

УДК: 631.48

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-2-30-181-191

Н. М. Мудрых¹, И. А. Самофалова², А. Н. Чашин³

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭРОЗИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОЧВЫ ПО ДАННЫМ БПЛА НА СОДЕРЖАНИЕ ГУМУСА В УСЛОВИЯХ ОПЫТНОГО ПОЛЯ

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена изучению возможностей цифрового моделирования рельефа на основе данных БПЛА-съемки при анализе пространственного распределения гумуса в условиях опытного поля. Использовали масштаб картографических моделей 1: 2 000. В качестве объекта исследований выбран ключевой участок площадью 2,62 га, расположенный в границах учебно-научного опытного поля Пермского государственного аграрно-технологического университета на территории Пермского муниципального округа Пермского края. Цель исследования — провести оценку пространственного распределения гумуса по БПЛА-данным на основе показателей эрозионного потенциала почвы. Почвенный покров обследуемого участка представлен дерново-подзолистыми почвами тяжелого гранулометрического состава. Для получения цифровой модели рельефа методами фотограмметрии проведена БПЛА-съемка при помощи квадрокоптера DJI mini 2. Фотограмметрическая обработка снимков выполнялась в веб-приложении Drone Deploy. Пространственное распределение содержания гумуса в почвах ключевого участка определяли по 45 точкам. Почвенные пробы отбирали с глубины пахотного слоя (0–20 см) и проанализировали в лаборатории кафедры агрохимии и почвоведения Пермского ГАТУ по ГОСТ 26213-84 с колориметрическим окончанием. На территории исследуемого опытного участка содержание гумуса имеет выраженную пространственную автокорреляцию. Карта содержания гумуса построена методом обычного кригинга. При визуальном сравнении результатов цифрового моделирования рельефа с картой пространственного распределения гумуса на ключевом участке четко прослеживается зависимость возрастания содержания органического вещества со значениями высоты местности, а также с расстоянием до тальвегов (зоны выноса). Для установления влияния рельефа на содержание гумуса в почвах в программе SAGA проведена корреляция растров, которая показала тесную связь содержания гумуса с расстоянием до тальвегов и высотой местности ($r = 0,75$). Показатели, характеризующие увлажненность и кривизну поверхности на варьирование содержания гумуса в пространстве влияют незначительно.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровое моделирование, рельеф, БПЛА, гумус, почвы

¹ ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова», ул. Петропавловская, д. 23, Пермь, Россия, 614990, e-mail: nata020880@hotmail.com

² ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова», ул. Петропавловская, д. 23, Пермь, Россия, 614990, e-mail: samofalovairaida@mail.ru

³ ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова», ул. Петропавловская, д. 23, Пермь, Россия, 614990, e-mail: chascshin@mail.ru

Natalya M. Mudrykh¹, Iraida A. Samofalova², Aleksey N. Chashchin³

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF SOIL EROSION POTENTIAL INDICATORS ACCORDING TO UAV DATA ON HUMUS CONTENT UNDER EXPERIMENTAL FIELD CONDITIONS

ABSTRACT

The article is devoted to studying the possibilities of digital relief modeling based on UAV survey data when analyzing the spatial distribution of humus in the conditions of an experimental field. The scale of cartographic models was 1: 2 000. A key site with an area of 2.62 ha, located within the boundaries of the educational and scientific experimental field of the Perm State Agricultural and Technological University on the territory of the Perm Municipal District of the Perm Territory, was selected as the object of research. The purpose of the study is to assess the spatial distribution of humus using UAV data based on indicators of soil erosion potential. The soil cover of the surveyed area is represented by soddy-podzolic soils of heavy granulometric composition. To obtain a digital terrain model using photogrammetry methods, UAV photography was carried out using a DJI mini 2 quadcopter. Photogrammetric image processing was performed in the Drone Deploy web application. The spatial distribution of humus content in the soils of the key area was determined at 45 points. Soil samples were taken from the depth of the arable layer (0–20 cm) and analyzed in the laboratory of the Department of Agrochemistry and Soil Science of the Perm State Agricultural and Technological University according to GOST 26213-84 with colorimetric finishing. On the territory of the experimental site under study, the humus content has a pronounced spatial autocorrelation. The map of humus content was constructed using the ordinary kriging method. When visually comparing the results of digital relief modeling with a map of the spatial distribution of humus in a key area, the dependence of the increase in the content of organic matter with the values of the elevation of the area, as well as with the distance to the thalwegs (removal zone), is clearly visible. To establish the influence of relief on the humus content in soils, a raster correlation was carried out in the SAGA program, which showed a close relationship between the humus content and the distance to the thalweg and the elevation of the area ($r = 0.75$). Indicators characterizing moisture content and surface curvature have little effect on the variation of humus content in space.

KEYWORDS: digital modeling, relief, UAV, humus, soil

ВВЕДЕНИЕ

Рельеф оказывает сильное влияние на свойства почв и важнейшие показатели плодородия, в т. ч. и гумус почвы [Гонн, 2017; Чинилин, 2018; Ларькин, 2023; Вуруак, 2023]. Для зонального ряда почв определяющим фактором может являться эрозия, формирующая зоны выноса и аккумуляции органического вещества [Шухов и др., 2020]. Изучение факторов внутривольной неоднородности пространственного распределения гумуса может осуществляться в условиях ключевых участков, имеющих небольшую площадь и являющихся стационарами. Необходимым условием для анализа пространственного распределения свойств почв по ключевому участку является наличие высокодетальных

¹ FSBEI HE “Perm State Agro-Technological University named after academician D. N. Pryanishnikov”, 23, Petropavlovskaya str., Perm, 614990, Russia, e-mail: nata020880@hotmail.com

² FSBEI HE “Perm State Agro-Technological University named after academician D. N. Pryanishnikov”, 23, Petropavlovskaya str., Perm, 614990, Russia, e-mail: samofalovairaida@mail.ru

³ FSBEI HE “Perm State Agro-Technological University named after academician D. N. Pryanishnikov”, 23, Petropavlovskaya str., Perm, 614990, Russia, e-mail: chascshin@mail.ru

данных о рельефе [Скрябина, 2007]. На сегодняшний день кроме геодезических методов получения высокоточной поверхности рельефа существуют дистанционные методы, основанные на применении беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [Кузнецова, 2023; Турк, 2023]. При этом используются относительно недорогие модели, справляющиеся с задачами в масштабах небольших по площади полей, характерных для территории Пермского края [Самофалова, 2017; Чащин, 2022]. Использование современного программного обеспечения фотограмметрической обработки снимков с БПЛА позволяет создавать не только высокоточные ортофотопланы полей, но и цифровые модели рельефа, которые являются основой для вычисления показателей эрозионного потенциала пахотных полей [Каиштанов, 2018].

В связи с этим определена цель исследования — провести оценку пространственного распределения гумуса по БПЛА-данным на основе показателей эрозионного потенциала почвы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследований выбран ключевой участок площадью 2,62 га, расположенный в границах УНОП Пермского государственного аграрно-технологического университета на территории Пермского района Пермского края (рис. 1). Масштаб исследований равен 1: 2 000.

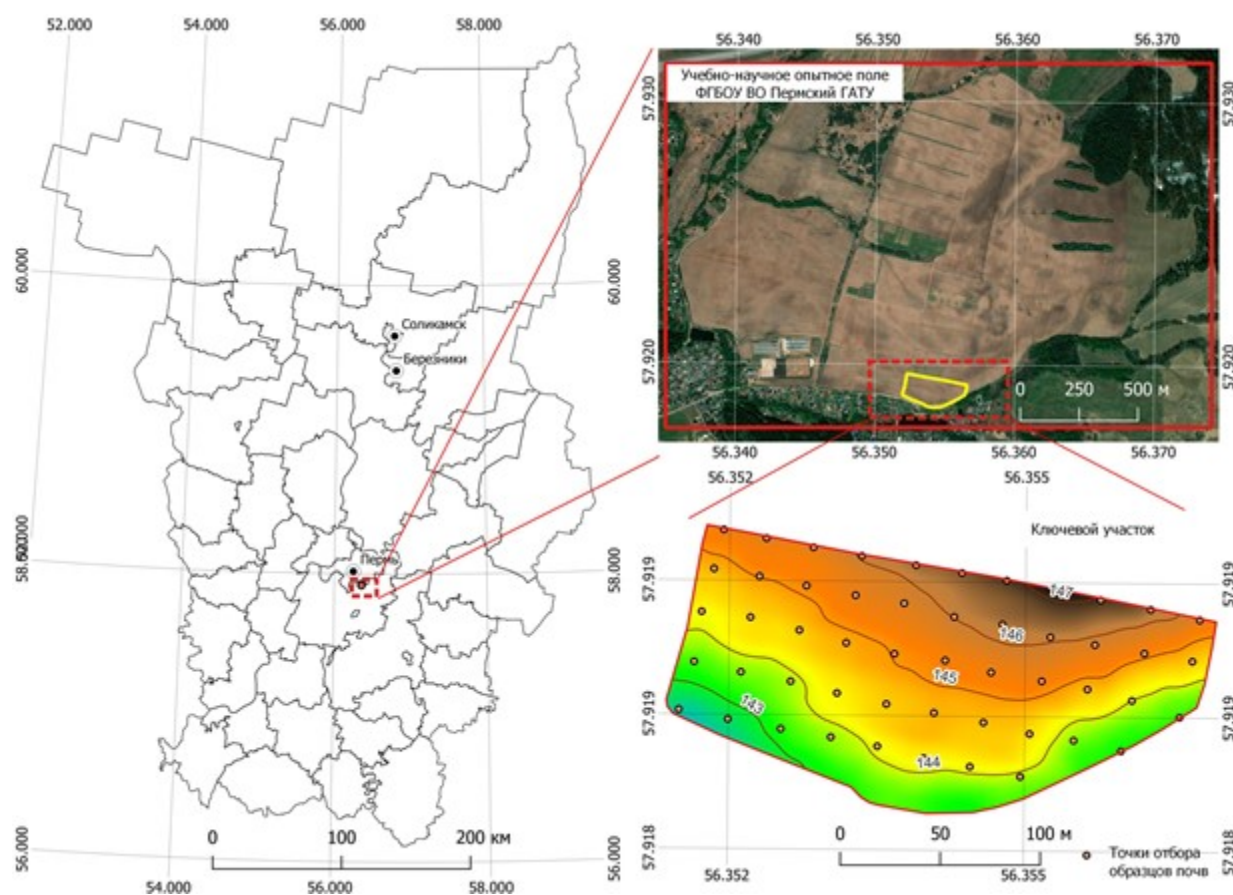


Рис. 1. Местоположение ключевого участка на территории Пермского края
 Fig. 1. Location of the key site in the Perm Region

Почвенный покров обследуемого участка представлен дерново-подзолистыми почвами тяжелого гранулометрического состава. Для получения цифровой модели рельефа методами фотограмметрии проведена БПЛА-съемка территории ключевого участка. В исследовании использована модель БПЛА DJI mini 2. Съемка проводилась 22 июня 2023 г. с высоты 50 м. В связи с тем, что территория учебно-научного опытного поля расположена в диспетчерской зоне международного аэропорта, для проведения авиационных работ с БПЛА за 6 дней до даты съемки у Единой системы организации воздушного движения (ЕС ОрВД) был запрошен временной режим (ВР) через систему «Небосвод»¹. Выданному ВР был присвоен номер 5442. Полученные в результате съемки материалы содержат 239 снимков, отснятых в надир. Их объединение осуществлялось средствами фотограмметрической обработки веб-приложения Drone Deploy. Созданный в данном приложении ортофотоплан с пространственным разрешением 2 см представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Слой ортофотоплана на подложке снимка ESRI World Imagery
Fig. 2. Orthomosaic layer on the background of an ESRI World Imagery image

Получение данных о содержании гумуса ключевого участка выполнялось по 45 точкам, показанным на рис. 1. Почвенные пробы отбирали с глубины пахотного слоя (0–20 см) и проанализированы в лаборатории кафедры агрохимии и почвоведения ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ по методу ГОСТ 26213-84².

Обработку пространственных данных выполняли в QGIS 3.34 (подготовка картографической основы отбора индивидуальных почвенных проб, визуализация, оформление карт), SAGA GIS 9.2 (цифровое моделирование рельефа, корреляция растровых слоев) и ArcGIS 10.8, модуль Geostatistical Analyst (математико-картографическое моделирование пространственного распределения гумуса в почве).

¹ Система «Небосвод». Электронный ресурс: <https://skyarc.ru/> (дата обращения 17.09.2024)

² ГОСТ 26213-84. Почвы. Определение гумуса по методу Тюрина в модификации ЦИНАО. СПС «Консультант Плюс»

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам лабораторных исследований было установлено, что содержание гумуса варьируется в пределах ключевого участка от 0,9 до 3,0 %. На территории опытного поля гумус имеет выраженную пространственную автокорреляцию, о чем свидетельствует график, представленный на рис. 3.

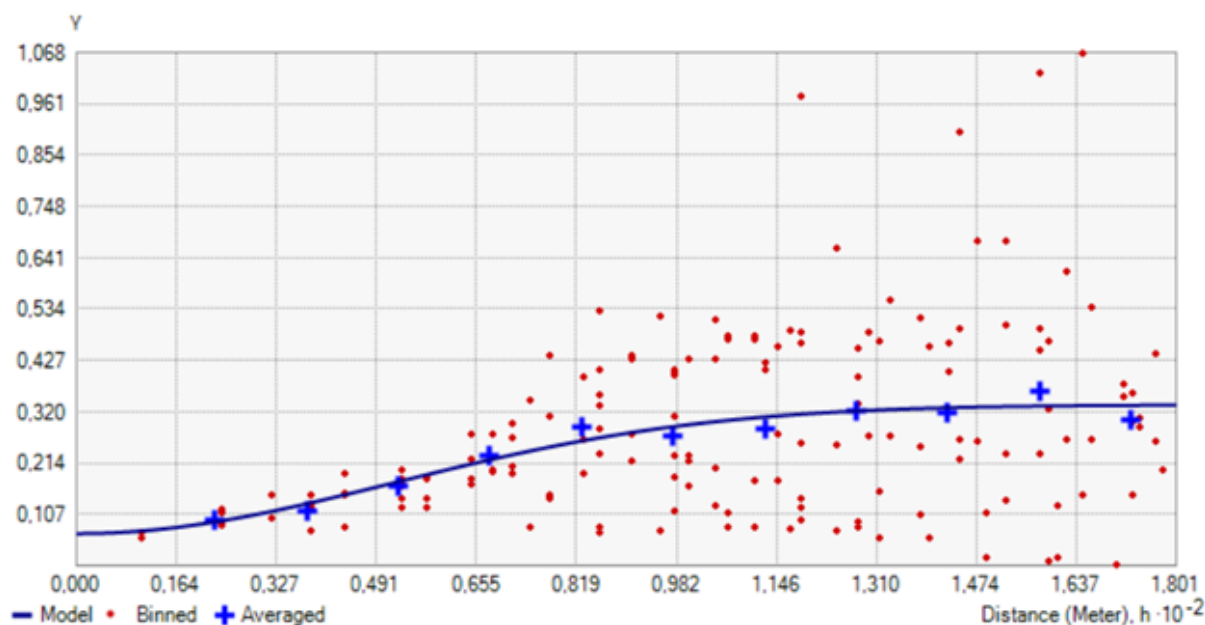


Рис. 3. Вариограмма содержания гумуса в почве ключевого участка
 Fig. 3. Variogram of humus content in the soil of a key area

На основе полученных данных была построена геостатистическая поверхность методом «обычный кригинг» (рис. 4). Содержание гумуса заметно убывает с севера к юго-западу ключевого участка, что обусловлено изменением поверхности рельефа.

Для анализа влияния рельефа полученный растр высот с пространственным разрешением 1 м был дополнительно обработан инструментами SAGA GIS. Обработка матрицы высот включала создание гидрологически корректной ЦМР (заполнение локальных понижений методом Fill Sinks (Wang & Liu) с минимальным уклоном равным 0,01) и применение фильтра LowPassFilter для пердискретизации приемлемого для анализа разрешения, равного 2 м. Затем на основе подготовленной ЦМР инструментом «Basic Terrain Analysis» были вычислены морфометрические показатели рельефа (рис. 5). Высота в пределах ключевого участка имеет перепад около 5 м, закономерно снижаясь с северо-восточной части поля к южной/юго-западной. Аналогично происходит и изменение относительных высот, и положение уклона. Уклон поверхности поля усиливается от 1° до 3–5° с запада на восток. Эрозионный потенциал закономерно изменяется, увеличиваясь с севера на юг поля (с учетом высоты местности) и с запада на восток (с учетом нарастания уклона поверхности). В пределах поля также закономерно изменяется еще и такой морфометрический показатель рельефа, как топографический индекс влажности: с севера на юг опытного участка. Расстояние от тальвегов изменяется аналогично с изменением показателя высоты местности. Преобладающей экспозицией является южная и западная, что способствует усилению эрозионных процессов.

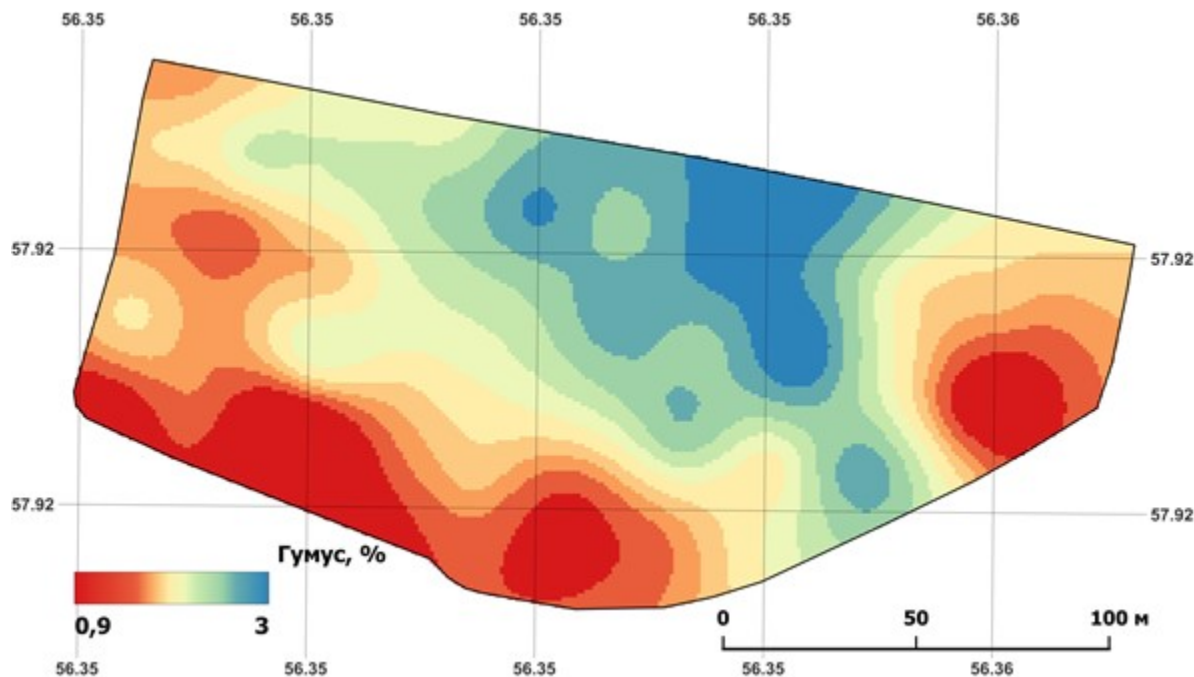


Рис. 4. Геоestatистическая поверхность содержания гумуса ключевого участка
Fig. 4. Geostatistical surface of humus content of a key area

При визуальном сравнении результатов цифрового моделирования рельефа с картой пространственного распределения содержания гумуса на ключевом участке четко прослеживается зависимость возрастания его содержания с высотными отметками, а также расстоянием до тальвегов. Исходя из этого, качественная оценка взаимосвязи проведена по корреляции между растром распределения содержания гумуса и растрами цифровой модели рельефа. Вычислена корреляция растровых слоев, представляющая связь значений ячеек с одного слоя растра со значениями ячеек на другом слое растра.

Графики корреляции растров представлены на рис. 6, где видно, что сильная прямая зависимость наблюдается между содержанием гумуса и значениями высоты, а также расстоянием до тальвегов.

Средняя корреляция установлена между содержанием гумуса и относительным положением склонов. Об этом свидетельствуют коэффициенты парной корреляции Пирсона, представленные в табл. 1.

Табл. 1. Коэффициенты корреляции растров гумуса и морфометрических показателей рельефа
Table 1. Correlation coefficients of humus rasters and morphometric relief indicators

Высота, м	0,75
Относительное положение склонов	0,66
Расстояние до водотоков	0,75
Глубина долины	-0,48
Уклон	0,14
LS-factor	0,28
Топографический индекс влажности	0,17
Плановая кривизна	0,14

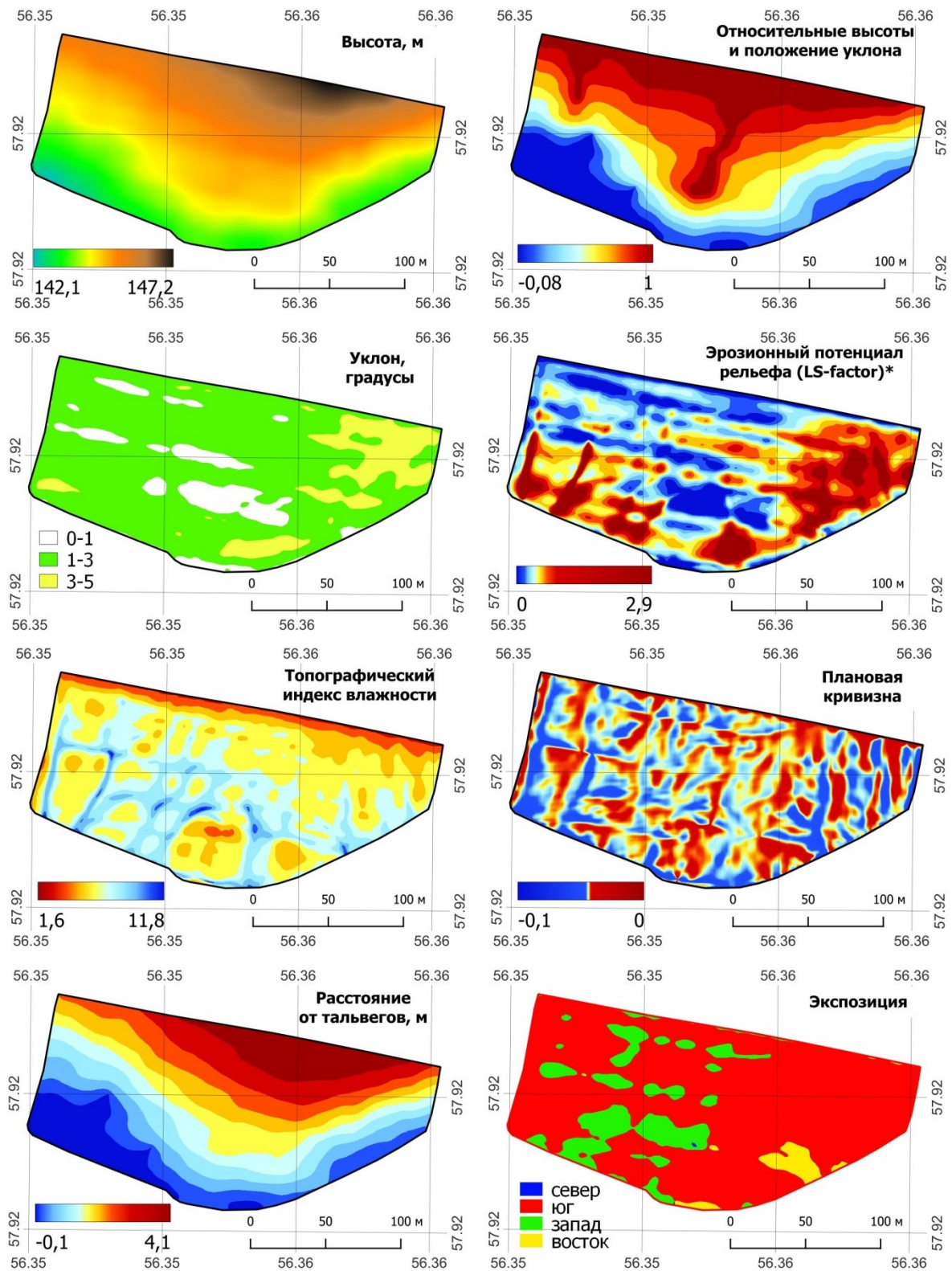


Рис. 5. Морфометрические показатели рельефа ключевого участка
 Fig. 5. Morphometric indicators of the relief of the key area

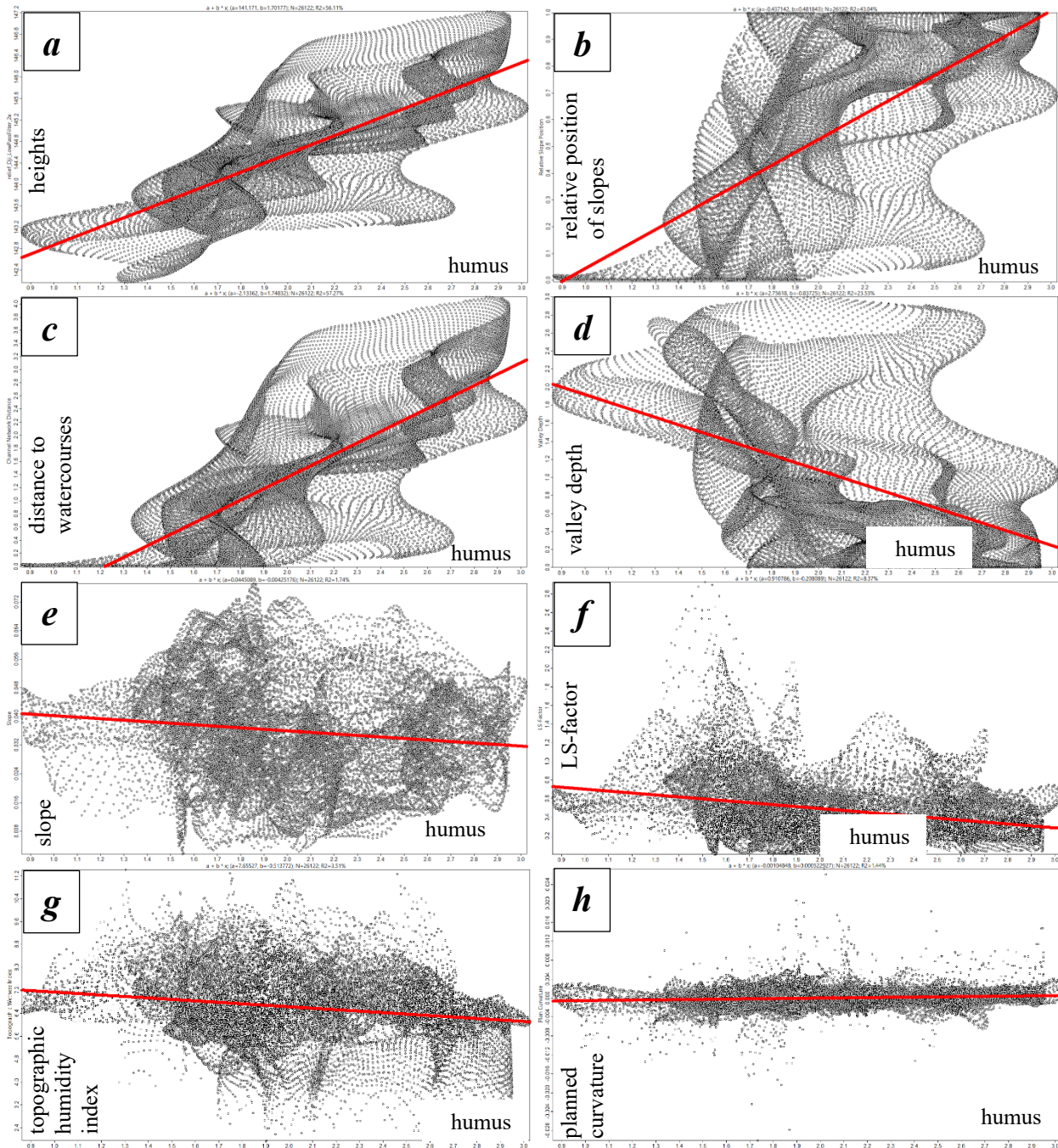


Рис. 6. Графики корреляции растров содержания гумуса с морфометрическими показателями рельефа (а — высоты; б — относительное положение склонов; с — расстояние до тальвегов; д — глубина долины; е — уклон; ф — LS-factor; г — топографический индекс влажности; h — плановая кривизна)

Fig. 6. Correlation graphs of rasters of humus content with morphometric indicators of the relief (a — heights; b — relative position of slopes; c — distance to watercourses; d — valley depth; e — slope; f — LS-factor; g — topographic humidity index; h — planned curvature)

Обращает на себя внимание и обратная корреляционная связь со значениями глубины долины. Влияние уклона, топографического индекса влажности и кривизны поверхности на пространственное распределение гумуса имеют незначительное влияние и, соответственно, слабый характер связи.

ВЫВОДЫ

Применение БПЛА открывает широкие возможности в определении почвенно-ландшафтных связей. Исследование пространственного варьирования свойств почвенного покрова опытного поля при помощи снимков, полученных с БПЛА, основано на их геоинформационном анализе и соответствует детальному масштабу ключевых участков. Цифровое моделирование рельефа на основе высокодетальных БПЛА-снимков на небольшой площади позволяет установить влияние геоморфологических условий даже на выровненных слабонаклоненных участках на пространственное распределение и содержание гумуса в почве. Корреляционный анализ растров показал тесную связь между содержанием гумуса и расстоянием до тальвегов, а также высотой местности. Показатели, характеризующие увлажненность и кривизну поверхности, влияют на варьирование содержания гумуса в пространстве незначительно.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ACKNOWLEDGEMENTS

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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: 10.7868/S0032180X17010087.
- Каптанов А. Н., Вернюк Ю. И., Савин И. Ю., Щепотьев В. В., Докукин П. А., Шарычев Д. В., Ли К. А.* Картографирование ручейковой эрозии пахотных почв по данным с беспилотных летательных аппаратов. Почвоведение, 2018. № 4. С. 506–512. DOI: 10.7868/S0032180X18040111.
- 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.). Красноярск: ФИЦ КНЦ СО РАН, 2023. С. 239–244. DOI: 10.52686/9785604525050_376.
- 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: 10.28983/asj.y2023i10pp47-53.
- Самофалова И. А., Мудрых Н. М.* Пространственная неоднородность гумусообразования. АгроЭкоИнфо, 2017. № 4(30). Электронный ресурс: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STA_TYI/2017/4/st_434.doc (дата обращения 20.04.2024).
- Скрябина О. А.* Структура почвенного покрова, методы ее изучения. Пермь: ПГСХА, 2007. 206 с.

Турк Г. Г., Карачев 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.

Чащин А. Н., Панькова А. А. Моделирование эрозии почвы по данным БПЛА-съемки. Актуальные проблемы эффективного использования агрохимикатов и воспроизводства плодородия почв: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию доктора сельскохозяйственных наук, заслуженного работника сельского хозяйства Удмуртской Республики, почетного работника высшей школы Российской Федерации, профессора Александра Степановича Башкова (Ижевск, 15–18 ноября 2022 г.). Ижевск: Удмуртский государственный аграрный университет, 2022. С. 237–241.

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.

Шихов А. Н., Герасимов А. П., Пономарчук А. И., Перминова Е. С. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2020. 191 с. Электронный ресурс: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifrirovaniye-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf> (дата обращения 20.04.2024).

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. V. 439. P. 108863. DOI: 10.1016/j.geomorph.2023.108863.

REFERENCES

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. V. 439. P. 108863. DOI: 10.1016/j.geomorph.2023.108863.

Chashchin A. N., Pankova A. A. Modeling soil erosion based on UAV survey data. Current problems of effective use of agrochemicals and reproduction of soil fertility: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 90th anniversary of Doctor of Agricultural Sciences, Honored Worker of Agriculture of the Udmurt Republic, Honorary Worker of Higher School of the Russian Federation, Professor Alexander Stepanovich Bashkov (Izhevsk, November 15–18, 2022). Izhevsk: Udmurt State Agrarian University, 2022. P. 237–241 (in Russian).

Chinilin A. V., Naumov V. D., Mikhaltsov V. S. Digital mapping of soil properties by using regression kriging: the case of RSAU-MTAA forest experimental district. *News of the Timiryazev Agricultural Academy*, 2018. No. 4. P. 20–31 (in Russian). DOI: 10.26897/0021-342X-2018-4-20-31.

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. V. 50. No. 1. P. 20–29 (in Russian). DOI: 10.1134/S1064229317010082.

Kashtanov A. N., Vernyuk Y. I., Savin I. Y., Shchepot'ev V. V., Dokukin P. A., Sharychev D. V., Li K. A. Mapping of rill erosion of arable soils based on unmanned aerial vehicles survey. *Eurasian Soil Science*, 2018. V. 51. No. 4. P. 479–484 (in Russian). DOI: 10.1134/S1064229318040051.

Kuznetsova A. S., Erunova M. G., Yakubailik O. E. Technologies for creating a bank of geospatial data of agricultural experimental production facility of the Federal research center KSC SB RAS. Modern problems and prospects for the development of agrochemistry, agriculture and related sciences on soil fertility and productivity of field crops in Siberia: Proceedings of the International Scientific and Production Conference with international participation (Krasnoyarsk, July 20–22, 2022). Krasnoyarsk: Federal Research Center KSC SB of Russian Academy of Sciences, 2023. P. 239–244 (in Russian). DOI: 10.52686/9785604525050_376.

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. The Agrarian Scientific Journal, 2023. No. 10. P. 47–53 (in Russian). DOI: 10.28983/asj.y2023i10pp47-53.

Samofalova I. A., Mudrykh N. M. Spatial heterogeneity of humus formation. AgroEcoInfo, 2017. No. 4(30). Web resource: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2017/4/st_434.doc (accessed 20.04.2024) (in Russian).

Shikhov A. N., Gerasimov A. P., Ponomarchuk A. I., Perminova E. S. Thematic interpretation and interpretation of satellite images of medium and high spatial resolution. Perm: Perm State National Research University, 2020. 191 p. Web resource: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifirovanie-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf> (accessed 20.04.2024) (in Russian).

Skryabina O. A. The structure of the soil cover, methods of its study. Perm: Perm State Agricultural Academy, 2007. 206 p. (in Russian).

Turk G. G., Karachev N. K. Use of unmanned aerial vehicles (UAVS) in geodesy. Vector of GeoSciences, 2023. V. 6. No. 2. P. 56–60 (in Russian). DOI: 10.24412/2619-0761-2023-2-56-60.
