 2023). Для регрессионного подхода к моделированию содержания гумуса в почвах использовали выборку на основе корреляции растров, которая составила 26 123 шт.

Таким образом, при комплексном моделировании распределения гумуса в пространстве с учетом дистанционных данных БПЛА был использован набор программных инструментов как открытых (QGIS, SAGA), так и коммерческих, в том числе применение ArcGIS, что обусловлено возможностями модуля Geostatistical Analyst по исследованию входных данных о содержании гумуса в почвах и подбору оптимальных параметров вариограммы.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате лабораторного исследования содержания гумуса в почвах был сформирован точечный слой, состоящий из 45 объектов, который явился основой создания растра распределения и должен быть геостатистически исследован для правильного применения метода интерполяции «Обычный Кригинг» (Модели кригинга, 2023). В таблице 1 приведены показатели описательной статистики содержания гумуса в почвах.

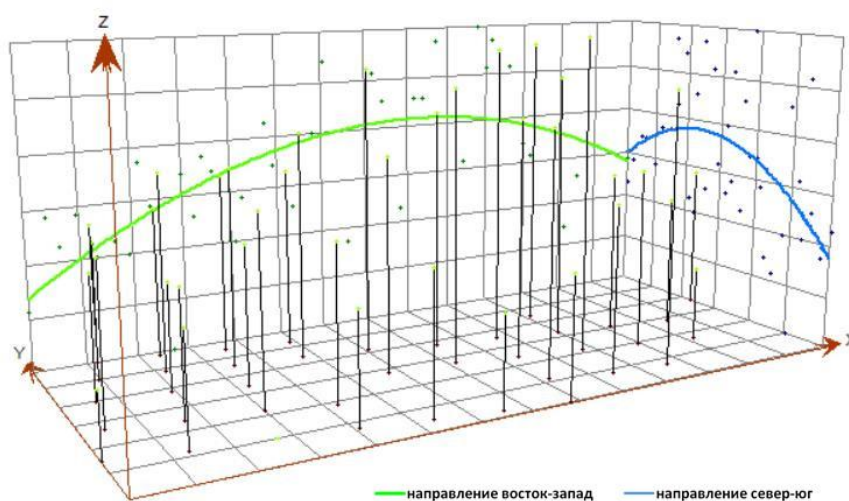
Таблица 1

Описательная статистика содержания гумуса в почвенных образцах (n=45)

Значения показателей, %				Стандартное отклонение, %	Эксцесс	Асимметрия
минимальное	максимальное	среднее	медиана			
0,9	3	2,1	2,0	0,48	2,56	0,12

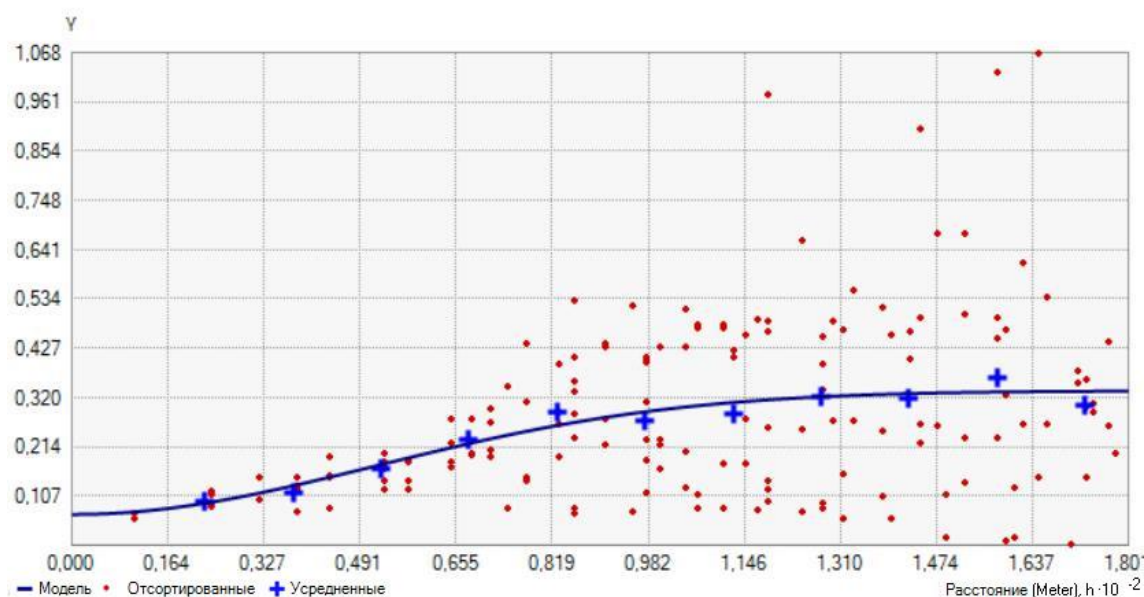
Совокупность значений имеет слабовыраженную правостороннюю асимметрию. Средняя и медиана в выборке близки между собой, поэтому полученные данные о процентном содержании гумуса соответствуют нормальному распределению и не требуется трансформация по методу нормальных меток.

Для корректной геостатистической интерполяции данных, требуется оценить наличие в выборке глобальных трендов. Из рисунка 3 видно, что полученные данные имеют выраженный тренд в направлении север-юг (синяя кривая) и запад-восток (зелёная кривая). Об этом свидетельствует их U-образная форма.



**Рисунок 3.** Тренд пространственного распределения содержания гумуса в почвенных образцах: ось X – направление по долготе; ось Y – направление по широте; ось Z – содержание гумуса, %.

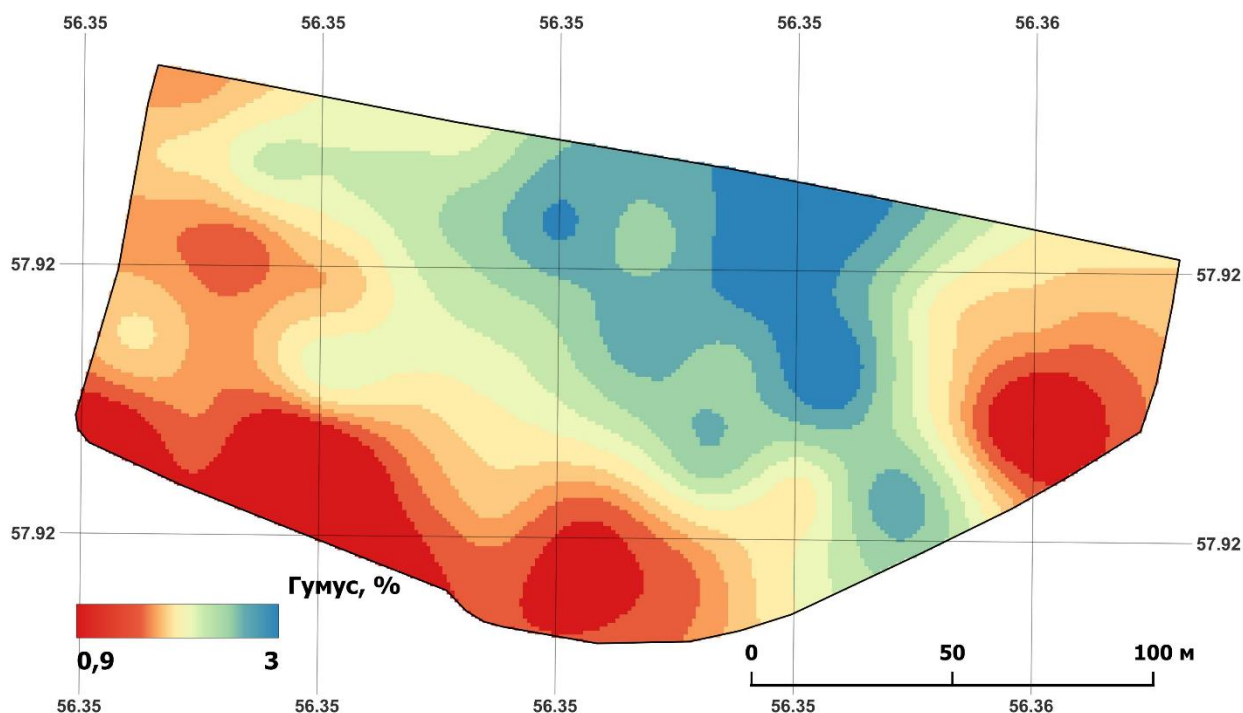
Пространственная взаимосвязь процентного содержания гумуса в почвах от удалённости точек отбора была описана при помощи севивариограммы.



**Рисунок 4.** Вариограмма содержания гумуса в почвах: ось X – расстояние между местоположением точек проб отбора, м; ось Y – квадрат разности значений содержания гумуса.

Содержание гумуса в почвах имеет зависимость разности значений от квадрата расстояния точек отбора проб, следовательно, данные имеют пространственную автокорреляцию. При этом для более корректной геостатистической интерполяции, модель вариограммы должна быть оптимизирована – оптимальная вариограмма была рассчитана функцией «Оптимизация вариограммы» инструмента Geostatistical Analyst.

Таким образом, в результате исследования совокупности данных по содержанию гумуса в почвах, были подобраны оптимальные параметры создания геостатистического растра по методу «Обычный Кригинг», который представлен на рисунке 5.



**Рисунок 5.** Карта пространственного распределения содержания гумуса в слое 0–20 см почв ключевого участка (пространственное разрешение 1 м).

Качественная оценка модели распределения гумуса в почвах была выполнена методом перекрёстной проверки (табл. 2). Метод представляет собой расчёт усреднённой разности и среднеквадратической ошибки при пошаговом изъятии из выборки по одной точке и определения разницы на основе повторной интерполяции (Мыслова, 2017).

**Таблица 2**

Результаты перекрёстной проверки модели содержания гумуса в почвах

Метод интерполяции	ME*	RMSE**
ordinary kriging	0,006	0,035

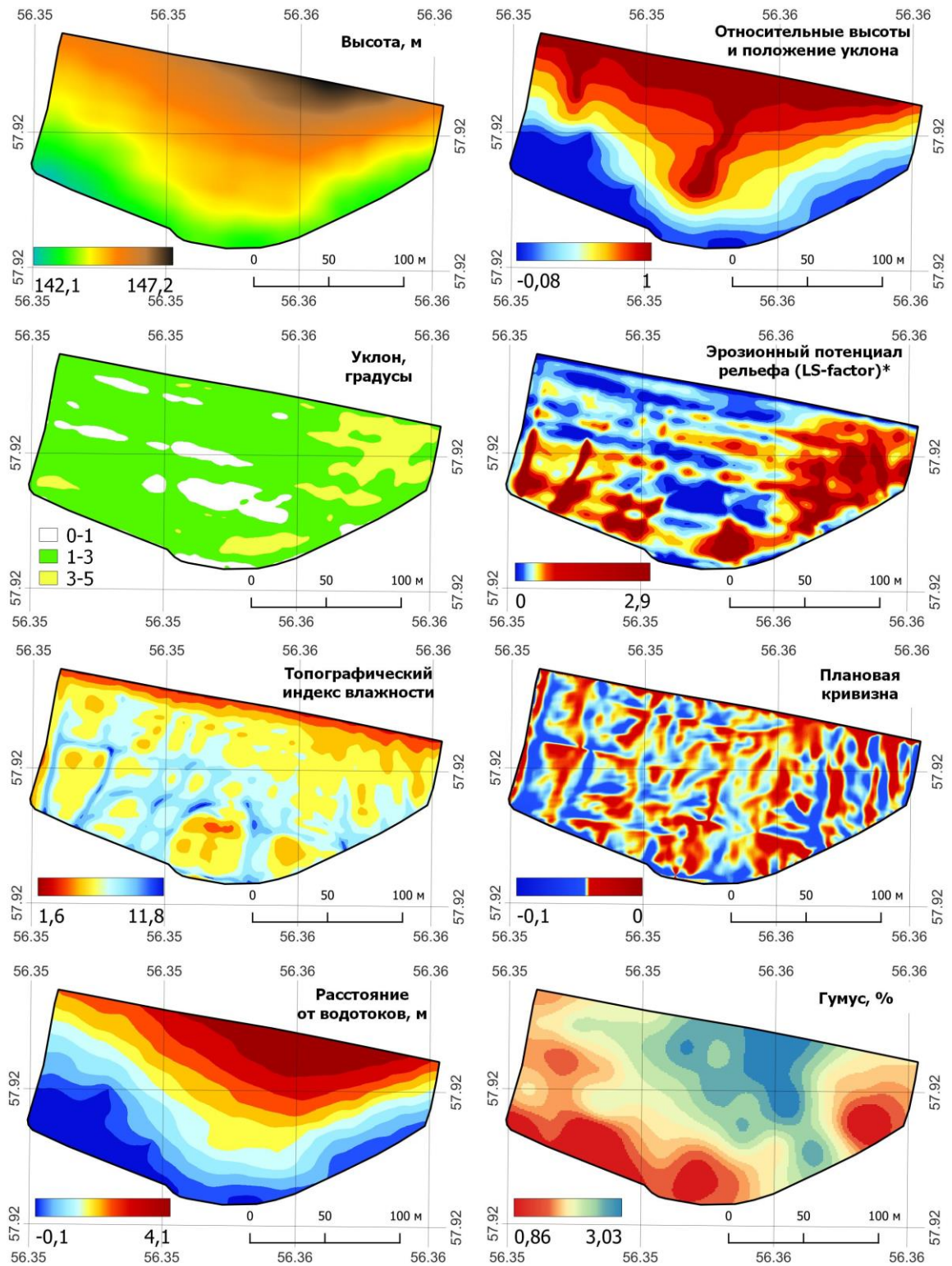
Примечание.

\* – значения усреднённой разности между измеренным и интерполированным значением, %;

\*\* – среднеквадратичная ошибка, указывающая, насколько близко модель прогнозирует измеренные значения, %.

Перекрёстная проверка показала, что усреднённая разность между измерениями и интерполяцией составила 0,006%.

В результате цифрового моделирования рельефа методом фотограмметрической обработки изображения с БПЛА был создан растр высот (пространственное разрешение 0,265 м). На его основе при помощи инструмента программы SAGA «Basic Terrain Analysis» были рассчитаны морфометрические показатели рельефа, часть из которых представлена на рисунке 6.



**Рисунок 6.** Карты морфометрических показателей рельефа по данным цифровой модели рельефа (пространственное разрешение 0,265 м) и содержания гумуса в почвах.

Примечание. \*При расчете «LS-factor» учитывалась крутизна склона и площадь водосборного бассейна (Conrad et al., 2015).

На возвышенных участках поля содержание гумуса выше, чем в понижениях; прослеживается влияние эрозионного потенциала рельефа (LS-фактор, расстояние от водотоков) на уменьшение содержания гумуса в почвах (см. рис. 6). Увлажнённость территории и плановая кривизна не имеют визуальных соотношений с распределением гумуса.

Для анализа взаимосвязи пространственного изменения содержания гумуса в почвах по рельефу были рассчитаны коэффициенты корреляции растров инструментом Scatterplot программы SAGA. Полученные коэффициенты корреляции приведены в таблице 3.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции Пирсона между содержанием гумуса в почвах и морфометрическими показателями рельефа

ELEV <sup>1</sup>	Relative Slope Position <sup>2</sup>	Channel Network Distance <sup>3</sup>	Valley Depth <sup>4</sup>	Slope <sup>5</sup>	LS-factor <sup>6</sup>	TWI <sup>7</sup>	Plan Curvature <sup>8</sup>
0,75	0,66	0,75	-0,48	0,14	0,28	0,17	0,14

Примечание.

1 – высота, м; 2 – относительное положение склонов; 3 – расстояние до водотоков, м; 4 – глубина долины; 5 – уклон; 6 – эрозионный потенциал рельефа; 7 – топографический индекс влажности; 8 – плановая кривизна.

Из таблицы 3 видно, что высота и расстояние до водотоков оказывают сильное влияние на пространственное распределение гумуса – была установлена тесная корреляционная зависимость. Средняя корреляция установлена между содержанием гумуса в почвах и относительным положением склонов (Relative slope position), а также, но в меньшей степени, обратная связь ( $r = -0,48$ ) с показателем, характеризующим пересечённость рельефа – относительной высотой склонов над прилегающими долинами (Valley Depth). Вероятность переувлажнения (TWI) и плоскостной эрозии не имеют выраженного влияния на содержание гумуса в почвах, что обусловлено небольшими уклонами ключевого участка.

Таким образом, наибольшая зависимость содержания гумуса в почвах от высоты, расстояния до водотоков и относительного положения склонов была использована для регрессионной модели. В результате регрессионного анализа коэффициент  $R^2$  оказался равен 0,58, величина стандартной ошибки составила 0,28. Полученное уравнение регрессии имеет вид:

$$\text{Гумус, \%} = -20,39 + 0,15 \times \text{ELEV} + 0,26 \times \text{CND} - 0,28 \times \text{RSP},$$

где ELEV – высота, м; CND – Channel Network Distance; RSP – Relative Slope Position

Исходя из полученного уравнения видно, что физическими механизмами накопления (потери) гумуса тестового участка являются факторы эрозионного потенциала. На возвышенных (переменная ELEV) и удалённых от ложбин элементах мезорельефа (переменные CND и RSP) содержание гумуса сохраняется, а с понижением отметок высот и сокращением расстояния до водотоков, наблюдаемых на склоне, процент гумуса в результате водной эрозии дерново-подзолистой почвы уменьшается. На основе данного уравнения при помощи калькулятора растров получена модель распределения гумуса в пространстве (рис. 7).

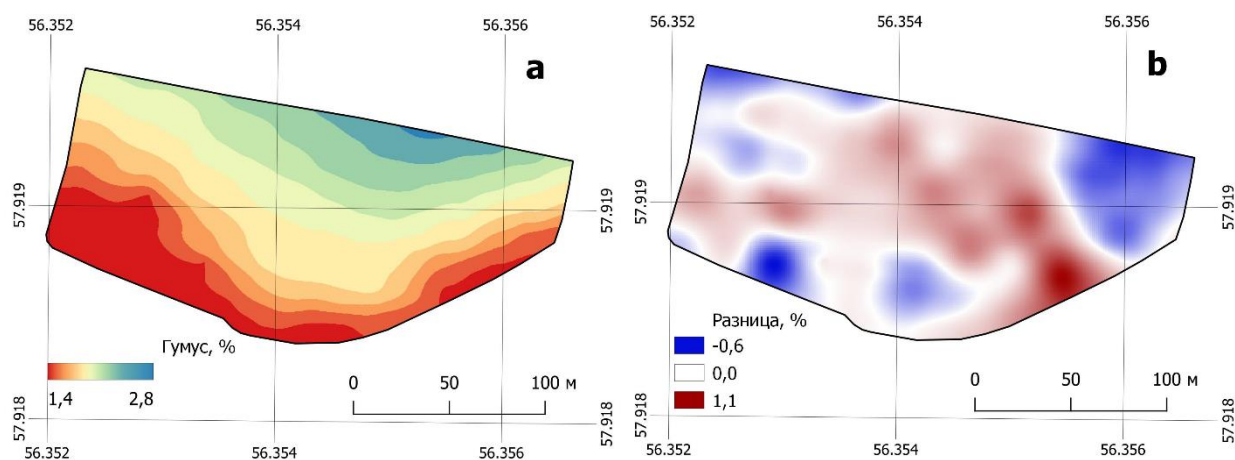


Рисунок 7. Пространственное отображение результатов моделирования содержания гумуса в дерново-подзолистых почвах: а – смоделированная поверхность содержания гумуса; б – относительная разница с Кригинг-интерполяцией.

При регрессионном моделировании происходит сужение диапазона значений примерно на 0,4% от минимума и максимума в сравнении с методом «Обычного кригинга». По показателю площади в большей степени наблюдается разница в положительную сторону, особенно на возвышенности.

Следует отметить, что основной проблемой применения индивидуальных средств дистанционного зондирования (БАС) в исследованиях почвенного покрова на сегодняшний день являются существующие ограничения по получению разрешения на полет. В ряде регионов России режим базовой готовности (запрет на полёты БПЛА) не позволяет осуществлять полёты в исследовательских целях, а при работе по государственной теме НИР в рамках научной или образовательной организации требуется сертификат эксплуатанта.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых исследований установлена тесная связь содержания гумуса в почвах с высотными отметками, расстоянием до водотоков и относительным положением склонов.

Основной ценностью снимков опытного поля, полученных при помощи квадрокоптера, является возможность их дальнейшего геоинформационного анализа. Детальность снимков полностью соответствует масштабу ключевых участков. Цифровое моделирование рельефа на основе высокодетальных БПЛА-снимков позволяет установить влияние геоморфологических условий на содержание гумуса в почвах и смоделировать его пространственное распределение для конкретных условий съёмки, в частности, для территорий с выраженным эрозийным потенциалом.

#### ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 1023051000003-9-4.1.1).

#### ЛИТЕРАТУРА

ГОСТ 26213-84. Почвы. Определение гумуса по методу Тюрина в модификации ЦИНАО. Москва: Издательство стандартов, 1989.

Гопп Н.В., Мешалкина Ю.Л., Нарыкова А.Н., Плотникова А.С., Чернова О.В. Картографирование содержания и запасов органического углерода почв на региональном и локальном уровнях: анализ современных методических подходов // Вопросы лесной науки. 2023. Т. 6. № 1. С. 14–73. DOI: <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202361-120>.

Гопп Н.В., Нечаева Т.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В., Смирнов В.В. Методы геоморфометрии и цифрового картографирования для оценки пространственной изменчивости свойств агросерой почвы склона // Почвоведение. 2017. № 1. С. 24–34. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X17010087>.

Классификация и диагностика почв СССР / Составители: В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова, Н.Н. Розова, В.А. Носин, Т.А. Фриев. Москва: Колос, 1977. 224.

Кузнецова А.С., Ерунова М.Г., Якубайлик О.Э. Технологии создания банка геопространственных данных опытно-производственных хозяйств ФИЦ КНЦ СО РАН // Современные проблемы и перспективы развития агрохимии, земледелия и смежных наук о плодородии почв и продуктивности полевых культур в Сибири. IX Сибирские Прянишниковские агрохимические чтения: материалы международной научно-производственной конференции с международным участием (Красноярск, 20-22 июля 2022 г.) / Г.П. Гамзиков, Н.А. Сурин (общ. ред.). Красноярск: ФИЦ КНЦ СО РАН, 2023. С. 239–244.

Ларькин М.А., Губарев Д.И., Несветаев М.Ю., Вайгант А.А. Варьирование и динамика почвенных свойств чернозема обыкновенного Саратовской области // Аграрный научный журнал. 2023. № 10. С. 47–53. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i10pp47-53>.

Модели кригинга / справка ArcGIS for Desktop [Электронный ресурс]. URL: <http://desktop.arcgis.com>. (дата обращения 14.10.2023).

Мудрых Н.М., Самофалова И.А. Моделирование пространственной изменчивости агрохимических показателей почв в агроландшафтах Нечерноземья // Агрохимический вестник. 2019. № 5. С. 17–24. DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2516-2019-10069>.

Мыслова Т.Н., Куцаева О.А., Подлесный А.А. Сравнение эффективности методов интерполяции на основе ГИС для оценки пространственного распределения гумуса в почве // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 4. С. 146–152.



Савин И.Ю., Вернюк Ю.И., Фараслис И. Возможности использования беспилотных летательных аппаратов для оперативного мониторинга продуктивности почв // Бюллетень почвенного института имени В.В. Докучаева. 2015. № 80. С. 95–105. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2015-80-95-105>.

Скрябина О.А. Структура почвенного покрова, методы ее изучения. Пермь: ПГСХА, 2007. 206 с.

Турк Г.Г., Карачёв Н.К. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в геодезии // Вектор ГеоНаук. 2023. Т. 6. № 2. С. 56–60. DOI: [10.24412/2619-0761-2023-2-56-60](https://doi.org/10.24412/2619-0761-2023-2-56-60)

Чащин А.Н., Самофалова И.А., Мудрых Н.М. Использование морфометрических показателей рельефа для почвенного картографирования пашни в условиях средней тайги в северной части Пермского края // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2021. Т. 27. № 4. С. 162–174. DOI: [10.35595/2414-9179-2021-4-27-162-174](https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-4-27-162-174).

Чинилин, А.В. Наумов В.Д. Михальцов В.С. Цифровое картографирование свойств почв методом регрессионного кригинга на примере лесной опытной дачи РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2018. Вып. 4. С. 20–31. DOI: [10.26897/0021-342X-2018-4-20-31](https://doi.org/10.26897/0021-342X-2018-4-20-31).

ArcGIS Geostatistical Analysis / Data+ [Электронный ресурс]. URL: <https://www.esri-cis.com/ru-ru/arcgis/products/geostatistical-analyst/overview>. (дата обращения 06.12.2023).

Buryak Z.A., Ukrainsky P.A., Gusarov A.V., Lukin S.V., Beylich A.A. Geomorphic factors influencing the spatial distribution of eroded Chernozems in automated digital soil erosion mapping // Geomorphology. 2023. Vol. 439. 108863. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108863>.

Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böchner J. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4 // Geoscientific Model Development. 2015. Vol. 8. No. 7. P. 1991–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>.

Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. Effect of Slope Mesorelief on the Spatial Variability of Soil Properties and Vegetation Index Based on Remote Sensing Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2019. Vol. 55. No. 9. P. 1329–1337. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0001433819090202>.

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014, update 2015. 181 p.

Поступила в редакцию 09.11.2023

Принята 04.12.2023

Опубликована 08.12.2023

#### Сведения об авторах:

**Чащин Алексей Николаевич** – кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры агрохимии и почвоведения ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ (г. Пермь, Россия); [chascshin@mail.ru](mailto:chascshin@mail.ru)

**Мудрых Наталья Михайловна** – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры агрохимии и почвоведения ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ (г. Пермь, Россия); [nata020880@hotmail.com](mailto:nata020880@hotmail.com)

**Самофалова Ираида Алексеевна** – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры агрохимии и почвоведения ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ (г. Пермь, Россия); [samofalovairaida@mail.ru](mailto:samofalovairaida@mail.ru)

*Автор(ы) прочитал(и) и одобрил(и) окончательный вариант рукописи.*



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

## SPATIAL MODELING OF HUMUS CONTENT WITH THE DRONE-BASED MEASUREMENTS

© 2023 A. N. Chashchin , N. M. Mudrykh , I. A. Samofalova 

Perm State Agro-Technological University, Petropavlovskaya 23, Perm, Russia. E-mail: [chascshin@mail.ru](mailto:chascshin@mail.ru), [nata020880@hotmail.com](mailto:nata020880@hotmail.com), [samofalovairaida@mail.ru](mailto:samofalovairaida@mail.ru)

*The aim of the study was to assess the potential of spatial modeling of soil humus content through measurements with unmanned aerial vehicle (UAV), using digital relief model combined with geostatistical and regression methods.*

**Location and time of the study.** The study area was in the Middle Urals (Perm municipal district of the Perm region) in the southern taiga zone of the Central Russian province. The key area of the surveyed territory is located on the educational and scientific experimental field of the Perm State Agro-Technological University (56°34-37'N and 57°92-93'E). Soil samples were taken with a drill from a depth of 0–20 cm in May 2023.

**Methods.** The survey data was obtained using the drone DJI mini 2 UAVS from a height of 50 m. The orthophotoplan and digital elevation model of the key site were made using the Drone Deploy software. The object of research was the soil cover of the site, represented by sod-podzolic soils. The soil humus content was determined using potassium digestion method. The UAV data processing was performed using the QGIS 3.22 system and SAGA 9 software. Spatial modeling was carried out using the geostatistical method “Ordinary Kriging” employing the Geostatistical Analyst tool of the ArcGIS 10.8 geographic information system.

**Results.** Humus content in the 0-20 cm soil layer varied from 0.9 to 3.0%, following normal distribution, thus allowing using the normal labels method without data transformation. The U-shape indicated a strong trend direction from north to south and from west to east. The correlation analysis showed the association of humus content with the morphometric parameters, the correlation coefficient ranging from -0.48 to 0.75. A regression equation was constructed for predicting soil humus content by using the parameters with the maximal correlation coefficients such as height (ELEV), distance to watercourses (Channel Network Distance) and relative position of the slopes (Relative Slope Position), having the correlation coefficients of 0.75, 0.75 and 0.66, respectively. This equation was found to model spatial humus with a relative divergence from Kriging interpolation of -0.6...-1.1%.

**Conclusions.** The use of highly detailed UAV images to establish the influence of geomorphological conditions on soil properties allows not only to determine their spatial distribution, establish relationships with surface elevations, distance to watercourses, but also to simulate property changes in properties due to anthropogenic intervention, which, among other things, can enhance water erosion.

**Key words:** UAV; geographic information systems; sod-podzolic soils; humus; morphometric indicators; relief; spatial variability.

**How to cite:** Chashchin A.N., Mudrykh N.M., Samofalova I.A. Spatial modelling of soil humus content using the drone-based measurements // *The Journal of Soils and Environment*. 2023. 6(3). e226. DOI: [10.31251/pos.v6i3.226](https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.226).

## FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 1023051000003-9-4.1.1).

## REFERENCES

- GOST 26213-84. Soils. Determination of humus by the Tyurin method modified by CINAQ. Moscow: Standards Publishing House, 1989. (in Russian).
- Gopp N.V., Meshalkina J.L., Narykova A.N., Plotnikova A.S., Chernova O.V. Mapping of soil organic carbon content and stock at the regional and local levels: the analysis of modern methodological approaches. *Forest Science Issues*. 2023. Vol. 6. No. 1. P. 14–73. DOI: <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202361-120>. (in Russian).
- Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. The methods of geomorphometry and digital soil mapping for assessing spatial variability in the properties of agrogray soils on a slope. *Eurasian Soil Science*. 2017. Vol. 50. No. 1. P. 20–29. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229317010082>.
- Classification and diagnostics of soils of the USSR / Compiled by: V.V. Egorov, V.M. Friedland, E.N. Ivanova, N.N. Rozova, V.A. Nosin, T.A. Frieв. Moscow: Kolos Publ., 1977. 224 p. (in Russian).
- Kuznetsova A. S., Erunova M. G., Yakubailik O. E. Technologies for creating a bank of geospatial data for pilot production farms FRC KSC SB RAS. In book: *Modern problems and prospects for the development of agrochemistry, agriculture and related sciences on soil fertility and productivity of field crops in Siberia. IX Siberian Pryanishnikov agrochemical readings: materials of the international scientific and industrial conference with international participation (Krasnoyarsk, 20–22 July 2022)*. G.P. Gamzikov, N.A. Surin (ed.). Krasnoyarsk: FRC KSC SB RAS, 2023. P. 239–244. (in Russian).
- Larkin M.A., Gubarev D.I., Nesvetayev M.Yu., Vaigant A.A. Variation and dynamics of soil properties of ordinary chernozem in the Saratov region. *Agrarian Scientific Journal*. 2023. No. 10. P. 47–53. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i10pp47-53>. (in Russian).
- Kriging models / reference ArcGIS for Desktop [Electronic resource]. URL: <http://desktop.arcgis.com>. (accessed on 14.10.2023).

- Mudrykh N.M., Samofalova I.A. Simulation of spatial variability of agrochemical indicators of soils in agricultural fertilizers of the Non-chernozem region. *Agrochemical Herald*. 2019. No. 5. P. 17–24. DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2516-2019-10069>. (in Russian).
- Myslyva T.N., Kutsaeva O.A., Podlesnyi A.A. Comparison of efficiency of interpolation methods on the basis of GIS for the estimation of spatial distribution of humus in the soil. *Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy*. 2017. No. 4. P. 146–152.
- Savin I. Yu., Vernyuk Yu. I., Faraslis G. The possible use of pilotless aircrafts for operative monitoring of soil productivity. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2015. No. 80. P. 95–105. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2015-80-95-105>. (in Russian).
- Skryabina O.A. Soil cover structure, methods of studying it. Perm: PSAA, 2007. 206 p. (in Russian).
- Turk G.G., Karachev N.K. Use of unmanned aerial vehicles (UAVS) in geodesy. *Vector of Geosciences*. 2023. Vol. 6. No. 2. P. 56–60. DOI: [10.24412/2619-0761-2023-2-56-60](https://doi.org/10.24412/2619-0761-2023-2-56-60). (in Russian).
- Chashchin A.N., Samofalova I.A., Mudrykh N.M. The use of morphometric indicators of the relief for soil mapping of around plants in the conditions of the middle taiga in the northern part of the Perm region. *InterCarto. InterGIS*. 2021. Vol. 27. No. 4. P. 162–174. DOI: [10.35595/2414-9179-2021-4-27-162-174](https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-4-27-162-174). (in Russian).
- Chinilin A.V., Naumov V.D., Mikhaltsov V.S. Digital mapping of soil properties by using regression kriging: the case of the forest experimental district of Russian Timiryazev State Agrarian University. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2018. No. 4. P. 20–31. DOI: [10.26897/0021-342X-2018-4-20-31](https://doi.org/10.26897/0021-342X-2018-4-20-31). (in Russian).
- ArcGIS Geostatistical Analys / Data+ [Electronic resource]. URL: <https://www.esri-cis.com/ru-ru/arcgis/products/geostatistical-analyst/overview>. (accessed on 06.12.2023).
- Buryak Z.A., Ukrainsky P.A., Gusarov A.V., Lukin S.V., Beylich A.A. Geomorphic factors influencing the spatial distribution of eroded Chernozems in automated digital soil erosion mapping. *Geomorphology*. 2023. Vol. 439. 108863. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108863>.
- Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*. 2015. Vol. 8. No. 7. P. 1991–2007. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>.
- Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. Effect of Slope Mesorelief on the Spatial Variability of Soil Properties and Vegetation Index Based on Remote Sensing Data. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. Vol. 55. No. 9. P. 1329–1337. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0001433819090202>.
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014, update 2015. 181 p.

*Received 09 November 2023*

*Accepted 04 December 2023*

*Published 08 December 2023*

**About the authors:**

**Chashchin Aleksey Nikolaevich** – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Agrochemistry and Soil Science in the Perm State Agro-Technological University (Perm, Russia); [chascshin@mail.ru](mailto:chascshin@mail.ru)

**Mudrykh Natalya Mikhailovna** – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Agrochemistry and Soil Science in the Perm State Agro-Technological University (Perm, Russia); [nata020880@hotmail.com](mailto:nata020880@hotmail.com)

**Samofalova Iraida Alekseevna** – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Agrochemistry and Soil Science in the Perm State Agro-Technological University (Perm, Russia); [samofalovairaida@mail.ru](mailto:samofalovairaida@mail.ru)

*The authors read and approved the final manuscript*



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)