

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-28-56



Ссылки для цитирования:

Шилов П.М. Топографические условия дренируемости почвенного покрова Владимирского Ополя // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 105. С. 28-56. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-28-56

Cite this article as:

Shilov P.M., Topographic conditions of soil drainage of Vladimir Opolie, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 105, pp. 28-56, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-28-56

Благодарность:

Исследование выполнено в рамках темы госзадания №0591-2020-0029, а также при поддержке гранта РФФИ № 19-05-00233-а.

Acknowledgments:

The studies were carried out within the framework of the State assignment No. 0591-2020-0029 and with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), scientific project No. 19-05-00233-a.

¹Топографические условия дренируемости почвенного покрова Владимирского Ополя

© 2020 г. П. М. Шилов

ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
e-mail: pavelshilov@gmail.com.

Поступила в редакцию 28.05.2020, после доработки 15.12.2020,
принята к публикации 17.12.2020

Резюме: В статье продемонстрирован подход к цифровому картографированию топографических условий дренируемости почвенного покрова Владимирского Ополя. Топографические условия модельного участка охарактеризованы цифровой моделью рельефа и производными от нее локальными и региональными морфометрическими величинами с разрешением сетки 30 × 30 м. Разнообразие условий

¹ статья рекомендована к публикации по итогам Четвертой открытой конференции молодых ученых Почвенного института им. В.В. Докучаева “Почвоведение: Горизонты будущего”, 11–14 февраля 2020 г.

переувлажнения описано 193 точками почвенного обследования с морфологической характеристикой степени дренируемости, из которых 170 принадлежит почвенным разрезам Госкомзема РСФСР. На основе сопоставления почв, ранжированных по степени переувлажнения, и морфометрических характеристик рельефа средствами канонического дискриминантного анализа рассчитан топографический фактор дренируемости (ТФД), объясняющий 70% изменчивости гидроморфизма почв. При помощи ТФД численно обобщено влияние характеристик формы рельефа, высоты базиса эрозии, соотношения водосборной площади и крутизны (топографический индекс влажности) на дифференциацию избыточного увлажнения почвенного покрова. В диапазоне ТФД > -0.5 упорядочены серые лесные почвы, приуроченные к дренируемым моренно-эрозионным равнинам, полого-покатым и крутым склонам долин. Область ТФД < -0.5 соответствует серым лесным слабogleеватым и глееватым почвам, характерным для слабодренируемых пологих склонов равнин, элементов ложбинной сети и западин.

Ключевые слова: гидроморфизм, серые лесные почвы, канонический дискриминантный анализ.

²Topographic conditions of soil drainage of Vladimir Opolie

P. M. Shilov

*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
e-mail: pavelshilovv@gmail.com.*

Received 28.05.2020, Revised 15.12.2020, Accepted 17.12.2020

Abstract: This article demonstrates an approach to digital mapping of soil drainage in Vladimir Opolie controlled by topographic conditions. Topographic conditions of the key area are described by a digital terrain model and morphometric parameters with resolution of 30 m. The variety of soil drainage is represented by soil survey data of the RSFSR Goskomzem, which includes 170 soil observations with morphological characteristic of the degree of soil hydromorphism. Linear combination of the most significant

² The article was recommended for publication at the Fourth Open Conference of Young Scientists of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute. “Soil Science: Horizons of the Future”, February 11–14, 2020.

morphometric parameters is calculated by the means of canonical discriminant analysis. This combination also interpreted as topographically induced soil drainage explains 70% of spatial variation of soil hydromorphism. Scores above 0.5 relate to gray forest soils of well drained moraine-erosional plains, gently and steep slopes of valleys. Scores below 0.5 relate to gleyic grey forest soils of shallow slopes of plains, deep valleys and depressions with poor soil drainage conditions.

Keywords: hydromorphism, grey forest soils, canonical discriminant analysis.

ВВЕДЕНИЕ

Нечерноземье – зона рискованного земледелия с преимущественно выборочным освоением ареалов наиболее благоприятных земель. К числу лимитирующих факторов, которые определяют степень земледельческой освоенности и ее региональную изменчивость в гумидных ландшафтах Нечерноземья, относится сезонное или постоянное переувлажнение почв. В зависимости от степени избыточного увлажнения почвы, длительности и интенсивности его периодов развиваются анаэробные условия, которые влияют на сроки созревания сельскохозяйственных культур и их урожайность ([Зайдельман, 1975](#); [Прохорова, Сорокина, 1975](#)). Почвы с контрастными агроэкологическими характеристиками водного режима имеют низкую агрономическую совместимость относительно применяемых агротехнологий и систем удобрений ([Шеин и др., 2017](#)).

Накопление избыточной влаги в почвенном профиле обусловлено тремя факторами: 1) условиями увлажнения – соотношением параметров климата: количество атмосферных осадков, испаряемость, суммарный сток; 2) рельефом поверхности и 3) гранулометрическим составом почвообразующих пород ([Зайдельман, 1985](#)). Значительная протяженность Нечерноземной зоны привела к зонально-провинциальной, мозаичной картине изменчивости литолого-геоморфологических и гидротермических условий почвообразования ([Агроприродное..., 1987](#); [Гулинова, 1978](#); [Почвенный покров Нечерноземья..., 1986](#)). Разнообразие условий перераспределения влаги обуславливает изменчивость компонентного состава почвенного покрова и доленое участие в нем переувлажненных почв.

Относительно низкая степень гидроморфизма в Нечерноземье характерна для ополей ([Николаев, 2013](#)). К их числу относятся Владимирское Ополье, расположенное на границе Ярославской, Владимирской и Ивановской областей, в северо-восточной части Клинско-Дмитровской гряды (рис. 1). Большая густота эрозионного расчленения ($>1 \text{ км/км}^2$) и лёссовидные почвообразующие породы обусловили преобладание дренируемых серых лесных почв в структуре почвенного покрова Владимирского Ополя ([Физико-географическое..., 1963](#)). Несмотря на доминантное положение дренируемых серых лесных почв, в почвенном покрове ополя встречаются переувлажненные почвы ([Савастру, 1999](#); [Симакова, 1987](#)).

Цель данного исследования заключается в оценке влияния топографического фактора на изменчивость состава водно-миграционных структур почвенного покрова в однородных климатических и литологических условиях Владимирского Ополя. Под топографическим фактором понимается совокупность характеристик рельефа земной поверхности ([Jenny, 1941](#); [Troeh, 1964](#)). К числу таких характеристик относят локальные и нелокальные (региональные) морфометрические величины, описывающие механизмы перераспределения влаги – показатели формы, кривизны, крутизны, водосборной площади и др. ([Сысцев, 2003](#); [Shary et al., 2002](#); [Florinsky, 2016](#); [Hengl et al., 2009](#)). Несмотря на различные физико-географические условия роль ведущих факторов дифференциации почвенного увлажнения играют не более четырех-пяти морфометрических переменных из нескольких десятков известных ([Bell et al., 1994](#); [Gillin et al., 2015](#); [Malone et al., 2018](#); [Møller et al., 2019](#)). В почвенно-ландшафтных исследованиях такие факторы выступают неотъемлемой основой цифрового картографирования структуры почвенного покрова или его отдельных свойств ([Debella-Gilo et al., 2009](#); [Odeh et al., 1994](#); [Thompson et al., 2006](#); [Gillin et al., 2015](#)), почвенно-агроэкологической оценки ([Липкина, 1993](#); [Рублюк, 2003](#), [Сорокина, 2002](#)).

В данной работе решаются следующие методические вопросы исследования факторов: 1) выявление индивидуального и совместного вклада нескольких независимых морфометрических переменных в пространственное варьирование почвенного увлажне-

ния Владимирского Ополья; 2) численное выражение совместного действия переменных в виде интегрального фактора; 3) цифровое картографирование почв разной степени увлажнения на основе совместного анализа интегрального фактора и массива почвенных описаний.

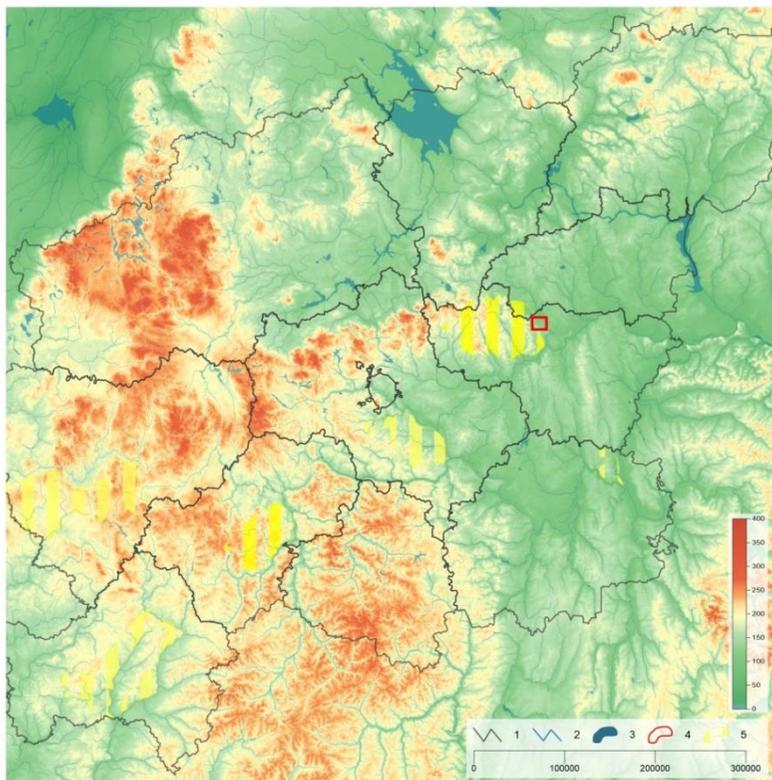


Рис. 1. Физико-географическое положение Верхневолжского ФАНЦ в центральном Нечерноземье: 1 – граница субъектов РФ, 2 – водотоки, 3 – озера и водохранилища, 4 – Верхневолжский ФАНЦ, 5 – ополья Русской равнины.

Fig. 1. Physico-geographical location of the Verkhnevolzhsky FANTS in the central Non-Chernozem Region: 1 – borders of the constituent entities of the Russian Federation, 2 – watercourses, 3 – lakes and water reservoirs, 4 – Verkhnevolzhsky FANTS, 5 – the Russian Plain opolie.

Создание картографической модели опирается на принципы цифрового почвенного картографирования, сформулированные в зарубежных работах ([McBratney et al., 2003](#); [Minasny, McBratney, 2016](#)) и развиваемые в отечественных работах ([Савин и др., 2019](#); [Сорокина, Козлов, 2012](#); [Флоринский, 2012](#)). Ранее схожий подход моделирования ареалов переувлажнения применен автором для почв Валдайской возвышенности ([Шилов, Козлов, 2019](#)).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом картографирования выступил участок Владимирского Ополя площадью 15 тыс. га, охватывающий производственные поля Верхневолжского федерального аграрного научного центра (ФАНЦ) и соседних хозяйств (Суздальский район). Ландшафты ополя представляют собой возвышенную волнистоувалистую моренно-эрозионную равнину с сильно расчлененной овражно-балочной сетью, сложенную лёссовидными среднесуглинистыми отложениями мощностью 1.5–5 м, подстилаемыми мореной, с распаханной серыми лесными среднесуглинистыми почвами ([Ахромеев, 2008](#); [Модель..., 2005](#); [Романов, 2008](#)).

Сумма активных температур 1 900–2 000 °С. Среднегодовая сумма осадков 575 мм. Гидротермический коэффициент Селянинова за период вегетации составляет 1.4. В отдельные годы ГТК изменяется от 0.3 до 2.9. За период активной вегетации (май – сентябрь) выпадает 280 мм осадков ([Агроклиматические ресурсы..., 1968](#)). В пахотных почвах сложился периодически промывной тип водного режима ([Алифанов, Лошакова, 1981](#)). С учетом почвенно-агроклиматических условий в структуре севооборотов преобладают озимая и яровая пшеница, многолетние травы, зернобобовые, картофель, кукуруза (силос) ([Модель..., 2005](#)).

Согласно почвенно-географическому районированию Владимирское Ополе относится к Среднерусской провинции дерново-подзолистых почв южной тайги, Юрьев-Польскому округу возвышенных моренных равнин с серыми лесными глинистыми и тяжелосуглинистыми пылеватыми почвами со вторым гумусовым горизонтом на покровных отложениях ([Добровольский, Урусевская, 1984](#)). В структуре почвенного покрова Верхневолжского ФАНЦ доминируют серые лесные почвы всех подтипов, родов и

видов на лёссовидных суглинках ([Модель..., 2005](#)). Компонентный состав и генезис микроструктур почвенного покрова Владимирского ополя, в т. ч. структур, связанных с миграцией влаги, детально освещен во многих работах ([Алифанов, Гугалинская, 1993](#); [Макеев, Дубровина, 1990](#); [Рубцова, 1974](#); [Тюрюканов, Быстрицкая, 1971](#)). Мезоструктуры охарактеризованы в меньшей степени ([Савастру, 1999](#); [Симакова, 1987](#)).

Для моренно-эрозионных равнин характерны три типа водно-миграционных структур серых лесных почв. Дренируемые междуречья включают пятнистости серых лесных обычных, оподзоленных, остаточно-карбонатных почв, иногда почв со вторым гумусовым горизонтом. Слабодренируемые субгоризонтальные междуречья состоят из комбинаций зональных почв и их слабogleеватых аналогов. В составе полугидроморфных структур ложбин, замкнутых понижений и западин преобладают пятнистости слабogleеватых и глееватых разновидностей серых лесных обычных, оподзоленных и серых лесных почв со вторым гумусовым горизонтом.

В северо-восточной части участка крупномасштабного картографирования сформировались дерново-подзолистые почвы на песчаных и суглинистых моренных отложениях. Иной генезис дерново-подзолистых почв не позволяет их рассматривать в одном ряду с серыми лесными и факторами их дифференциации.

Общий порядок исследования состоит из следующих этапов:

- 1) диагностика степени переувлажнения и ранжирование почв в ряду возрастающего гидроморфизма;
- 2) оценка сопряженности пространственной изменчивости переувлажненных почв с топографическими характеристиками в двух масштабах – территории научного центра (15 000 га) и полевого участка детальной съемки (320 га);
- 3) построение карт компонентного состава водно-миграционных структур почвенного покрова;
- 4) численное выражение совместного вклада наиболее значимых топографических характеристик в дифференциацию почв разной степени переувлажнения;
- 5) верификация результатов.

Характеристика степени переувлажнения дана при помощи диагностики почвенного профиля 193 точек полевых описаний (рис. 2) в соответствии с классификацией почв СССР (1977) и указаниями по диагностике степени заболачивания почв (Указания..., 1982). Массив описаний Госкомзема РСФСР (1991), Н.Г. Савастру (1999) и Д.В. Морева (2017), а также собственные результаты полевых исследований сведены к трем категориям почв шкалы возрастающего гидроморфизма:

- “Серые лесные (*Л*)” – серые лесные обычные (без признаков оглеения), серые лесные оподзоленные, серые лесные оподзоленные со вторым гумусовым горизонтом и серые лесные остаточно-карбонатные почвы.
- “Серые лесные слабogleеватые (*Лсг*)” – серые лесные оподзоленные, серые лесные оподзоленные со вторым гумусовым горизонтом и серые лесные слабogleеватые почвы, все с признаками слабого оглеения в нижней части горизонта В.
- “Серые лесные глееватые (*Лг*)” – серые лесные, серые лесные оподзоленные со вторым гумусовым горизонтом и серые лесные оподзоленные глееватые почвы со слабым или средним оглеением в горизонте ВА₂.

Отметим, что данная классификация не охватывает полное таксономическое разнообразие зональных почв, а имеет прикладной характер в вопросах картографирования миграции влаги. При делении не приняты во внимание диагностические признаки иных процессов, например, признаки эрозионно-аккумулятивных процессов, признаки различного гумусового состояния почв. Аллювиальные и дерново-подзолистые почвы исключены из модели на основе материалов крупномасштабной почвенно-земельной съемки Госкомзема.

Картографирование очагов переувлажнения предопределяет необходимость выявления наиболее информативных факторов, влияющих на миграцию влаги. В условиях относительной однородности литологического состава неоднородность увлажнения почвенного покрова ополья сопряжена с рельефом и его уровнями организации: 1) микрорельефом различного генезиса (Алифанов, 1986; Величко и др., 1996); 2) мезорельефом моренно-эрозионных равнин (Савастру, 1999).

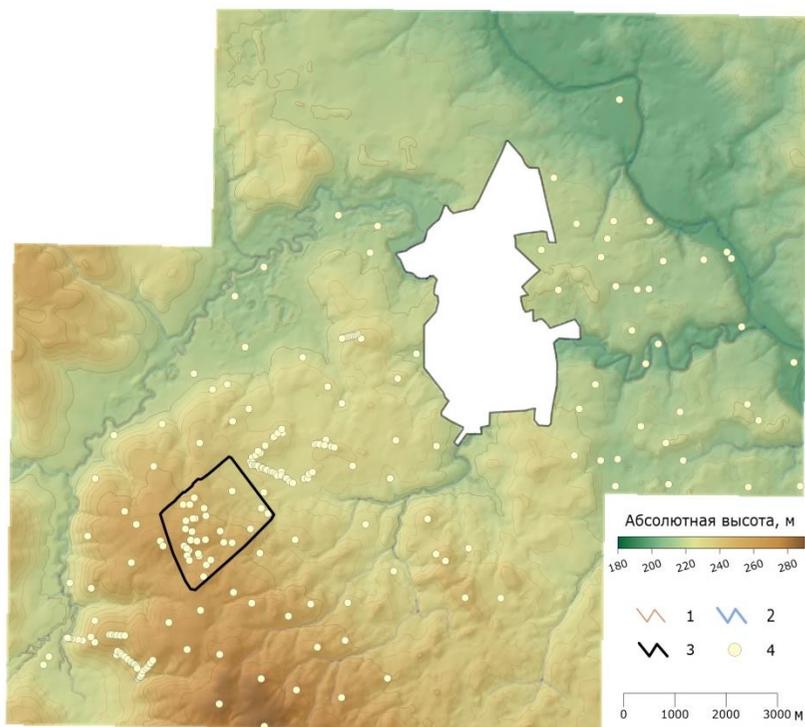


Рис. 2. Цифровая модель рельефа Верхневолжского ФАНЦ (разрешение ячейки 30×30 м): 1 – основные горизонтали; 2 – водотоки; 3 – граница участка детальной почвенной съемки; 4 – точки почвенных описаний.

Fig. 2. Digital elevation model of Upper Volga FANTS (cell size 30×30 m): 1 – main topographic contour lines; 2 – watercourses; 3 – boundary of detailed soil survey plot; 4 – soil description points.

В основу цифрового картографирования совместной изменчивости почвенного гидроморфизма и топографических факторов его дифференциации положена сетка с регулярным шагом, в ячейках которой сопоставляются, с одной стороны, категории почв с различной степенью переувлажнения, а с другой – совокупность характеристик мезорельефа (факторов), потенциально определяющих миграцию влаги. Топографические условия Верхневолжского ФАНЦ охарактеризованы на основе ЦМР с пространствен-

ным разрешением 30×30 м (рис. 2). ЦМР участка детальной съемки получена с БПИА Геоскан-201 Агро (рис. 4А). Первичная ЦМР с разрешением 10 см обработана в следующем порядке: 1) фильтрация агрогенного микрорельефа ([Минаев и др., 2019](#)), который играет роль “шума” на крупномасштабной модели; 2) агрегация размера ячейки до 20×20 м. Для сравнительного анализа ряда почв с расчетными морфометрическими величинами ([Сысыев, 2003](#); [Florinsky, 2016](#)) в двух масштабах выбрано близкое пространственное разрешение ЦМР, которое отражает условия миграции влаги на масштабном уровне мезорельефа.

Сопряженность пространственной изменчивости гидроморфизма почвенного покрова с топографическими факторами оценена средствами канонического дискриминантного анализа ([Джонгман, 1999](#); [Пузаченко, 2004](#); [Webster, Burrough, 1974](#)). С его помощью решены три вычислительные задачи: 1) оценка индивидуального и совокупного вклада морфометрических характеристик в дифференциацию L , $L_{сг}$ и $L_{г}$ почв; 2) определение наиболее значимых морфометрических величин на основе критерия Фишера; 3) прогноз условной вероятности L , $L_{сг}$ и $L_{г}$ в ячейках сетки. В основе прогноза условной вероятности [1] лежит расчет дистанции Махаланобиса между элементами сетки и центрами областей каждой из трех категорий почв:

$$P_{L/L_{сг}/L_{г}} = \frac{e^{(0,5 \cdot D_{L/L_{сг}/L_{г}}^2)}}{e^{(0,5 \cdot D_L^2)} + e^{(0,5 \cdot D_{L_{сг}}^2)} + e^{(0,5 \cdot D_{L_{г}}^2)}}, \text{ где} \quad [1]$$

$$D_{L/L_{сг}/L_{г}} = \sqrt{(x_i - \bar{x}_{L/L_{сг}/L_{г}}) \times (y_i - \bar{y}_{L/L_{сг}/L_{г}}) \times \dots \times S^{-1}}$$

– дистанция Махаланобиса ячейки в пространстве топографических факторов:

$x_i, y_i \dots$ – значения морфометрической величины в ячейке i ;

\bar{x}, \bar{y}, \dots – средние значения морфометрической величины для каждой категории почв (табл. 1);

S^{-1} – обратная ковариационная матрица.

Кроме того, канонический дискриминантный анализ позволяет численно выразить совместное участие наиболее значимых факторов в разделимость категорий ([Козлов, Сорокина, 2012](#)). В результате вычисления определяется линейная комбинация [2] характеристик рельефа, в диапазоне которой средние значения дискриминируемых *L*, *Lc2* и *Lc* категорий почв максимально отличаются друг от друга. Данная комбинация факторов является канонической дискриминантной функцией ([Джонгман, 1999](#)):

$$f_i = u_0 + u_1X_{1i} + u_2X_{2i} + \dots + u_kX_{kn}, \text{ где} \quad [2]$$

f_i – значение канонической дискриминантной функции в точке i ;
 u_i – вес, принадлежащий фактору;
 X_{ji} – значения фактора j в точке i .

Коэффициенты канонических функций подбираются таким образом, чтобы: 1) их средние значения для категорий почв максимально отличались друг от друга; 2) переменные не были скоррелированы между собой. При соответствующей интерпретации ([Пузаченко и др., 2006](#); [Carroll et al., 2006](#)) канонические переменные можно рассматривать как интегральные и независимые топографические факторы дифференциации почвенного увлажнения, описывающие различные механизмы миграции влаги в почвенном покрове.

Итоговая детерминированность модели заведомо неполная из-за влияния незатронутых факторов – микрорельефа, глубины подстилания моренной, условий землепользования, а также возможных ошибок морфологической диагностики и неточностей географической привязки описаний почв.

Верификация крупномасштабной модели выполнена путем сравнения компонентного состава почвенного покрова с результатами съемки полевого участка площадью 320 га.

Таблица 1. Топографические факторы почвенного увлажнения
 Table 1. Topographical factors of soil wetting

Морфометрическая величина		Верхневолжский ФАНЦ						Участок детальной почвенной съемки			
		F	Уровень значимости	Почвы			F	Уровень значимости	Почвы		
				L	Lс2	Lz			L	Lс2	Lz
Топографический индекс превышений ¹ в окрестности..., м (TRI...) (Weiss, 2000)	100 1 000	5.4 12.4	0.005 0.000	0.29 2.86	-0.13 -1.28	-0.3 -1.78	4.2 -	0.022 -	0.11 -	-0.15 -	-0.31 -
Топографический индекс влажности ² , безразмерный (TWI) (Florinsky, 2016)		12.4	0.000	8.65	10.2	11.7	6.9	0.002	12.2	13.6	15.0
Высота базиса эрозии, м (CNBL) (Conrad et al., 2002)		7.1	0.001	228.6	230.5	232.1	3.3	0.049	153.9	152.6	152.9

Примечание. ¹Z(0) – Z(r), где Z(0) – абсолютная высота центрального пикселя, Z(r) – средняя высота пикселей, удаленных от Z(0) на r; ²In($\frac{\alpha}{\tan\beta}$), где α – площадь водосбора, β – крутизна.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В совокупности топографические условия объясняют 75% изменчивости почвенного увлажнения, остальные 25% – особенности строения микрорельефа и литологического строения лёссовидных суглинков. Из 20 расчетных морфометрических характеристик наиболее значимы следующие (табл. 1): форма земной поверхности (топографический индекс превышений), площадь и уклон водосбора (топографический индекс влажности), базис эрозии.

Компонентный состав ПК определен на основе выражения [1]. Дистанции Махаланобиса [3] для каждого элемента ячейки до центра классов *L*, *Lсг* и *Lг* рассчитаны по формулам:

$$D_L = \sqrt{(TPI100_i - 0,29) \times (TPI1000_i - 2,86) \times (TWI_i - 8,65) \times (CNBL_i - 228,6)} \times S^{-1}$$

$$D_{Lсг} = \sqrt{(TPI100_i + 0,13) \times (TPI1000_i + 1,28) \times (TWI_i - 10,2) \times (CNBL_i - 230,5)} \times S^{-1} \quad [3]$$

$$D_{Lг} = \sqrt{(TPI100_i + 0,3) \times (TPI1000_i + 1,78) \times (TWI_i - 11,7) \times (CNBL_i - 232,1)} \times S^{-1},$$

где S^{-1} – обратная ковариационная матрица:

6.317	-0.212	0.732	0.025
-0.212	0.106	0.027	-0.003
0.732	0.027	0.512	0.007
0.025	-0.003	0.007	0.006

Длительный застой влаги наблюдается в незадернованных элементах ложбинной сети и западинах с серыми лесными глееватыми почвами (рис. 3В). Комбинации с преобладанием дренируемых серых лесных почв характерны для моренно-эрозионных равнин, полого-покатых и крутых эрозионных склонов речных долин (рис. 3А). Промежуточное положение занимают слабонаклонные моренно-эрозионные равнины, вытянутые слабонаклонные эрозионные шлейфы с преобладанием серых лесных слабоглееватых почв в составе почвенных комбинаций (рис. 3Б).

Наибольшее влияние на изменчивость гидроморфизма оказывает топографический индекс влажности ([Ågren et al., 2014](#);

[Grabs et al., 2009](#); [Lidberg et al., 2019](#)). Второй по значимости фактор увлажнения – топографический индекс превышений, описывающий форму мезорельефа. Третий фактор – высота базиса эрозии, вычисленная в каждом элементе сетки на основе интерполяции высот в тальвегах ([Conrad et al., 2015](#)). Данная величина редко рассматривается в работах по исследованию факторов почвенного увлажнения ([Bock, Köthe, 2008](#)). Значения базиса эрозии в элементах сетки отражают потенциальный уровень, ниже которого не могут опуститься почвенно-грунтовые воды. Максимальные значения базиса эрозии характерны для дренируемых междуречий с глубоким залеганием уровня почвенно-грунтовых вод, минимальные – для глубоких долин с избыточным поверхностным увлажнением (табл. 1).

Разнообразие топографических условий упорядочено в виде одной канонической переменной – топографического фактора дренируемости – ТФД [4]. В диапазоне ТФД категории почв упорядочены по нарастанию степени гидроморфизма. ТФД объясняет 51% изменчивости увлажнения почв:

$$\text{ТФД} = 0,4 \times TPI_{100\text{м}} + 0,5 \times TPI_{1000\text{м}} - 0,5 \times TWI - 0,4 \times CNBL \quad [4]$$

Область значений (> -0.5) соответствует дренируемым серым лесным почвам (рис. 3Г). В области отрицательных значений расположены серые лесные слабogleеватые ($-1.3 \dots -0.5$) и серые лесные глееватые (< -1.3) почвы. Степень дренируемости обратно пропорциональна топографическому индексу влажности, базису эрозии, и прямо пропорциональна топографическому индексу превышений.

Выражение [4] позволяет рассчитать значения топографического фактора дренируемости для каждого элемента регулярной сетки в масштабе Верхневолжского ФАНЦ. На полученной карте (рис. 3Г) отражено увлажнение почвенного покрова, обусловленное совместным действием топографических факторов.

Формирование автоморфных почвенных комбинаций приурочено к дренируемым моренно-эрозионным равнинам, пологопокатым и крутым склонам с рассеянием влаги. Общая доля таких участков (значения ТФД > -0.5) составляет 80% территории Верх-

неволжского ФАНЦ. В составе комбинаций преобладают серые лесные дренируемые почвы (*Л*) с долевым участием более 80%.

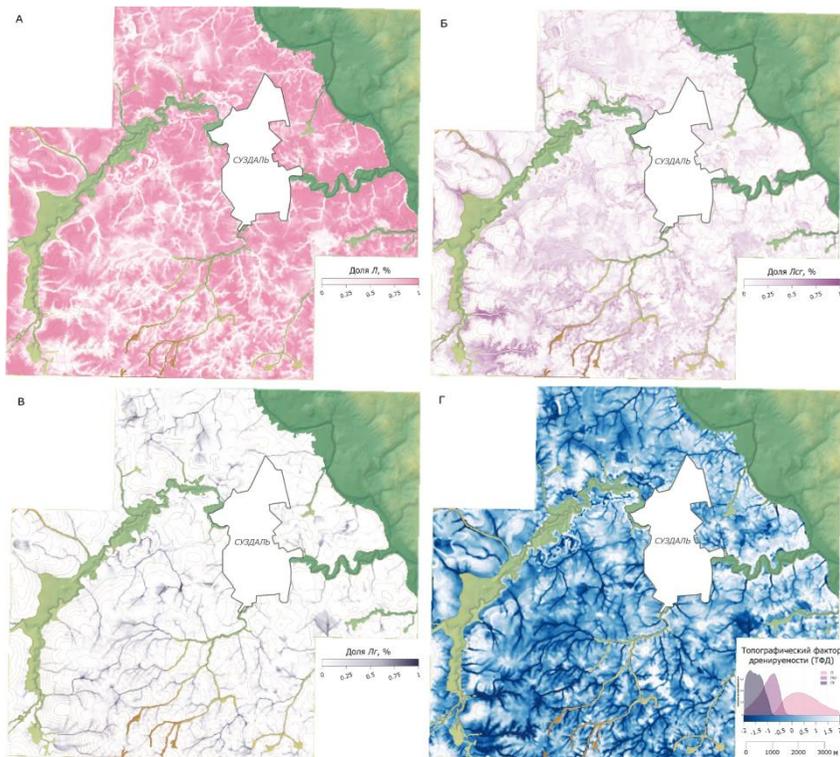


Рис. 3. Компонентный состав почвенных комбинаций (%) Верхневолжского ФАНЦ: А – серые лесные почвы (*Л*); Б – серые лесные слабоглееватые почвы (*Лсг*); В – серые лесные глееватые почвы (*Лг*); Г – топографический фактор дренируемости почв.

Fig. 3. Composition of soil cover (%) of Upper Volga FANTS: А – gray forest soils; Б – gray forest slightly gley soils; В – gray forest gleyic soils; Г – topographical factor of soil drainage.

В свою очередь, максимальная концентрация стока характерна для ложбин, западин, водосборных понижений со значениями ТФД меньше -1.3. В структуре почвенного покрова в равной доле участвуют *Лсг* (45%) и *Лг* (42%). Диапазон ТФД (-1.3...-0.5)

характерен для пологих приводораздельных склонов моренно-эрозионных равнин и пологонаклонных эрозионно-аккумулятивных шлейфов, конусов выноса с замедленным дренажем. В составе комбинаций равные доли разделяют *Л* и *Лсг* (по 43%). Общая площадь полугидроморфных структур почвенного покрова составляет 20%.

Упорядочивание категорий почв в диапазоне ТФД позволяет рассматривать неопределенность прогноза как площадь пересечения *Л*, *Лсг* и *Лг* на линейной шкале фактора (рис. 3Г). Наиболее изолированы на шкале ТФД серые лесные почвы. Перекрывание диапазонов ТФД (> 50%) характерно для серых лесных слабogleватых и глееватых почв. Это может указывать на недостаточную информативность топографических условий при объяснении дифференциации *Лсг* и *Лг*.

Результаты свидетельствуют о двукратном превышении доли полугидроморфных почв (20%) по сравнению с данными почвенного обследования Госкомзема (1991). Для верификации результатов крупномасштабного картографического моделирования проведено сопоставление доли прогнозируемых категорий *Л*, *Лсг* и *Лг* в пределах полевого участка детальной почвенной съемки (рис. 4).

Структура модели полевого участка близка к структуре крупномасштабной модели – в значимые морфометрические величины вошли топографический индекс превышений, топографический индекс влажности и базис эрозии (табл. 1), объясняющие 71% изменчивости почвенного увлажнения.

На основе данной модели рассчитаны условные вероятности *Л*, *Лсг* и *Лг* (рис 4А–В) и значения топографического фактора дренируемости (рис. 4Г) для элементов регулярной сетки полевого участка. ТФД [5] объясняет 78% изменчивости почвенного увлажнения:

$$\text{ТФД} = 0,6 \times \text{TPI}_{100\text{м}} - 0,8 \times \text{TWI} - 0,6 \times \text{CNBL} \quad [5]$$

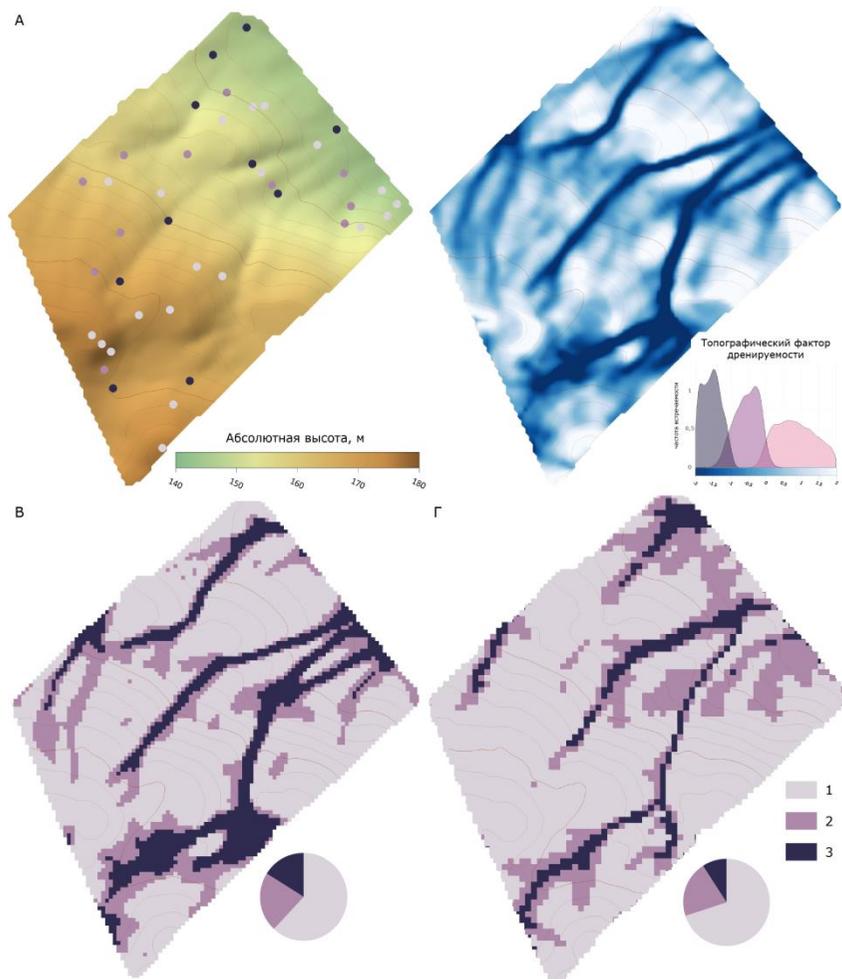


Рис. 4. Участок детальной почвенной съемки: А – ЦМР с разрешением 20×20 м; Б – Топографический фактор дренируемости (ТФД); В – Карта доминантной почвы; Г – Фрагмент карты доминантной почвы в крупном масштабе: 1 – Л, 2 – Лсг, 3 – Лг.

Fig. 4. Detailed soil survey plot: A – DEM with 20×20 m resolution; B – Topographically induced soil drainage (TSD); C – Dominant soil map; D – Large scale fragment of dominant soil map: 1 – Л, 2 – Лсг, 3 – Лг.

В области $TФД < 0$ расположены ложбины и водосборные понижения с сочетаниями $Lcг$ (< -1.1) и $Lг$ ($-1.1...0$). $TФД > 0$ характерен для дренируемых пологих и полого-покатых склонов моренно-эрозионной равнины с преобладанием L . Общая доля полигидроморфных комбинаций почв составляет 36% площади поля – $Lcг$ занимает 20%, $Lг$ – 16%. В то же время на крупномасштабной модели занижена доля $Lг$ – 9%. Процент совпадений $Lcг$ и $Lг$ составляет 35 и 42%.

Таким образом, в двух симметричных областях $TФД$ Владимирского Ополя расположены контрастные ареалы почвенного увлажнения: $TФД > 0$ – серые лесные почвы в дренируемых элементах мезорельефа с рассеянием влаги, $TФД < 0$ – полугидроморфные почвы в элементах мезорельефа с ее накоплением и замедленным дренажем.

Развитие данного подхода открывает возможности численного межрегионального сравнения факторов почвенного увлажнения Нечерноземной зоны. Для этого необходимо преодоление ряда методических ограничений: 1) переход от морфологической диагностики степени переувлажнения почвенного профиля к использованию количественных индикаторов водного режима различных генетических типов почв ([Романова, 1994](#)); 2) анализ иерархической организации рельефа Нечерноземья для целей выделения типов морфоструктур, морфоскульптур и их геоморфометрического анализа; 3) ранжирование климатических и литолого-геоморфологических факторов по их относительному вкладу в дифференциацию водно-миграционных структур почвенного покрова; 4) выявление взаимосвязи между топографическим фактором дренируемости и среднемноголетними параметрами тепло- и влагообеспеченности при различных сценариях изменения климата.

ВЫВОДЫ

1. Приведена методология упорядочивания характеристик рельефа по их индивидуальному и совокупному вкладу в изменчивость гидроморфизма почвенного покрова. Совокупный вклад характеристик находит выражение в виде топографического фактора дренируемости ($TФД$). $TФД$ рассчитывается на основе чис-

ленного анализа категорий почв в многомерном признаковом пространстве наиболее значимых морфометрических величин региона.

2. В однородных условиях литологии и климата топографический фактор определяет до 70% изменчивости почвенного увлажнения Владимирского Ополя. Влияние рельефа на дифференциацию почвенного увлажнения определяется перераспределением атмосферных осадков с учетом формы поверхности, соотношения водосборной площади и крутизны (топографический индекс влажности) и высоты базиса эрозии. Значения ТФД > -0.5 соответствуют дренируемым моренно-эрозионным равнинам, полого-покатым и крутым склонам с преобладанием серых лесных почв (*Л*) в составе почвенных комбинаций. Значения ТФД < -0.5 – пологим приводораздельным склонам равнин, западинам, ложбинам и ложбинообразным понижениям, концентрирующим влагу. В отрицательном диапазоне ТФД расположены сочетания полугидроморфных серых лесных глееватых (*Лсг*) и серых лесных глееватых (*Лг*) почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроклиматические ресурсы Владимирской области / *О.Б. Зворыкина, Т.И. Бурцева, К.Т. Васека и др.* М.: Упр. гидрометеорол. службы центр. областей, 1968. 138 с.
2. Агроприродное и сельскохозяйственное районирование Нечерноземной зоны европейской части РСФСР / *Л.В. Ромина, Н.А. Гвоздецкий, К.В. Зворыкин и др.* М.: Изд-во МГУ, 1987. 270 с.
3. *Алифанов В.М.* Серые лесные почвы центра Русской равнины. Историко-генетический анализ // Эволюция и возраст почв СССР. Пушкино, 1986. С. 155–162.
4. *Алифанов В.М., Гугалинская Л.А.* Палеокриогенез и структура почвенного покрова Русской равнины // Почвоведение. 1993. № 7. С. 65–75.
5. *Алифанов В.М., Лошакова Н.А.* Водный режим серых лесных почв // Почвоведение. 1981. № 4. С. 58–70.
6. *Ахромеев Л.М.* Природа, генезис, история развития и ландшафтная структура ополей Центральной России. Брянск: РИО Брянского государственного университета, 2008. 182 с.

7. Величко А.А., Морозова Т.Д., Нечаев В.П., Порожнякова О.М. Палеокриогенез, почвенный покров и земледелие. М.: Изд-во “Наука”, 1996. 145 с.
8. Гулинова Н.В. Агроклиматические ресурсы Нечерноземной зоны РСФСР // Агрометеорологические условия и продуктивность сельского хозяйства Нечерноземной зоны РСФСР. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. С. 17–32.
9. Джонгман Р.Г.Г. Анализ данных в экологии сообществ и ландшафтов. М.: РАСХН, 1999. 306 с.
10. Добровольский Г.В., Урусевская И.С. География почв. М.: Изд-во МГУ, 1984. 416 с.
11. Зайдельман Ф.Р. Гидрологический режим почв Нечерноземной зоны России (генетические, агрономические и мелиоративные аспекты). Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 328 с.
12. Зайдельман Ф.Р. Режим и условия мелиорации заболоченных почв. М.: Колос, 1975. 321 с.
13. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Изд-во “Колос”, 1977. 221 с.
14. Козлов Д.Н., Сорокина Н.П. Традиции и инновации в крупномасштабной почвенной картографии // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2012. С. 35–57.
15. Ландшафты Владимирской области: учеб. пособие в 2 ч. Ч. 1. Ландшафты Смоленско-Московской провинции / В.В. Романов. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. 56 с.
16. Липкина Г.С. Влияние почвообразующих пород и рельефа на плодородие дерново-подзолистых почв Центрального района России. Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 03.00.27. М., 1993. 44 с.
17. Макеев А.О., Дубровина И.В. География, генезис и эволюция почв Владимирского ополья // Почвоведение. 1990. № 7. С. 5–25.
18. Минаев Н.В., Никитин А.А., Козлов Д.Н. Идентификация масштабных уровней организации рельефа пашни // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 96. С. 3–21. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-96-3-21](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-96-3-21).
19. Модель адаптивно-ландшафтного земледелия Владимирского ополья / В.И. Кирюшин, А.Л. Иванов. М.: “Агроконсалт”, 2004. 456 с.
20. Морев Д.В. Агроэкологическая оценка земель в условиях зонального ряда агроландшафтов с повышенной пестротой почвенного покрова. Дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08. М., 2017. 137 с.
21. Николаев В.А. Парагенезис полесий-ополей Центральной России // Вестник Московского университета. География. 2013. № 5. С. 45–50.

22. Почвенный покров Нечерноземья и его рациональное использование. М.: Агропромиздат, 1986. 245 с.
23. Почвы и рекомендации по их использованию Владимирской государственной областной сельскохозяйственной опытной станции Суздальского района Владимирской области. Владимир: Центргипрозем (Владимирский филиал), 1991. 65 с.
24. Прохорова З.А., Сорокина Н.П. Влияние компонентов элементарной структуры дерново-подзолистых почв на продуктивность сельскохозяйственных растений // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 1975. Вып. 8. С. 178–190.
25. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Издательский центр “Академия”, 2004. 416 с.
26. Пузаченко М.Ю., Пузаченко Ю.Г., Козлов Д.Н., Федяева М.В. Картографирование мощности органогенного и гумусового горизонтов лесных почв и болот южнотаежного ландшафта (юго-запад Валдайской возвышенности) на основе трехмерной модели рельефа и дистанционной информации (Landsat 7) // Исследование Земли из космоса. 2006. № 4. С. 70–79.
27. Романова Т.А. Водный режим в генетической характеристике почв гумидной зоны // Почвоведение. 1994. № 4. С. 32–39.
28. Рублюк М.В. Роль холмисто-моренного рельефа в формировании свойств дерново-подзолистых почв и урожайности картофеля в условиях Центрального района Нечерноземной зоны РФ: Дис. ... канд. с-х. наук: 06.01.04. Тверь, 2003. 177 с.
29. Рубцова Л.П. О генезисе почв Владимирского ополя // Почвоведение. 1974. № 6. С. 17–27.
30. Савастру Н.Г. Агроэкологическая оценка почвенного покрова Владимирского ополя для проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия: Дис. ... канд. биол. наук: 03.00.27. М., 1999. 169 с.
31. Савин И.Ю., Жоголев А.В., Прудникова Е.Ю. Современные тренды и проблемы почвенной картографии // Почвоведение. 2019. № 5. С. 517–528.
32. Симакова М.С. Элементарные почвенные структуры Владимирского ополя // Почвы СССР. Принципы и генетико-географические аспекты исследований. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1987. С. 50–56.
33. Сорокина Н.П. Микронеоднородность почвенного покрова полей и ее сельскохозяйственное значение // Почвы Московской области и их использование. Т. 1. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2002. С. 277–311.

34. *Сысуев В.В.* Морфометрический анализ геофизической дифференциации ландшафтов // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2003. № 4. С. 36–50.
35. *Тюрюканов А.Н., Быстрицкая Т.Л.* Ополья Центральной России и их почвы. М.: Наука, 1971. 240 с.
36. Указания по диагностике подзолистого и болотно-подзолистого типов почв по степени оглеенности. М.: Картофилиал Росземпроекта, 1982. 10 с.
37. Физико-географическое районирование Нечерноземного центра / Н.А. Гвоздецкий, В.К. Жучкова. М.: Изд-во МГУ, 1963. 451 с.
38. *Флоринский И.В.* Гипотеза Докучаева как основа цифрового прогнозного почвенного картографирования (к 125-летию публикации) // Почвоведение. 2012. № 4. С. 500–506.
39. *Шейн Е.В., Кирюшин В.И., Корчагин А.А., Мазиров М.А., Дембовецкий А.В., Ильин Л.И.* Оценка агрономической однородности и совместимости почвенного покрова Владимирского ополья // Почвоведение. 2017. № 10. С. 1208–1215.
40. *Шилов П.М., Козлов Д.Н.* Почвенно-агроэкологическая оценка пахотнопригодности земель Валдайской возвышенности по материалам Генерального межевания // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 98. С. 5–36. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-98-5-36](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-5-36).
41. *Ågren A.M., Lidberg W., Strömberg M., Ogilvie J., Arp P.A.* Evaluating digital terrain indices for soil wetness mapping – a Swedish case study // Hydrology and Earth System Sciences. 2014. Vol. 18. No. 9. P. 3623–3634.
42. *Bell J.C., Cunningham R.L., Havens M.W.* Soil drainage class probability mapping using a soil-landscape model. Soil Science Society of America Journal. 1994. Vol. 58. No. 2. P. 464–470.
43. *Bock M., Köthe R.* Predicting the depth of hydrologic soil characteristics. Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie. 2008. Vol. 19. P. 13–22.
44. *Carroll S., Goonetilleke A., Khalil W.A.S., Frost R.* Assessment via discriminant analysis of soil suitability for effluent renovation using undistributed soil columns. Geoderma. 2006. Vol. 131. No. 1–2. P. 201–217.
45. *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 Discussions. 2015. Vol. 8. No. 2. P. 2271–2312.
46. *Debella-Gilo M., Etzelmüller B.* Spatial prediction of soil classes using digital terrain analysis and multinomial logistic regression modeling integrated in GIS: Examples from Vestfold County, Norway // Catena. 2009. Vol. 77. No. 1. P. 8–18.

47. *Florinsky I.* Digital terrain analysis in soil science and geology. Puschino: Academic Press, 2016. 486 p.
48. *Hengl T., Reuter H.I.* Geomorphometry: concepts, software, applications. Amsterdam: Elsevier. 2008. 772 pp.
49. *Jenny H.* Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology. New York: Dover Publications, 1941. 281 p.
50. *Gillin C.P., Bailey S.W., McGuire K.J., Gannon J.P.* Mapping of hydro-pedologic spatial patterns in a steep headwater catchment // Soil Science Society of America Journal. 2015. Vol. 79. No. 2. P. 440–453.
51. *Grabs T., Seibert J., Bishop K., Laudon H.* Modeling spatial patterns of saturated areas: A comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model // Journal of Hydrology. 2009. Vol. 373. No. 1–2. P. 15–23.
52. *Lidberg W., Nilsson M., Ågren A.* Using machine learning to generate high-resolution wet area maps for planning forest management: A study in a boreal forest landscape // Ambio. 2020. Vol. 49. No. 2. P. 475–486.
53. *Malone B.P., McBratney A.B., Minasny B.* Description and spatial inference of soil drainage using matrix soil colours in the Lower Hunter Valley, New South Wales, Australia // PeerJ. 2018. Vol. 6. P. e4659.
54. *McBratney A.B., Santos M.M., Minasny B.* On digital soil mapping. Geoderma. 2003. Vol. 117. No. 1–2. P. 3–52.
55. *Minasny B., McBratney A.B.* Digital soil mapping: A brief history and some lessons // Geoderma. 2016. Vol. 264. P. 301–311.
56. *Møller A.B., Iversen B.V., Beucher A., Greve M.H.* Prediction of soil drainage classes in Denmark by means of decision tree classification // Geoderma. 2019. Vol. 352. P. 314–329.
57. *Odeh I.O.A., McBratney A.B., Chittleborough D.J.* Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model // Geoderma. 1994. Vol. 63. No. 3–4. P. 197–214.
58. *Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V.* Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. 2002. Vol. 107. No. 1–2. P. 1–32.
59. *Thompson J.A., Pena-Yewtukhiw E.M., Grove J.H.* Soil–landscape modeling across a physiographic region: Topographic patterns and model transportability // Geoderma. 2006. Vol. 133. No. 1–2. P. 57–70.
60. *Troeh F.R.* Landform parameters correlated to soil drainage // Soil Science Society of America Journal. 1964. Vol. 28. No. 6. P. 808–812.
61. *Webster R., Burrough P.* A Multiple discriminant analysis in soil survey // European Journal of Soil Science. 1974. Vol. 25, No. 1. P. 120–134.
62. *Weiss A.* Topographic position and landforms analysis // Poster presentation, ESRI user Conference. San Diego, CA, 2001. Vol. 200.

REFERENCES

1. Zvorykina O.B., Burtseva T.I., Vaseka K.T. i dr., *Agroklimaticheskie resursy Vladimirskoi oblasti* (Agroclimatic resources of the Vladimir region), Moscow: Upr. gidrometeorol. sluzhby tsentr. oblastei, 1968, 138 p.
2. Gvozdetskii N.A., Zvorykin K.V. et al, *Agroprirodnoe i sel'skokhozyaistvennoe raionirovanie Nechernozemnoi zony evropeiskoi chasti RSFSR* (Agri-natural and agricultural zoning of Non-Chernozem zone of the European part of the RSFSR), Moscow: Izd-vo MGU, 1987, 270 p.
3. Alifanov V.M., *Serye lesnye pochvy tsentra Russkoi ravniny. Istoriko-geneticheskii analiz* (Gray forest soils in the center of the Russian Plain. Historical and genetic analysis), In: *Evolutsiia i vozrast pochv SSSR* (Evolution and age of soils in the USSR), Pushchino, 1986, pp. 155–162 (232 p.)
4. Alifanov V.M., Gugalinskaia L.A., *Paleokriogenez i struktura pochvennogo pokrova Russkoi ravniny* (Paleocryogenesis and the structure of the soil cover of the Russian Plain), *Pochvovedenie*, 1993, No. 7, pp. 65–75.
5. Alifanov V.M., Loshakova N.A., *Vodnyi rezhim serykh lesnykh pochv* (Water regime of gray forest soils), *Pochvovedenie*, 1981, No. 4, pp. 58–70.
6. Akhromeev L.M., *Priroda, genezis, istoriia razvitiia i landshaftnaia struktura opolii Tsentral'noi Rossii* (The nature, genesis, development history and landscape structure of opolij central Russia), Briansk: RIO Brianskogo gosudarstvennogo universiteta, 2008, 182 p.
7. Velichko A.A., Morozova T.D., Nechaev V.P., Porozhniakova O.M., *Paleokriogenez, pochvennyi pokrov i zemledelie* (Paleocryogenesis, soil cover and agriculture), M.: Izd-vo "Nauka", 1996, 145 p.
8. Gulinova N.V., *Agroklimaticheskie resursy Nechernozemnoi zony RSFSR* (Agroclimatic resources of the Non-Black Earth Zone of the RSFSR), In: *Agrometeorologicheskie usloviia i produktivnost' sel'skogo khoziaistva Nechernozemnoi zony RSFSR* (Agrometeorological conditions and agricultural productivity of the Non-Black Earth Zone of the RSFSR), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978, pp. 17–32.
9. Jongman R.G.G., *Analiz dannykh v ekologii soobshchestv i landshaftov* (Data analysis in community and landscape ecology), Moscow: RASKhN, 1999, 306 p.
10. Dobrovolskii G.V., Urusevskaia I.S., *Geografiia pochv* (Geography of soils), Moscow: Izd-vo MGU, 1984, 416 p.
11. Zaidel'man F.R., *Gidrologicheskii rezhim pochv Nechernozemnoi zony Rossii (geneticheskie, agronomicheskie i meliorativnye aspekty)* (Hydrological regime of soils in the Non-Chernozem zone of Russia (genetic, agronomic and meliorative aspects)), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 328 p.

12. Zaidel'man F.R., *Rezhim i usloviia melioratsii zablochennykh pochv* (Regime and conditions of reclamation of swampy soils), Moscow: Kolos, 1975, 321 p.
13. Egorov V.V., Ivanova E.N., Fridland V.M., *Klassifikatsiia i diagnostika pochv SSSR* (Classification and diagnostics of soils in the USSR), Moscow: Izd-vo "Kolos", 1977, 221 p.
14. Kozlov D.N., Sorokina N.P., *Traditsii i innovatsii v krupnomasshtabnoi pochvennoi kartografii* (Traditions and innovations in the area of the large-scale soil mapping), In: *Tsifrovaya pochvennaya kartografiya: teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya* (Digital soil mapping: theoretical and experimental studies), Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute, 2012, pp. 35–57 (350 p.)
15. V.V. Romanov., *Landshafty Vladimirskoi oblasti: Ch.1. Landshafty Smolensko-Moskovskoi provintsii* (Landscapes of the Vladimir region: Part 1. Landscapes of the Smolensk-Moscow province), Vladimir: Izd-vo Vladim. gos. un-ta, 2008, 56 p.
16. Lipkina G.S., *Vliianie pochvoobrazuiushchikh porod i rel'efa na plodorodie dernovo-podzolistykh pochv Tsentral'nogo raiona Rossii: Avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* (Influence of parent rocks and relief on the fertility of sod-podzolic soils in the Central region of Russia, Extended abstract of cand. agric. sci. thesis), Moscow, 1993, 44 p.
17. Makeev A.O., Dubrovina I.V., *Geografiia, genezis i evoliutsiia pochv Vladimirskogo opol'ia* (Geography, genesis and evolution of soils of the Vladimir opolie), *Pochvovedenie*, 1990, No. 7, pp. 5–25.
18. Minaev N.V., Nikitin A.A., Kozlov D.N., The scale levels identification for the plowland topography organization, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, No. 96, pp. 3–21, DOI: [10.19047/0136-1694-2019-96-3-21](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-96-3-21).
19. Kiriushin V.I., Ivanov A.L., *Model' adaptivno-landshaftnogo zemledeliia Vladimirskogo opol'ia* (Model of adaptive landscape farming of Vladimirskoe opolye), Moscow: "Agrokonsalt", 2004, 456 p.
20. Morev D.V., *Agroekologicheskaiia otsenka zemel' v usloviakh zonal'nogo riada agrolandshaftov s povyshennoi pestrotoi pochvennogo pokrova: Diss. ... kand. biol. nauk* (Agroecological assessment of lands in conditions of a zonal series of agricultural landscapes with increased variegation of soil cover, Cand. biol. sci. thesis), Moscow, 2017, 137 p.
21. Nikolaev V.A., *Paragenezis polesii-opolii Tsentral'noi Rossii* (Paragenesis of forested lowlands (polesye) and high plains (opolye) in central Russia), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Geografiia*, 2013, No. 5, pp. 45–50.
22. Fridland V.M., Mikhailova R.P., *Pochvennyi pokrov Nechernozem'ia i ego ratsional'noe ispol'zovanie* (Soil cover of the Non-Chernozem Region and its rational use), Moscow: Agropromizdat, 1986, 245 p.

23. *Pochvy i rekomendatsii po ikh ispol'zovaniuu Vladimirskoi gosudarstvennoi oblastnoi sel'skokhoziaistvennoi opytnoi stantsii Suzdal'skogo raiona Vladimirskoi oblasti* (Soils and recommendations for their use of the Vladimir State Regional Agricultural Experimental Station of the Suzdal District of the Vladimir Region), Vladimir: Tsentrgiprozem (Vladimirskii filial), 1991, 65 p.
24. Prokhorova Z.A., Sorokina N.P., Vliianie komponentov elementarnoi struktury dernovo-podzolistykh pochv na produktivnost' sel'skokhoziaistvennykh rastenii (Influence of the components of the elementary structure of sod-podzolic soils on the productivity of agricultural plants), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 1975, No. 8, pp. 178–190.
25. Puzachenko Yu.G., *Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyakh* (Mathematical methods in environmental and geographical researches), Moscow: Izd-vo "Akademiya", 2004, 416 p.
26. Puzachenko M.Yu., Puzachenko Yu.G., Kozlov D.N., Fedyaeva M.V., Kartografirovaniye moshchnosti organogenogo i gumusovogo gorizontov lesnykh pochv i bolot yuzhnotaiezhnogo landshafta (yugo-zapad Valdaiskoi vozvyshehnosti) na osnove trekhmernoii modeli rel'efa i distantsionnoi informatsii (landsat 7) (The mapping of the thickness of organic matter and humus horizons of soils and bogs in the southern taiga (Valdai hills) on the basis of digital elevation model and remote sensing data (Landsat-7)), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 4, pp. 70–79.
27. Romanova T.A., Vodnyi rezhim v geneticheskoi kharakteristike pochv gumidnoi zony (Water regime in the genetic characteristics of soils in the humid zone), *Pochvovedenie*, 1994, No. 4, pp. 32–39.
28. Rubliuk M.V., *Rol' kholmisto-morennogo rel'efa v formirovaniu svoistv dernovo-podzolistykh pochv i urozhainosti kartofelia v usloviyakh Tsentral'nogo raiona Nechernozemnoi zony RF: Diss. ... kand. s-kh. nauk* (The role of hilly-moraine relief in the formation of the properties of sod-podzolic soils and potato productivity in the Central Region of the Non-Chernozem Zone of the Russian Federation, Cand. agric. sci. thesis), Tver, 2003, 177 p.
29. Rubtsova L.P., O genezise pochv Vladimirskogo opol'ia (On the genesis of the soils of the Vladimir opolye), *Pochvovedenie*, 1974, No. 6, pp. 1–27.
30. Savastru N.G., *Agroekologicheskaya otsenka pochvennogo pokrova Vladimirskogo opol'ia dlia proektirovaniia adaptivno-landshaftnykh sistem zemledeliia: Diss. ... kand. biol. nauk* (Agroecological assessment of the soil cover of the Vladimir opolye for the design of adaptive landscape farming systems, Cand. biol. sci. thesis), Moscow, 1999, 169 p.
31. Savin I.Iu., Zhogolev A.V., Prudnikova E.Iu., Sovremennyye trendy i problemy pochvennoi kartografii (Modern trends and problems of soil mapping), *Pochvovedenie*, 2019, No. 5, pp. 517–528.

32. Simakova M.S., Elementarnye pochvennye struktury Vladimirskogo opolya (Elementary soil structures of the Vladimir opolye), In: *Pochvy SSSR. Printsipy i genetiko-geograficheskie aspekty issledovaniia* (Soils of the USSR. Principles and genetics-geographic aspects of research), Moscow: Pochv. in-t im. V.V. Dokuchaeva, 1987, pp. 50–56.
33. Sorokina N.P., Mikroneodnorodnost' pochvennogo pokrova polei i ee sel'skokhoziaistvennoe znachenie (Micro-heterogeneity of the soil cover of fields and its agricultural significance), In: *Pochvy Moskovskoi oblasti i ikh ispol'zovanie* (Soils of the Moscow region and their use), Moscow: Pochv. in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2002, pp. 277–311.
34. Sysuev V.V., Morfometricheskii analiz geofizicheskoi differentsiatsii landshaftov (Morphometric analysis of geophysical differentiation of landscapes), *Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Serii geograficheskaiia*, 2003, No. 4, pp. 36–50.
35. Tiuriukanov A.N., Bystritskaia T.L., *Opol'ia Tsentral'noi Rossii i ikh pochvy* (Opolyes of Central Russia and their soils), Moscow: Nauka, 1971, 240 p.
36. Satalkin A.I., Zhiron A.A., Ogleznev A.K., Shilova M.S., Nogina N.A., Romanova T.V., Zaks V.G., Fedorin Yu.V., Friev T.A., Ksenofontova V.A., *Ukazaniya po diagnostike podzolistogo i bolotno-podzolistogo tipov pochv po stepeni ogleenosti* (Guidelines for the diagnosis of podzolic and bog-podzolic soil types according to the degree of gleying), Moscow: Kartfilial Roszemproekta, 1982, 10 p.
37. Gvozdetskii N.A., Zhuchkova V.K., *Fiziko-geograficheskoe raionirovanie Nechernozemno tsentra* (Physical and geographical zoning of the Non-Chernozem Center), Moscow: Izd-vo MGU, 1963, 451 p.
38. Florinskii I.V., Gipoteza Dokuchaeva kak osnova tsifrovogo prognoznogo pochvennogo kartografirovaniia (k 125-letiiu publikatsii) (The Dokuchaev hypothesis as a basis for predictive digital soil mapping (on the 125th anniversary of its publication)), *Pochvovedenie*, 2012, No. 4, pp. 500–506.
39. Shein E.V., Kiriushin V.I., Korchagin A.A., Mazirov M.A., Dembovetskii A.V., Il'in L.I., Otsenka agronomicheskoi odnorodnosti i sovместimosti pochvennogo pokrova Vladimirskogo opol'ia (Assessment of agronomic uniformity and compatibility of the soil cover of the Vladimir opolye), *Pochvovedenie*, 2017, No. 10, pp. 1208–1215.
40. Shilov P.M., Kozlov D.N., Soil-agro-ecological assesment of the arable land of the Valdai upland based on the general survey, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, Vol. 98, pp. 5–36, DOI: [10.19047/0136-1694-2019-98-5-36](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-5-36).
41. Ågren A.M., Lidberg W., Strömgren M., Ogilvie J., Arp P.A., Evaluating digital terrain indices for soil wetness mapping – a Swedish case study, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, Vol. 18, No. 9, pp. 3623–3634.

42. Bell J.C., Cunningham R.L., Havens M.W., Soil drainage class probability mapping using a soil-landscape model, *Soil Science Society of America Journal*, 1994, Vol. 58, No. 2, pp. 464–470.
43. Bock M., Köthe R., Predicting the depth of hydrologic soil characteristics, *Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie*, 2008, Vol. 19, pp. 13–22.
44. Carroll S., Goonetilleke A., Khalil W.A.S., Frost R., Assessment via discriminant analysis of soil suitability for effluent renovation using undistributed soil columns, *Geoderma*, 2006, Vol. 131, No. 1–2, pp. 201–217.
45. 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 Discussions*, 2015, Vol. 8, No. 2, pp. 2271–2312.
46. Debella-Gilo M., Etzelmüller B., Spatial prediction of soil classes using digital terrain analysis and multinomial logistic regression modeling integrated in GIS: Examples from Vestfold County, Norway, *Catena*, 2009, Vol. 77, No. 1, pp. 8–18.
47. Florinsky I., *Digital terrain analysis in soil science and geology*, Puschino, Academic Press, 2016, 486 p.
48. Hengl T., Reuter H.I., *Geomorphometry: concepts, software, applications*, Amsterdam, Elsevier, 2008, 772 p.
49. Jenny H., *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*, New York, Dover Publications, 1941, 281 p.
50. Gillin C.P., Bailey S.W., McGuire K.J., Gannon J.P., Mapping of hypopedologic spatial patterns in a steep headwater catchment, *Soil Science Society of America Journal*, 2015, Vol. 79, No. 2, pp. 440–453.
51. Grabs T., Seibert J., Bishop K., Laudon H., Modeling spatial patterns of saturated areas: A comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model, *Journal of Hydrology*, 2009, Vol. 373, No. 1–2, pp. 15–23.
52. Lidberg W., Nilsson M., Ågren A., Using machine learning to generate high-resolution wet area maps for planning forest management: A study in a boreal forest landscape, *Ambio*, 2020, Vol. 49, No. 2, pp. 475–486.
53. Malone B.P., McBratney A.B., Minasny B., Description and spatial inference of soil drainage using matrix soil colours in the Lower Hunter Valley, New South Wales, Australia, *PeerJ*, 2018, Vol. 6, pp. e4659.
54. McBratney A.B., Santos M.M., Minasny B., On digital soil mapping, *Geoderma*, 2003, Vol. 117, No. 1–2, pp. 3–52.
55. Minasny B., McBratney A.B., Digital soil mapping: A brief history and some lessons, *Geoderma*, 2016, Vol. 264, pp. 301–311.

56. Møller A.B., Iversen B.V., Beucher A., Greve M.H., Prediction of soil drainage classes in Denmark by means of decision tree classification, *Geoderma*, 2019, Vol. 352, pp. 314–329.
57. Odeh I.O.A., McBratney A.B., Chittleborough D.J., Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model, *Geoderma*, 1994, Vol. 63, No. 3–4, pp. 197–214.
58. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V., Fundamental quantitative methods of land surface analysis, *Geoderma*, 2002, Vol. 107, No. 1–2, pp. 1–32.
59. Thompson J.A., Pena-Yewtukhiw E.M., Grove J.H., Soil–landscape modeling across a physiographic region: Topographic patterns and model transportability, *Geoderma*, 2006, Vol. 133, No. 1–2, pp. 57–70.
60. Troeh F.R., Landform parameters correlated to soil drainage, *Soil Science Society of America Journal*, 1964, Vol. 28, No. 6, pp. 808–812.
61. Webster R., Burrough P. A., Multiple discriminant analysis in soil survey, *European Journal of Soil Science*, 1974, Vol. 25, No. 1, pp. 120–134.
62. Weiss A., Topographic position and landforms analysis, *Poster presentation*, ESRI user Conference, San Diego, CA, 2001, Vol. 200.