

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-5-38



### Ссылки для цитирования:

Козлов Д.Н., Лозбенев Н.И., Левченко Е.А. Почвенные комбинации как объект цифровой почвенной картографии: лесостепь Окско-Донской низменности // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 127. С. 5-38. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-5-38

### Cite this article as:

Kozlov D.N., Lozbenev N.I., Levchenko E.A., Soil combinations as an object of digital soil mapping: forest-steppe of the Oka-Don lowland, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 127, pp. 5-38, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-5-38

### Благодарность:

Работа выполнена в рамках Государственного Задания Минобрнауки России на тему “Оптимизация сельскохозяйственного землепользования по экологическим и экономическим условиям в контексте современных вызовов” (НИОКТР № 125042105332-2).

### Acknowledgments:

The studies were carried out within the framework of State assignment of the Ministry of Education and Science of Russia on the topic “Optimization of agricultural land use under environmental and economic conditions in the context of modern challenges” (NIOKTR No. 125042105332-2).

## Почвенные комбинации как объект цифровой почвенной картографии: лесостепь Окско-Донской низменности

© 2026 г. Д. Н. Козлов<sup>\*</sup>, Н. И. Лозбенев<sup>\*\*</sup>, Е. А. Левченко<sup>\*\*\*</sup>

ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,  
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

<sup>\*</sup><https://orcid.org/0000-0003-0103-0300>, e-mail: [Kozlov\\_DN@esoil.ru](mailto:Kozlov_DN@esoil.ru),

<sup>\*\*</sup><https://orcid.org/0000-0003-0377-3124>, e-mail: [nlozbenev@mail.ru](mailto:nlozbenev@mail.ru),

<sup>\*\*\*</sup><https://orcid.org/0009-0000-7865-9807>, e-mail: [novichkova.ea@mail.ru](mailto:novichkova.ea@mail.ru).

Поступила в редакцию 06.01.2026, после доработки 08.01.2026,  
принята к публикации 27.01.2026

**Резюме:** На примере участка Битюго-Савала-Цнинского междуречья Окско-Донской низменности площадью 0.5 млн га показаны

возможности цифрового картографирования компонентного состава микроструктур почвенного покрова лесостепной зоны. Слабопересеченный рельеф междуречья и породы с низкой фильтрационной способностью определили условия затрудненного поверхностного и внутрипочвенного стока и, как следствие, преобладание в структуре почвенного покрова полугидроморфных и гидроморфных почв черноземного ряда с участием солонцовых почв на северной границе их ареала. Особенности почвенного покрова региона выражены зависимостью долевого участия почв в составе почвенных комбинаций от морфологических особенностей мезорельефа как ведущего фактора их организации. Разнообразие почв и их внутриландшафтная изменчивость определены массивом 2 200 почвенных описаний 12 типов/подтипов почв. Наиболее значимые факторы их пространственной организации – крутизна склонов ( $^{\circ}$ ), относительные превышения в окрестности 2 000 м (м), превышения над базисом эрозии (м), соотношение длины и крутизны склонов (LS-фактор), отношение водосборной площади к локальной крутизне (TWI), глубина (м) и плотность (га/100 га) замкнутых понижений. Региональное разнообразие почвенного покрова сведено к десяти типам микроструктур с учетом их компонентного состава. Сравнение их границ с содержанием архивных материалов почвенного обследования показало сопоставимость и преимущества цифровой модели организации почвенного покрова по сравнению с региональным обобщением крупномасштабных почвенных карт землепользований (юг Тамбовской области). Используемый подход представляется перспективным для решения фундаментальных и прикладных задач, связанных с изучением и инвентаризацией почвенного покрова как компонента ресурсного потенциала сельскохозяйственного землепользования.

**Ключевые слова:** структура почвенного покрова; почвенно-ландшафтные связи; черноземы; лугово-черноземные почвы; солонцы; фонд данных; землеустройство.

## **Soil combinations as an object of digital soil mapping: forest-steppe of the Oka-Don lowland**

© 2026 D. N. Kozlov\*, N. I. Lozbenev\*\*, E. A. Levchenko\*\*\*

*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,  
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,*

*\*<https://orcid.org/0000-0003-0103-0300>, e-mail: [Kozlov\\_DN@esoil.ru](mailto:Kozlov_DN@esoil.ru),*

\*\*<https://orcid.org/0000-0003-0377-3124>, e-mail: [nlozbennev@mail.ru](mailto:nlozbennev@mail.ru),  
\*\*\*<https://orcid.org/0009-0000-7865-9807>, e-mail: [novichkova.ea@mail.ru](mailto:novichkova.ea@mail.ru).

Received 06.01.2026, Revised 08.01.2026, Accepted 27.01.2026

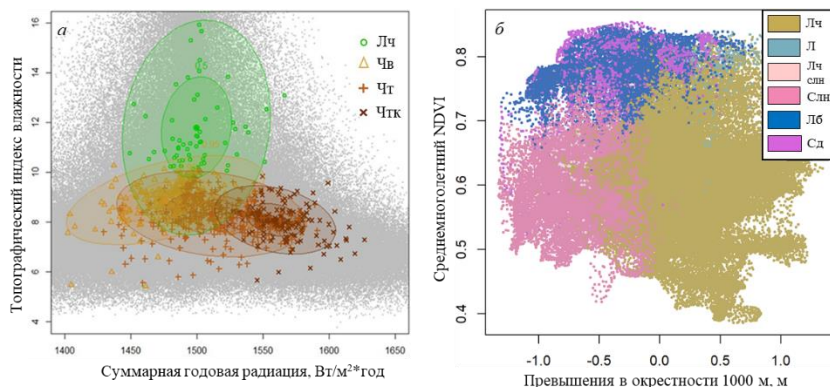
**Abstract:** A 0.5 million-hectare study area of the Bityug-Saval-Tsna interfluvium of the Oka-Don lowland demonstrates the potential of digital mapping of soil combinations in the forest-steppe zone. The gently rugged topography of the interfluvium and deposits with low permeability have resulted in restricted surface and subsurface runoff, leading to a predominance of semi-hydromorphic and hydromorphic chernozem soils in the soil structure, with some solonchaks at the northern boundary of their range. The region's soil cover characteristics are expressed by the dependence of the proportion of soils in soil combinations on the morphological features of the mesorelief, which is the leading factor in their organization. Soil diversity and intra-landscape variability are determined by a set of 2,200 soil descriptions of 12 soil types/subtypes. The most significant factors of their spatial organization are slope steepness ( $^{\circ}$ ), topographic position index with radius 2,000 m (m), channel network base level (m), LS-factor, topographic wetness index (TWI), depth (m), and density (ha/100 ha) of closed depressions. Regional soil cover diversity is reduced to ten types of soil combinations, taking into account their component composition. A comparison of their boundaries with the contents of archival soil survey data demonstrated the comparability and advantages of the digital soil cover organization model compared to a regional generalization of large-scale soil maps of land use (southern Tambov Oblast). The approach used appears promising for solving fundamental and applied problems related to the study and inventory of soil cover as a component of the resource potential of agricultural land use.

**Keywords:** soil cover structure; soil-landscape relationships; chernozems; meadow-chernozem soils; solonchaks; data fund; land management.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие цифровых технологий пространственного анализа открыло новые возможности содержательного анализа почвенно-ландшафтных связей как основы картографирования почвенного покрова (McBratney et al., 2003; Minasni, McBratney, 2016; Савин, 2025). Суть анализа заключается в поиске наилучшей зависимости пространственной изменчивости почвенных классов, либо отдельных почвенных свойств от факторов почвообразования, охарактеризованных по элементам регулярной сетки. В многочисленных исследованиях показано, что соответствие почв и факторов почво-

образования никогда не бывает однозначным (Bishop et al., 2006; Malone et al., 2011). Обычно к источникам неопределенности почвенно-ландшафтных связей относят неполный учет факторов почвообразования и масштаба их проявления, ограничения использованных методов моделирования, неточности источников пространственной информации и их совмещения в процессе анализа (Vermeulen, Niekerk, 2017). Их совокупное влияние выражается в наблюдении в локальной области признакового пространства (рис. 1) разных почвенных классов или значений почвенных свойств (Kozlov et al., 2017; Smirnova et al., 2025). Снижение неопределенности связывается с расширением состава картографической модели, повышении детальности ковариат, сгущении сети почвенного опробования, использованием прогрессивных методов моделирования (Scarpone et al., 2016).



**Рис. 1.** Примеры положения почв лесостепи в пространстве наиболее значимых топографических факторов их дифференциации: (а) Среднерусская возвышенность (Kozlov et al., 2017); серые точки – область всех значений атрибутов; (б) Окско-Донская низменность (Smirnova et al., 2025).

**Fig. 1.** The position of soils in the feature space of the most significant topographic indexes: (a) soils in the space of the topographic wetness index and total annual radiation (Kozlov et al., 2017); gray dots are the area of all attribute values; (b) soils in the space of the topographic position index with radius 1,000 m and average long-term values of the NDVI indicator (Smirnova et al., 2025).

Однако помимо методических и технических источников неопределенности “наггет-эффект” почвенно-ландшафтных связей сопряжен с естественной комплексностью почвенного покрова, из-за чего каждый пиксель на местности соответствует комбинации двух и более почв (Сорокина, Козлов, 2009; Козлов, Сорокина, 2012; Козлов и др., 2019). Снижение неопределенности почвенной карты в таком случае невозможно без повышения детальности ковариат, определяющих или отражающих почвенное варьирование. При значительном охвате территории повышение детальности ковариат часто экономически не оправданно. Кроме того, изменчивость почв может не иметь адекватной ландшафтной индикации в условиях конкретного региона, например, при рассогласовании почвенно-ландшафтных связей в результате агрогенной трансформации микрорельефа (Минаев и др., 2019).

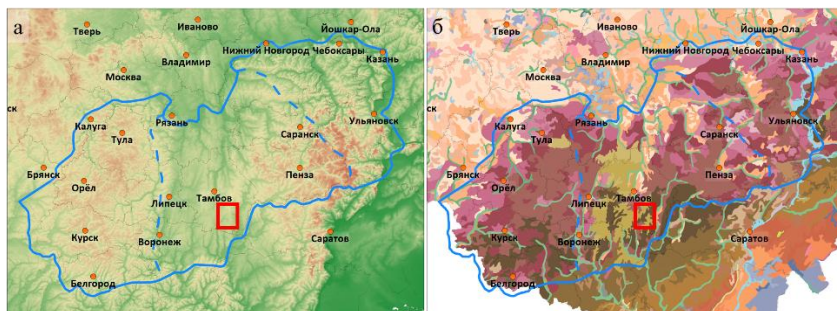
Развитие русской почвенно-картографической школы второй половины XX в. связано с концепцией структуры почвенного покрова (Фридланд, 1976). Согласно этому учению, почвенный покров имеет иерархическую организацию и в зависимости от масштаба исследования объектом картографирования служат разные единицы. В крупном масштабе это комбинации 2–4 почв и крупные элементарные почвенные ареалы (ЭПА), соизмеримые с элементами мезорельефа. Предметом исследований почвенных комбинаций (ПК) являются их компонентный состав, геометрическая форма и характер границ. Отражение в каждой картографической единице не только доминантных, но и сопутствующих компонентов, повышает информативность карт при инвентаризации, мониторинге и рациональном использовании земельных ресурсов.

Цель статьи – развить методы цифрового картографирования состава почвенных комбинаций (Сорокина, Козлов, 2009; Kozlov et al., 2018) на примере почвенного покрова междуречных равнин, приводораздельных и прибалочных склонов северной лесостепи Окско-Донской низменности Русской равнины.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследованиями охвачен участок Битюго-Савала-Цнинского междуречья Окско-Донской низменности площадью 0.5 млн га,

строение которого способствует широкому распространению переувлажненных земель (рис. 2, 3). Вторичная эрозионная равнина с перепадом высот 100 м имеет слабую горизонтальную расчлененность – менее 0.5 км/км<sup>2</sup>. Крутизна фоновых междуречий до 1°, придолинных склонов до 5°. Центральные, слабо дренированные части междуречий усеяны многочисленными округлыми понижениями термокарстового и суффозионного происхождения, достигающими в диаметре 500 м и глубины до 3 м (Мильков, 1976; Самойлова, 1981; Величко, 1996). Кроме того, встречаются плоские, неглубокие (0.5–1 м) чашеобразные понижения с линзами засоленных грунтовых вод.

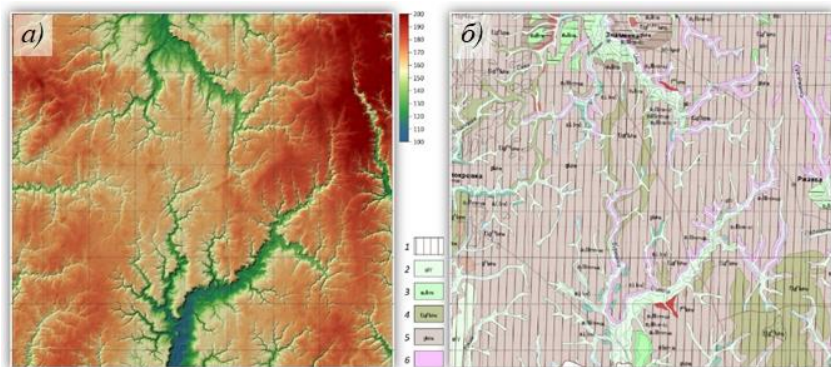


**Рис. 2.** Участок Битюго-Савало-Цнинского междуречья (красный контур) на фоне: **а** – рельефа Среднерусской лесостепной провинции природно-сельскохозяйственного районирования (1983, синий контур); **б** – типа/подтипа почв ЕГРПР (2013).

**Fig. 2.** The study area of the Bityug-Savalo-Tsna interfluve (red outline) on the background of: **a** – the topography of the Central Russian forest-steppe province of natural and agricultural zoning (1983, blue outline); **b** – the soil type/subtype of the Unified State Register of Natural Resources (EGRPR) (2013).

Моренные равнины, песчаные долинные зандры, третья и четвертые надпойменные террасы долин Цны, Битюга и Савалы перекрыты толщей субаэральных суглинков и глин, мощностью от 10 м в центральных частях междуречий до первых метров и

меньше в долинах. Пойменные отложения преимущественно тяжелого гранулометрического состава (рис. 3).



**Рис. 3.** Литолого-геоморфологические особенности Битруг-Савала-Цнинского междуречья Окско-Донской низменности: (а) рельеф, (абсолютная высота, м); (б) фрагмент геологической карты четвертичных отложений (1998, М 1 : 500 000): 1 – нерасчлененный комплекс субазальных образований, делювиальных отложений; 2 и 3 – аллювиальные отложения пойм и террас; 4 – водно-ледниковые пески времени отступления ледника до 7 м, 5 – ледниковые валунные суглинки до 50 м; 6 – дочетвертичные отложения.

**Fig. 3.** Lithological and geomorphological features of the Bitrug-Saval-Tsna interfluve of the Oka-Don Lowland: (а) topography, (б) fragment of the geological map of Quaternary deposits (1998, Scale 1 : 500 000): 1 – undifferentiated complex of subaerial formations, deluvial deposits; 2 and 3 – alluvial deposits of floodplains and terraces; 4 – fluvioglacial sands of the glacier retreat time up to 7 m, 5 – glacial boulder loams up to 50 m; 6 – pre-Quaternary deposits.

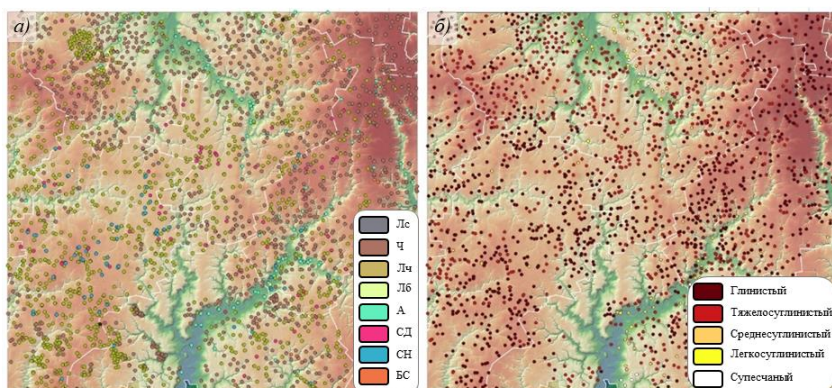
Участок частично или полностью охватывает 7 районов Тамбовской области: Сямпурский, Знаменский, Ржаксинский, Рассказовский, Жердевский, Токаревский, Мордовский и Уваровский. Общая его площадь 630 тыс. га, из них пашни – 491 тыс. га или 73% площади, а всего земель сельскохозяйственного назначения 564 тыс. га (84% площади). Участки лесной и луговой растительности сохранились лишь вокруг понижений и внутри них, а также

на участках с засоленными почвами. Днища крупных западин заняты осоково-кочкарными болотами, а их склоны – осинниками. В мелких западинах преобладают осоково-разнотравные луга. В засоленных западинах наблюдается разреженная растительность с преобладанием злаково-разнотравно-полынных сообществ.

Характеристика почв получена из архивных материалов крупномасштабного почвенного обследования государственного фонда данных землеустройства (ГФДЗ, рис. 4). С почвенных карт хозяйств определено положение 2 тыс. опорных разрезов с факторно-генетической диагностикой почв до уровня вида по классификации почв СССР (1977, рис. 4). Для 1 тыс. из них из почвенных очерков получены аналитические характеристики органо-аккумулятивного горизонта: мощность горизонта (см), содержание гумуса (%), доля физической глины (%). Почвы с небольшим объемом выборки были объединены с близкими по генезису таксонами (табл. 1). Так, темно-серые лесные почвы были отнесены к черноземам выщелоченным, лугово-болотные к влажно-луговым, а солонцы лугово-черноземные объединены с солонцами черноземно-луговыми. Кроме того, использовано более 200 собственных полевых описаний почв с агрохимической характеристикой, полученных в 2018-2024 годах.

По встречаемости на уровне типа почвы опорных разрезов образуют ряд (рис. 4а): серые лесные (22) – черноземы (1115) – лугово-черноземные (673) – луговые (173) – аллювиальные (102) – солонцы (74) – солоды (65). На уровне подтипа черноземы типичные (793) и лугово-черноземные (673) почвы встречаются чаще черноземов выщелоченных (464). Почвы глинистого состава (1211) преобладают над тяжелосуглинистыми (946) и среднесуглинистыми (88, рис. 4б).

По проявлению негативных процессов встречаются почвы: эродированные – слабосмытые (84) и среднесмытые (24); оглеенные – глубокооглеенные (58), глееватые (152) и глеевые (40); солонцы – корковые (24), мелкие (22), средние (20) и глубокие (9); засоленные – солончаковые (29), солончаковатые (15) и солонцеватые (82).



**Рис. 4.** Типы почв (*а*; индексами обозначены: Лс – серые лесные, Ч – черноземы, Лч – лугово-черноземные, Лб – луговые (лугово-болотные), А – аллювиальные, СД – солоды, СН – солонцы, БС – почвы балочных склонов) и группы их гранулометрического состава по Качинскому (*б*) по массиву опорных разрезов архивных материалов крупномасштабного почвенного обследования 1970–1995 гг.

**Fig. 4.** Soils types (*a*; indexes are indicated: Лс – gray forest, Ч – chernozems, Лч – meadow-chernozem, Лб – meadow-fog, А - alluvial, СД – malt, СН – solonetz, БС – soils of girder slopes) and groups of granulometric composition of organo-accumulative horizon according to Katchynski (*b*), according to the array of reference sections of archival materials from a large-scale soil survey of 1970–1995.

Диагностическими показателями почв в региональной модели почвенно-ландшафтных связей (ПЛС) выступали таксоны почв на уровне подтипа (табл. 1). Были исключены редко встречающиеся серые лесные почвы, положение которых в ландшафтах региона не ясно. Отдельно моделировалась степень проявления водной эрозии по выборке почв: Э0 – не смытые, Э1 – слабо-, Э2 – среднесмытые.

В условиях однородных почвообразующих пород ведущим фактором дифференциации почвенного покрова междуречий выступает рельеф.

**Таблица 1.** Почвы обучающей выборки

**Table 1.** Soils of the training sample of the soil-landscape relationships model

| Тип/<br>Подтип<br>почв <sup>1</sup>      | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                          | 332  | 333  | 342  | 371  | 372  | 731  | 732  | 761  | 763  | 832  | 931  | 932  |
|                                          | Чв   | Чт   | Лч   | Л    | ВЛ   | СДлс | СДл  | СНлч | СНлб | Ал   | БС   | АД   |
| Число<br>точек и их<br>доля в<br>выборке | 491  | 739  | 935  | 153  | 38   | 24   | 45   | 63   | 12   | 82   | 31   | 20   |
|                                          | 0.19 | 0.28 | 0.36 | 0.06 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 0.01 |
| Доля в<br>модели <sup>2</sup>            | 0.19 | 0.29 | 0.22 | 0.12 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.06 | 0.01 | 0.01 |
| Почвы на<br>картах <sup>3</sup>          |      |      | ЛЧ   | ЧЛ   |      |      | ПГЭ  |      |      |      |      |      |

**Примечание.** <sup>1</sup> Чв – чернозем выщелоченный, Чт – чернозем типичный, Лч – лугово-черноземная, Л – луговая, ВЛ – влажно-луговая, СДлс – солодь лугово-степная, СДл – солодь луговая, СНлч – солонец лугово-черноземный, СНлб – солонец лугово-болотный, Ал – аллювиальная, БС – почвы балочных склонов, АД – аллювиально-делювиальные почвы днищ оврагов и балок;

<sup>2</sup> априорная вероятность встречи почвы на модельном участке;

<sup>3</sup> почвы легенды архивных карт интерпретированы как: луговато-черноземные (ЛЧ) как Лч (код 342), черноземно-луговые (ЧЛ) как Л (код 371); серые лесные поверхностно-глеево-элювиальные (ПГЭ) как почвы западного комплекса.

**Note.** <sup>1</sup> Чв – leached chernozem, Чт – typical chernozem, Лч – meadow-chernozem, Л – meadow, ВЛ – wet-meadow, СДлс – meadow-steppe solod, СДл – meadow solod, СНлч – meadow-chernozem solonetz, СНлб – meadow-marsh solonetz, Ал – alluvial, БС – gully slope soils, АД – alluvial-deluvial soils of ravine and gully bottoms;

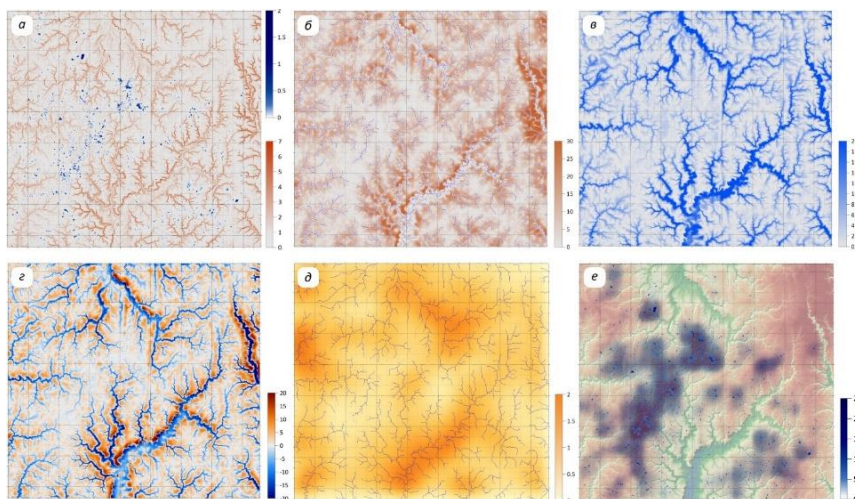
<sup>2</sup> a priori probability of soil occurrence on the model plot;

<sup>3</sup> the soils of the legacy maps are interpreted as: meadow-chernozems as Лч (code 342), chernozem-meadow as Л (code 371); gray forest surface-gley-eluvial as soils of the depression complex.

Его характеристика дана по ЦМР с шагом 20 м (рис. 3а), построенной по высотным отметкам топографической карты с основным сечением горизонталей 2.5 м (Koshel, 2012). В программе SAGA (Conrad et al., 2015) произведен расчет более 20 морфометриче-

ских величин (рис. 5), определяющих условия почвообразования: 1) локальное перераспределение стока между вогнутыми и выпуклыми элементами рельефа: индекс относительных первышений в локальной окрестности XX м ( $tpi_{XX}$ , м), глубина ( $cd\_m$ , м; рис. 5а) и плотность ( $cd\_dn$ , га/100 га; рис. 5е) замкнутых понижений; 2) региональное перераспределение стока по элементам овражно-балочной и речной сети: индекс относительных первышений в региональной окрестности XXX м ( $tpi_{XXX}$ , м; рис. 5г), площадь водосбора ( $tca$ ), топографический индекс влажности ( $twi$ ), густота эрозионного расчленения ( $er\_dn$ , км/км<sup>2</sup>; рис. 5д); 3) скорость миграционных потоков: крутизна склонов ( $slp$ , °; рис. 5а), эрозионный фактор рельефа ( $lsf$ ); 4) поле инсоляции с учетом крутизны и экспозиции склонов ( $ins$ ); 5) режим почвенно-грунтовых вод, поверхностного и подземного стока: превышение над водотоком ( $cnd\_m$ ; рис. 5б); глубина долин ( $cd\_dn$ , м; рис. 5в). С учетом детальности исходных топографических карт и размера элемента ЦМР 20 × 20 м морфометрические величины характеризуют состояние земной поверхности с размерами 60 × 60 м. Такой охват позволяет воспроизвести лишь особенности мезо- и макро-рельефа, что отвечает задаче отражения топографических условий формирования элементарных почвенных структур (Фридланд, 1976; Hole, Campbell, 1985).

Для моделирования отношений почва =  $f$  (топографические факторы почвообразования) использовался пошаговый дискриминантный анализ (Webster, Burrough, 1974; Bell et al., 1992). Анализ позволяет ранжировать топографические факторы по их вкладу в объяснение пространственной изменчивости таксонов почв и рассчитать условные вероятности встречаемости почв в соответствии с нормальной функцией распределения. Последующий анализ этих вероятностей позволяет получить для каждого пикселя: 1) определенность прогноза (как величину максимальной вероятности из всех возможных); 2) наиболее вероятный таксон почв; 3) типы сочетания наиболее вероятного состояния с двумя или тремя сопутствующими. Карта наиболее вероятного состояния демонстрирует ареалы доминирующего таксона почв (Qi, Zhu, 2011) и карта типов сочетаний доминирующих и сопутствующих почв – ареалы их почвенных комбинаций (Сорокина, Козлов, 2009).



**Рис. 5.** Избранные морфометрические характеристики Битюго-Савало-Цнинского междуречья: *a* – крутизна (°) и глубина замкнутых понижений (м); *b* – превышение над водотоком (м); *v* – глубина долин (м); *z* – относительные превышения в окрестности 2000 м (м); *d* – густота эрозионного расчленения (км/км<sup>2</sup>); *e* – плотность западин (га/100 га).

**Fig. 5.** Several morphometric characteristics of the Bityug-Savalo-Tsna interfluve: *a* – slope steepness (°) and depth of closed depressions (m); *b* – elevation above the watercourse (m); *v* – depth of valleys (m); *z* – topographic position index with radius of 2,000 m (m); *d* – density of erosional dissection (km/km<sup>2</sup>); *e* – density of closed depressions (ha/100 ha).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В признаковом пространстве модели (табл. 2, 3) наиболее изолированы области почв балочных склонов (91%), аллювиально-делювиальных (63%) и аллювиальных (84%). Почвы междуречий из-за комплексности почвенного покрова не имеют собственной изолированной области. Точность их однозначного прогноза ниже.

Фоновые почвы междуречий – черноземы типичные (55%) и лугово-черноземные (73%). Они встречаются в сочетаниях и комбинациях с черноземами выщелоченными (13%), луговыми (12%),

влажно-луговыми почвами (7%) и солонцами лугово-черноземными (24%) и лугово-болотными (1%). Другую группу почвенных комбинаций образуют почвы западинного комплекса – солоды лугово-степные (44%) и луговые (38%); луговые, влажно-луговые с солонцами лугово-черноземными и лугово-болотными.

**Таблица 2.** Точность предсказания таксонов почв в модели почвенно-ландшафтных связей

**Table 2.** Accuracy of prediction of soil taxa in the soil-landscape relationships model

|                       | Почвы обучающей выборки * |     |     |     |     |    |      |     |      |      |    |    |    |
|-----------------------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|----|------|-----|------|------|----|----|----|
|                       | Почва                     | Чв  | Чт  | Лч  | Л   | ВЛ | СДлс | СДл | СНлч | СНлб | Ал | БС | АД |
| Предсказанные моделью | N                         | 491 | 739 | 935 | 153 | 38 | 24   | 45  | 63   | 12   | 82 | 31 | 20 |
|                       | Чв                        | 66  | 61  | 29  | 0   | 0  | 0    | 0   | 0    | 0    | 0  | 0  | 0  |
|                       | Чт                        | 221 | 405 | 124 | 3   | 0  | 0    | 3   | 3    | 0    | 0  | 3  | 0  |
|                       | Лч                        | 192 | 261 | 679 | 92  | 13 | 5    | 8   | 26   | 0    | 3  | 0  | 0  |
|                       | Л                         | 3   | 5   | 34  | 18  | 5  | 0    | 3   | 8    | 5    | 0  | 0  | 0  |
|                       | ВЛ                        | 0   | 0   | 8   | 8   | 3  | 0    | 0   | 0    | 0    | 3  | 0  | 3  |
|                       | СДлс                      | 0   | 0   | 11  | 3   | 0  | 11   | 13  | 3    | 0    | 0  | 0  | 0  |
|                       | СДл                       | 0   | 0   | 3   | 5   | 5  | 8    | 16  | 3    | 0    | 0  | 0  | 0  |
|                       | СНлч                      | 0   | 3   | 26  | 16  | 5  | 0    | 0   | 16   | 5    | 0  | 0  | 0  |
|                       | СНлб                      | 0   | 0   | 5   | 0   | 0  | 0    | 0   | 0    | 2    | 0  | 0  | 0  |
|                       | Ал                        | 3   | 3   | 11  | 8   | 5  | 0    | 0   | 5    | 3    | 68 | 0  | 5  |
|                       | БС                        | 5   | 5   | 5   | 0   | 0  | 0    | 0   | 0    | 0    | 0  | 26 | 0  |
|                       | АД                        | 0   | 0   | 0   | 0   | 0  | 0    | 0   | 0    | 0    | 8  | 0  | 13 |
| Точность, %           |                           | 13  | 55  | 73  | 12  | 7  | 44   | 38  | 25   | 10   | 84 | 91 | 63 |

**Примечание.** \* Чв – чернозем выщелоченный, Чт – чернозем типичный, Лч – лугово-черноземная почва, Л – луговая, ВЛ – влажно-луговая, СДлс – солодь лугово-степная, СДл – солодь луговая, СНлч – солонец лугово-черноземный, СНлб – солонец лугово-болотный, Ал – аллювиальная, БС – почвы балочных склонов, АД – аллювиально-делювиальные почвы днищ оврагов и балок.

**Note.** \* Чв – leached chernozem, Чт – typical chernozem, Лч – meadow-chernozem, Л – meadow, ВЛ – wet-meadow, СДлс – meadow-steppe solod, СДл – meadow solod, СНлч – meadow-chernozem solonetz, СНлб – meadow-marsh solonetz, Ал – alluvial, БС – gully slope soils, АД – alluvial-deluvial soils of ravine and gully bottoms.

**Таблица 3.** Оценка расстояния между таксонами почв в признаковом пространстве: под диагональю – значения F-критерия, над диагональю – квадрат дистанции Махаланобиса; все значения достоверны при уровне значимости 0.05

**Table 3.** Estimation of the distance between soil taxa in the feature space: below the diagonal are the F-criterion values, above the diagonal is the squared Mahalanobis distance; all values are significant at a significance level of 0.05

| Почвы | Чв    | Чт    | Лч    | Л     | ВЛ   | СДлс | СДл  | СЛч  | СНлб | АЛ    | БС    | АД    |
|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Чв    |       | 0.2   | 1.3   | 5.1   | 11.8 | 29.9 | 23.3 | 8.4  | 12.6 | 45.0  | 84.3  | 77.5  |
| Чт    | 2.6   |       | 1.5   | 5.5   | 12.5 | 30.9 | 23.9 | 8.5  | 12.8 | 46.2  | 86.4  | 79.9  |
| Лч    | 19.3  | 27.2  |       | 2.0   | 8.5  | 25.8 | 19.8 | 4.4  | 8.5  | 42.7  | 88.5  | 73.5  |
| Л     | 26.6  | 31.3  | 12.1  |       | 4.0  | 20.6 | 15.3 | 0.8  | 3.2  | 38.8  | 93.2  | 67.1  |
| ВЛ    | 18.8  | 20.4  | 14.0  | 5.5   |      | 15.1 | 9.5  | 4.7  | 6.6  | 37.4  | 98.1  | 58.4  |
| СДлс  | 30.9  | 32.3  | 27.3  | 19.3  | 10.0 |      | 5.1  | 21.6 | 21.8 | 69.3  | 114.5 | 99.2  |
| СДл   | 43.2  | 45.8  | 38.3  | 23.9  | 8.9  | 3.6  |      | 16.3 | 17.7 | 60.3  | 111.6 | 90.4  |
| СНлч  | 21.0  | 22.3  | 11.7  | 1.6   | 5.0  | 16.9 | 19.3 |      | 1.5  | 40.0  | 99.5  | 71.1  |
| СНлб  | 6.7   | 6.8   | 4.5   | 1.6   | 2.7  | 7.9  | 7.6  | 0.7  |      | 39.1  | 102.2 | 76.1  |
| АЛ    | 142.6 | 153.8 | 145.1 | 93.5  | 43.8 | 58.0 | 79.1 | 64.3 | 18.5 |       | 156.8 | 42.0  |
| БС    | 110.8 | 115.9 | 119.7 | 108.4 | 75.5 | 69.8 | 92.4 | 93.2 | 39.9 | 159.1 |       | 150.6 |
| АД    | 67.2  | 70.2  | 64.9  | 53.5  | 34.5 | 48.8 | 56.4 | 48.7 | 25.7 | 30.5  | 82.5  |       |

Несмотря на статистически значимые различия средних значений, области почв Чт и Чв, СНлс и СНлб, СДлс и СДл в пространстве факторно-индикационной модели практически совпадают (табл. 4), что позволяет эти пары рассматривать в анализе совместно.

Наиболее значимые в модели переменные (табл. 4): крутизна склонов (F-критерий = 145) и превышения в окрестности 2000 м (F-критерий = 96), совместно отделяющие почвы плакоров (Чт, Чв, Лч) и склонов (БС, АД) от почв не дренируемых между-речий (Л, ВЛ, СДлс, СДл, СНлч, СНлб) и пойм (АЛ); плотность западин (F-критерий = 47), разделяющая фоновые почвы между-речных равнин (Лч, Чв, Чт) и гидроморфные почвы западинного комплекса (Л, ВЛ, СН и СД); превышения над базисом эрозии (F-

критерий = 47), низкими значениями маркирующие почвы пойм (АЛ) и аллювиально-делювиальные почвы (АД). Значимыми переменными также стали: соотношение длины и крутизны склона (LS-фактор, F-критерий = 23), отношение водосборной площади к локальной крутизне (TWI, F-критерий = 20), выстраивающие почвы в ряд возрастающего гидроморфизма, и глубина замкнутых понижений (F-критерий = 20) с высокими значениями для почв западного комплекса (ВЛ, СД).

**Таблица 4.** Таксоны почв в признаковом пространстве наиболее значимых переменных региональной модели почвенно-ландшафтных связей Битюго-Савала-Цнинского междуречья (средние значения)

**Table 4.** Soil taxa in the feature space of the most significant variables of the regional model of soil-landscape relationships of the Bityug-Savala-Tsna interfluvium (average values)

| Почва | Крутизна, ° | Превышения, м    |                    | LS-фактор | Топоиндекс влажности (TWI) | Плотность западин, га/100 га | Глубина западин, м |
|-------|-------------|------------------|--------------------|-----------|----------------------------|------------------------------|--------------------|
|       |             | в радиусе 2000 м | над базисом эрозии |           |                            |                              |                    |
| Чв    | 0.8         | 1.9              | 9.5                | 0.43      | 10.1                       | 0.8                          | 0.00               |
| Чт    | 0.7         | 2.2              | 10.5               | 0.33      | 9.8                        | 1.0                          | 0.00               |
| Лч    | 0.7         | 1.0              | 5.8                | 0.51      | 10.8                       | 3.4                          | 0.22               |
| Л     | 0.4         | -1.0             | 2.0                | 0.38      | 11.7                       | 6.0                          | 0.03               |
| ВЛ    | 0.7         | -2.2             | 1.0                | 1.19      | 13.3                       | 5.1                          | 0.14               |
| СДлс  | 0.2         | -0.3             | 1.2                | 0.00      | 18.0                       | 8.8                          | 0.32               |
| СДл   | 0.3         | -0.2             | 1.9                | 0.02      | 15.1                       | 7.0                          | 0.36               |
| СНлч  | 0.3         | -1.1             | 1.3                | 0.12      | 11.9                       | 7.5                          | 0.03               |
| СНлб  | 0.5         | -2.3             | 1.0                | 0.16      | 12.1                       | 8.3                          | 0.04               |
| АЛ    | 0.6         | -11.7            | 0.7                | 0.74      | 11.6                       | 0.2                          | 0.00               |
| БС    | 7.6         | -7.5             | 7.0                | 5.71      | 7.3                        | 0.4                          | 0.00               |
| АД    | 1.7         | -14.1            | 0.7                | 5.53      | 14.1                       | 1.1                          | 0.00               |

Выявленные отношения соответствуют представлениям о географии почв региона и использованы для расчета  $S_{ijk}$  – вектора

степени принадлежности (подобия) почвы каждого элемента территориального пространства ( $i, j$ ) к каждой из 12 почвенных категорий ( $k$ ) в зависимости от сочетания топографических условий:  $S_{ij}$  ( $S_{ijЧв}$ ,  $S_{ijЧт}$ ,  $S_{ijЛч}$ ,  $S_{ijЛ}$ ,  $S_{ijВл}$ ,  $S_{ijСДлс}$ ,  $S_{ijСДл}$ ,  $S_{ijСНлч}$ ,  $S_{ijСНлб}$ ,  $S_{ijАл}$ ,  $S_{ijБс}$ ,  $S_{ijАд}$ ).

Линейные дискриминантные функции для категорий почв:

$$\delta_{Чв} = -26.2 + 6.1 * slp + 0.2 * tpi1500 + 0.4 * cnd - 2.5 * lsf + 4.1 * twi - 20.6 * cdep + 0.2 * cddn$$

$$\delta_{Чт} = -25.2 + 5.9 * slp + 0.2 * tpi1500 + 0.5 * cnd - 2.5 * lsf + 4.0 * twi - 20.3 * cdep + 0.3 * cddn$$

$$\delta_{Лч} = -25.8 + 5.8 * slp + 0.2 * tpi1500 + 0.3 * cnd - 2.4 * lsf + 4.1 * twi - 21.4 * cdep + 0.4 * cddn$$

$$\delta_{Л} = -30.0 + 5.8 * slp + 0.04 * tpi1500 + 0.3 * cnd - 2.4 * lsf + 4.3 * twi - 19.6 * cdep + 0.6 * cddn$$

$$\delta_{Вл} = -36.2 + 5.8 * slp + 0.02 * tpi1500 + 0.3 * cnd - 1.8 * lsf + 4.6 * twi - 7.1 * cdep + 0.5 * cddn$$

$$\delta_{СДлс} = -63.1 + 7.8 * slp + 0.2 * tpi1500 + 0.3 * cnd - 3.4 * lsf + 6 * twi + 6.6 * cdep + 0.7 * cddn$$

$$\delta_{СДл} = -48.4 + 6.7 * slp + 0.2 * tpi1500 + 0.3 * cnd - 2.9 * lsf + 5 * twi + 18.1 * cdep + 0.5 * cddn$$

$$\delta_{СНлч} = -33.7 + 5.8 * slp + 0.0001 * tpi1500 + 0.3 * cnd - 2.6 * lsf + 4.4 * twi - 21.1 * cdep + 0.7 * cddn$$

$$\delta_{СНлб} = -36.2 + 6.2 * slp - 0.1 * tpi1500 + 0.4 * cnd - 2.9 * lsf + 4.5 * twi - 21.5 * cdep + 0.8 * cddn$$

$$\delta_{Ал} = -35.5 + 2.4 * slp - 1.5 * tpi1500 + 0.8 * cnd - 1.9 * lsf + 4.1 * twi - 20.9 * cdep + 0.2 * cddn$$

$$\delta_{Бс} = -77.3 + 18.3 * slp + 0.9 * tpi1500 - 0.1 * cnd - 3.9 * lsf + 4.9 * twi - 26 * cdep + 0.3 * cddn$$

$$\delta_{Ад} = -55.3 - 0.18 * slp - 1.6 * tpi1500 + 0.9 * cnd + 2.8 * lsf + 4.4 * twi - 20.9 * cdep + 0.4 * cddn$$

Чем выше значение  $\delta$ , тем профиль почвы элемента  $i, j$  ближе к среднему профилю  $k$ -почвы в признаковом пространстве. Значе-

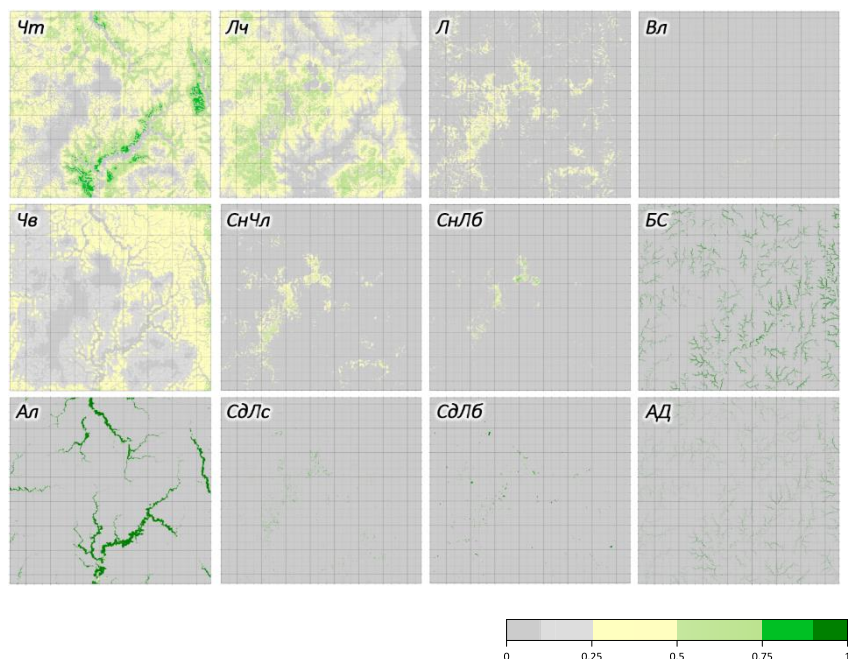
ния  $\delta_k$  используются для расчета апостериорных вероятностей по формуле Байеса:

$$S_{ij}(G_k|x) = \frac{\exp(\delta_k(x))}{\sum_{n=1}^K \exp(\delta_n(x))},$$

где  $\delta_k$  – дискриминантная функция  $k$ -класса,  $\sum_{n=1}^K \exp(\delta_n(x))$  – сумма значений во всех классах (для нормирования).

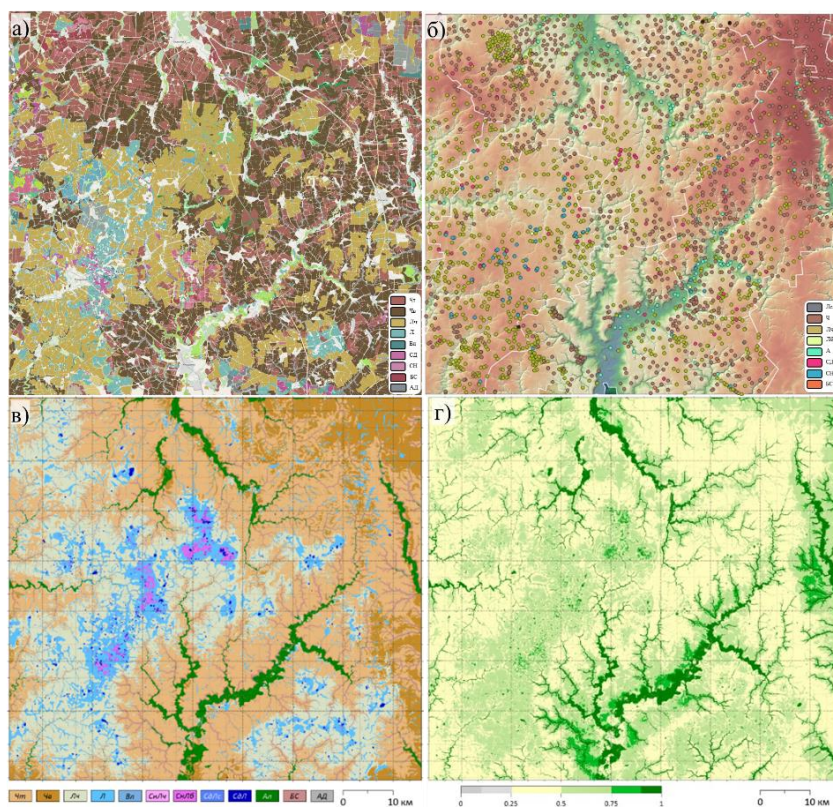
Последующий анализ вектора  $S_{ij}$  для каждого элемента регулярной сетки  $i,j$  позволяет получить: 1) наиболее вероятную (преобладающую по площади) почвенную категорию; 2) неопределенность ее однозначного прогноза, как значение максимальной условной вероятности из всех возможных  $S_{ij}$ ; 3) типы сочетаний наиболее вероятной (преобладающей) почвенной категории с двумя–тремя сопутствующими. Изображение отдельных значений вектора  $S_{ij}$  отражает компонентный состав почвенного покрова участка (рис. 6); изображение наиболее вероятной почвенной категории (рис. 7в) – ареалы преобладающей почвы; изображение неопределенности ее однозначного прогноза – степень комплексности почвенного покрова (рис. 7г), а изображение типов сочетаний преобладающих и сопутствующих категорий почвы – ареалы почвенных комбинаций, образованных этими категориями (рис. 8, табл. 5).

Фоновые почвы междуречья – черноземы типичные, выщелоченные и лугово-черноземные (рис. 7а–в). Пятнистости Чт и Чв занимают дренируемые придолинные участки междуречных равнин, сочетания Лч, Чт и Чв – замедленно-дренируемые. К центральным недренируемым частям междуречий приурочены комплексы луговых почв с солонцами лугово-черноземными и лугово-болотными; а также с солодами лугово-степными и степными в элементах западного комплекса. Кроме того, сочетания луговых и лугово-черноземных почв с участием солонцов характерны для водосборных понижений овражно-балочной сети, а также – выполненных частей притеррасных склонов с близким залеганием грунтовых вод. Почвы балочных склонов и аллювиально-делювиальные почвы балок приурочены к элементам овражно-балочной сети, а аллювиальные почвы – к поймам рек.



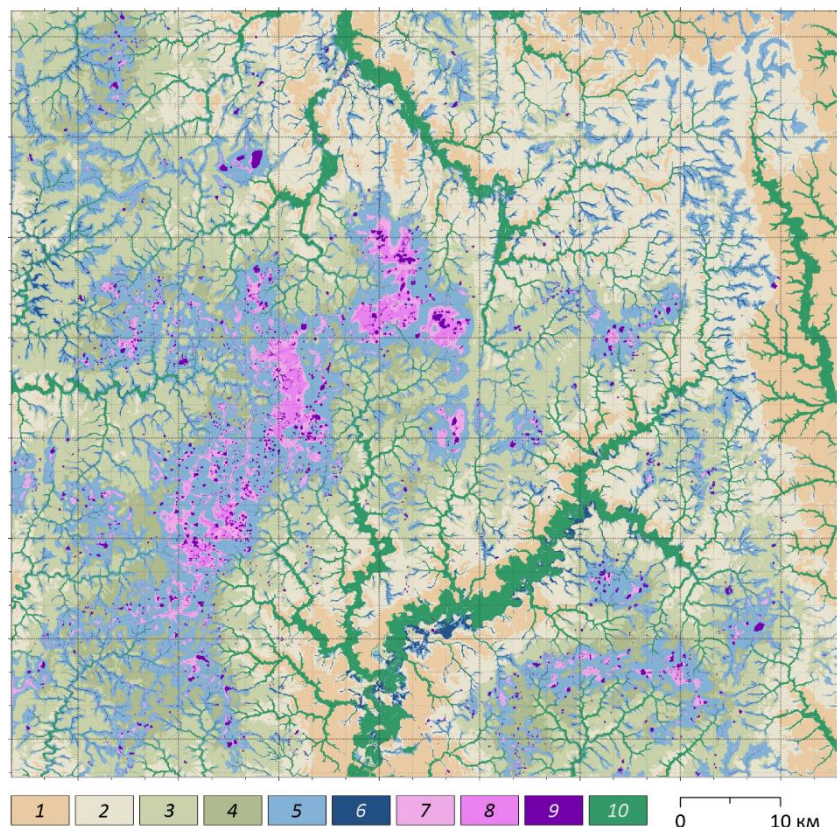
**Рис. 6.** Компонентный состав почвенного покрова Битуго-Савала-Цнинского междуречья Окско-Донской низменности – долевое участие почв в составе почвенных комбинаций: *Чт* – чернозем типичный, *Чв* – чернозем выщелоченный, *Лч* – лугово-черноземная, *Л* – луговая, *Вл* – влажно-луговая, *СдЛс* – солодь лугово-степная, *СдЛ* – солодь луговая, *СнЛч* – солонец лугово-черноземный, *СнЛб* – солонец лугово-болотный, *Ал* – аллювиальная, *БС* – почвы балочных склонов, *АД* – аллювиально-делювиальные почвы днищ оврагов и балок.

**Fig. 6.** Components of the soil cover of the Bitug-Saval-Tsna interfluvium – the share of soils in soil combinations: *Чт* – typical chernozem, *Чв* – leached chernozem, *Лч* – meadow-chernozem, *Л* – meadow, *Вл* – wet-meadow, *СдЛс* – meadow-steppe solonetz, *СдЛ* – meadow solonetz, *СнЛч* – meadow-chernozem solonetz, *СнЛб* – meadow-bog solonetz, *Ал* – alluvial, *БС* – soils of ravine slopes, *АД* – alluvial-deluvial soils of the bottoms of ravines and gullies.



**Рис. 7.** Доминантный компонент почвенных комбинаций Битюго-Савала-Цнинского междуречья: *а)* по архивным материалам почвенных обследований; *б)* точки опорных разрезов, *в)* доминантный подтип почв по модели; *г)* его долевое участие в составе комбинации почв.

**Fig. 7.** Dominant component of soil combinations of the Bityug-Savala-Tsna interfluvium: *a)* dominant soil subtype according to archival materials of soil surveys; *б)* points of archive soil descriptions, *в)* dominant soil subtype according to the model; *г)* its share in the composition of the soil combination.



**Рис. 8.** Типы почвенных комбинаций Битюго-Савала-Цнинского междуречья Окско-Донской низменности: 1 – Чт·Чв и Чв·Чт с Лч (до 10%); 2 – тоже с Лч (10–25%); 3 – тоже с Лч (25–50%); 4 – тоже с Лч (более 50%); 5 – Л и Лч; 6 – Вл и Л; 7 – Л с СН (10–50%); 8 – СН (более 50%) с Л в том числе солонцеватыми; 9 – СДлс и СДл; 10 – почвы овражно-балочной сети и речных долин (Ал, БС, АД).

**Fig. 8.** Soil combinations of the Bityug-Saval-Tsna interfluvium: 1 – Чт·Чв and Чв·Чт with Лч (up to 10%); 2 – also with Лч (10–25%); 3 – also with Лч (25–50%); 4 – also with Лч (more than 50%); 5 – Л and Лч; 6 – Вл and Л; 7 – Л with СН (10–50%); 8 – СН (more than 50%) with Л including solonetz; 9 – СДлс and СДл; 10 – soils of the gully-ravine network and river valleys (Ал, БС, АД).

**Таблица. 5.** Типы почвенных комбинаций Битюго-Савала-Цнинского междуречья Окско-Донской Низменности (легенда к рис. 8)

**Table 5.** Soil combinations of the Bityug-Saval-Tsna interfluv (fig. 8)

| Микроструктуры |               | S,<br>% | Состав и соотношение компонентов |    |    |     |    |       |     | Дополнительно                |
|----------------|---------------|---------|----------------------------------|----|----|-----|----|-------|-----|------------------------------|
|                |               |         | Чт                               | Чв | Лч | Л   | ВЛ | СЛ    | СД  |                              |
| 1              | Чт·Чв и Чв·Чт | 11      | ≥ 90                             |    |    | <10 |    |       |     | Лч < 10%                     |
| 2              | Ч Лч (10-25)  | 23      |                                  |    |    |     |    |       |     | Лч 10-25%                    |
| 3              | Ч Лч (25-50)  | 26      |                                  |    |    |     |    |       |     | Лч 25-50%                    |
| 4              | Лч Чт Чв      | 8       |                                  |    |    |     |    |       |     | Лч ≥ 50%                     |
| 5              | Л ВЛ          | 9       | <10                              |    |    | ≥90 |    | <10   |     | Л ≥ Лч и Лч ≥ ВЛ             |
| 6              | ВЛ            | 4       |                                  |    |    |     |    |       |     | ВЛ ≥ Лч и ВЛ ≥ Л             |
| 7              | СН (10-50)    | 7       |                                  |    |    | >50 |    | 10-50 | <10 | СН ≥ 10 и С < 50             |
| 8              | СН (50+)      | 2       |                                  |    |    | <50 |    | >50   |     | СН ≥ 50                      |
| 9              | СД            | 1       |                                  |    |    | <10 |    |       | ≥10 |                              |
| 10             | Ал БС АД      | 9       |                                  |    |    | <10 |    |       |     | Ал>10 или БС>10<br>или АД>10 |

**Примечание.** \* Чв – чернозем выщелоченный, Чт – чернозем типичный, Лч – лугово-черноземная почва, Л – луговая, ВЛ – влажно-луговая, СДлс – солодь лугово-степная, СДл – солодь луговая, СНлч – солонец лугово-черноземный, СНлб – солонец лугово-болотный, Ал – аллювиальная, БС – почвы балочных склонов, АД – аллювиально-делювиальные почвы днищ оврагов и балок.

**Note.** \* Чв – leached chernozem, Чт – typical chernozem, Лч – meadow-chernozem, Л – meadow, ВЛ – wet-meadow, СДлс – meadow-steppe solod, СДл – meadow solod, СНлч – meadow-chernozem solonetz, СНлб – meadow-marsh solonetz, Ал – alluvial, БС – gully slope soils, АД – alluvial-deluvial soils of ravine and gully bottoms.

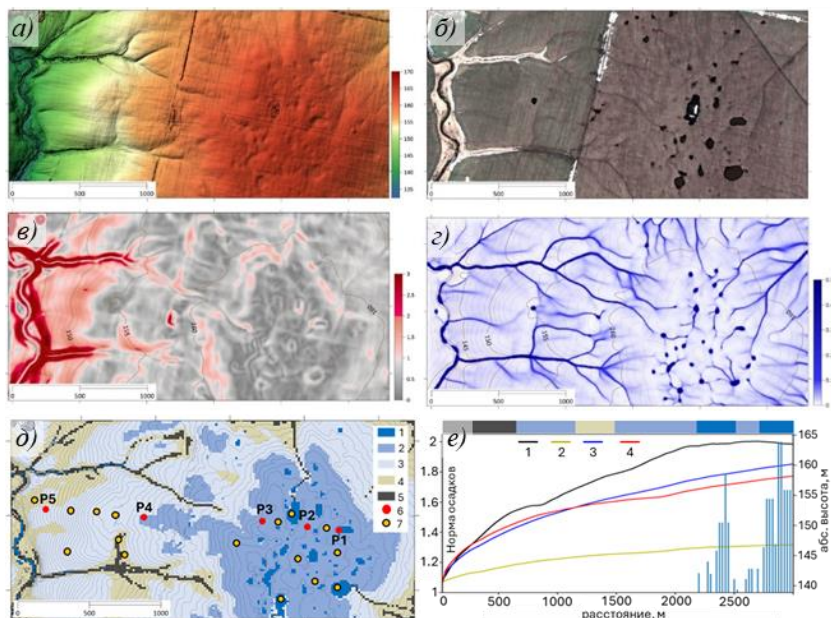
Высокую ценность имеет карта неопределенности прогноза доминантной почвы в составе почвенных комбинаций (рис. 7г). Она показывает участки с высокой и низкой комплексностью почвенного покрова. В региональных условиях лесостепи Окско-Донской низменности очень высокая степень комплексности почвенного покрова характерна для пологих прибалочных и придолинных склонов с трехкомпонентными пятнистостями с черноземами типичными, выщелоченными и лугово-черноземными почвами. Наименьшая комплексность приурочена к поймам крупных

рек с преобладанием аллювиальных почв и вершинам плоских междуречий с лугово-болотными почвами и солодями. Карта неопределенности прогноза позволит более подробно изучать участки с высокой неопределенностью полевыми методами, что эффективнее случайной или регулярной выборки.

Структура почвенного покрова Битюго-Савала-Цнинского междуречья подчинена градиенту увлажнения его эдафических условий – от черноземов дренируемых придолинных частей междуречных равнин, через увеличение доли лугово-черноземных почв (от 10% до 50% и более) в составе почвенных комбинаций по мере снижения дренируемости рельефа до комплекса луговых и влажно-луговых почв с участием солонцов луговых и лугово-болотных в центральных недренируемых частях междуречий. Тот же градиент характерен для крупных водосборных понижений овражно-балочной сети – по мере концентрации стока происходит увеличение луговости почв с переходом к влажно-луговым почвам. По площади преобладают зональные микрокомбинации почв плакоров – 60%, микроструктуры с преобладанием полугидроморфных почв занимают 8%, гидроморфных – 23%, овражно-балочного и долинного комплекса – 9% (табл. 5).

Наглядное представление организации почвенного покрова Окско-Донской низменности дает почвенно-топографическая съемка ее локального междуречья и результаты численного моделирования водного режима его почв в градиенте поверхностного и грунтового увлажнения (рис. 9). Перехватывая поверхностный сток, западинный комплекс обеспечивает до 150 мм дополнительного внутрипочвенного стока, оказывая влияние на водный режим почв за счет повышения уровня грунтовых вод на 2 м и формирование луговых почв (Fil et al., 2021; Филь, 2025). Черноземы типичные и выщелоченные распространены только в пределах придолинных наиболее дренируемых частей междуречья. В переходной полосе формируются лугово-черноземные почвы.

Сравнение результатов цифрового картографирования почвенного покрова Битюго-Савала-Цнинского междуречья (рис. 10 а–в) с архивными почвенными картами хозяйств Сампурского района 1980-х годов М 1 : 10 000 (рис. 10г) показывает их общее подобие и одновременно существенные различия.



**Рис. 9.** Детальная почвенно-топографическая съемка ключевого участка “Ивановка” и особенности формирования его поверхностного и внутрипочвенного стока (Fil et al., 2021; Филь, 2025): *а)* гипсометрия по результатам воздушной съемки; *б)* космический снимок с затопленными понижениями западного комплекса после окончания снеготаяния; *в)* крутизна мезорельефа, °; *г)* перераспределенный слой стока атмосферных осадков, м; *д)* тип/подтип почв: 1 – влажно-луговые осолоделые, 2 – луговые, 3 – лугово-черноземные, 4 – комплекс слабосмытых типичных и выщелоченных черноземов, 5 – почвы овражно-балочного комплекса, 6–7 – точки описаний; *е)* модельный расчет уровня грунтовых вод вдоль катены с учетом перехвата поверхностного стока западным комплексом недренируемых междуречий (высота голубых столбиков, левая ось) и без его учета: 1 – профиль рельефа, м (правая ось); 2 – профиль кровли морены; расчетный уровень грунтовых вод с учетом (3) и без учета (4) перехвата поверхностного стока западным комплексом.

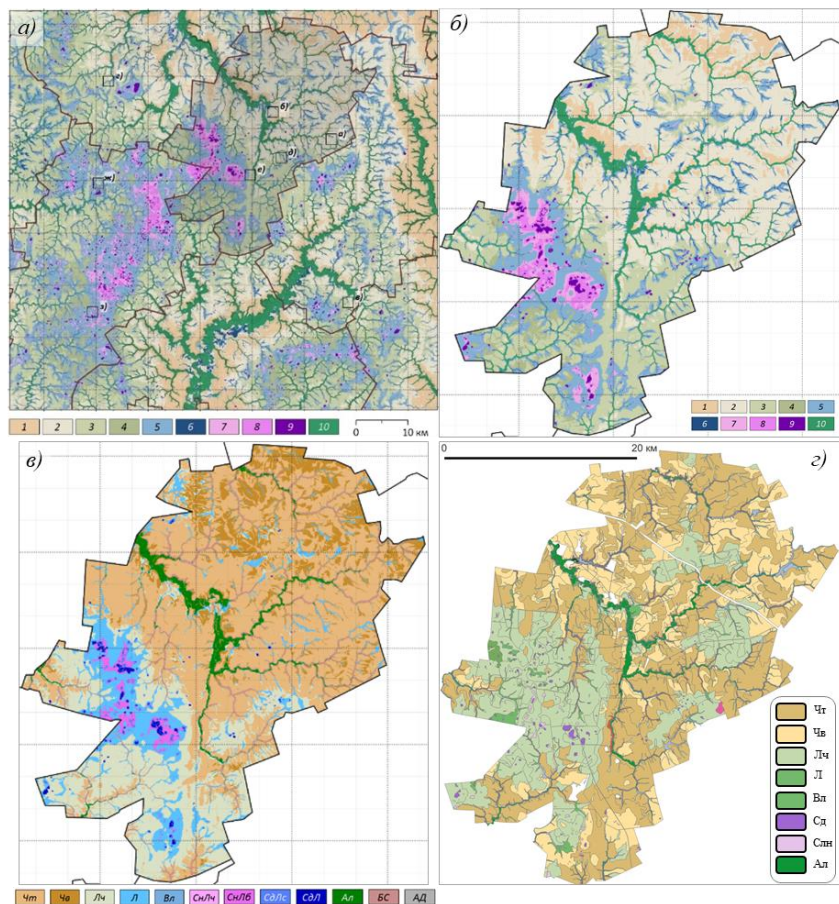
**Fig. 9.** Detailed soil and topographic survey of the Ivanovka key site and the formation features of its surface and subsurface runoff (Fil et al., 2021; Fil, 2025): *a)* topography based on aerial photography; *б)* satellite image with

flooded depressions of the depression complex after the end of snowmelt; **б)** steepness of mesorelief, °; **з)** redistributed layer of atmospheric precipitation runoff, m; **д)** soil type/subtype: 1 – wet meadow solodized, 2 – meadow, 3 – meadow-chernozem, 4 – complex of slightly eroded typical and leached chernozems, 5 – soils of the ravine-gully complex, 6–7 – description points; **е)** model calculation of the groundwater level along the catena taking into account the interception of surface runoff by the depression complex of undrained interfluves (height of blue columns, left axis) and without taking it into account: 1 – relief profile, m (right axis); 2 – moraine roof profile; calculated groundwater level taking into account (3) and without taking into account (4) the interception of surface runoff by the depression complex of undrained interfluves.

Схожими являются ареалы черноземных почв и их полугидроморфных аналогов – лугово-черноземных почв. Черноземы распространены преимущественно на дренируемых равнинах правобережья Цны, лугово-черноземные почвы – в пределах замедленно дренируемых междуречий Цны и Битюга, Цны и Савалы. На правобережье Цны область этих почв на цифровой модели ниже по сравнению архивными картами, а на Савала-Цнинском междуречье существенно выше. Выше на цифровой модели и площадь недренируемых междуречий с преобладанием луговых почв и солонцов, а также солодей в составе западинного комплекса.

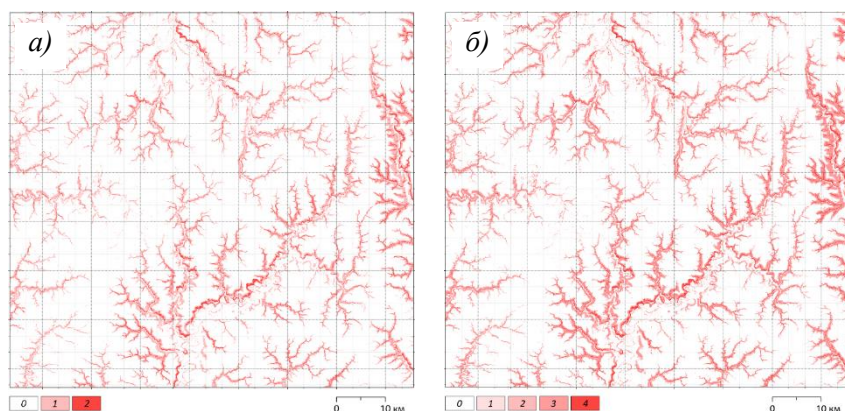
Необходимо отметить, что на архивных почвенных картах ареалы солонцов крайне невелики, встречаются лишь отдельные разрезы и небольшие контуры. В то время как на цифровой модели они имеют значительную площадь. Классификационная принадлежность и закономерности распространения солонцовых комплексов являются предметом дополнительных региональных исследований на ключевых участках (Smirnova et.al., 2025).

Степень агрогенной трансформации почвенного покрова Битюго-Савала-Цнинского междуречья в результате водной эрозии на пашне невелика (рис. 11) – слабосмытые почвы занимают 14 124 га (3%), среднесмытые 4 346 га (1%). Как и для таксонов почв использован метод линейного дискриминантного анализа, где в качестве предикторов использована геоморфометрия рельефа и расчетные темпы смыва почв. Точность модели 90%.



**Рис. 10.** Сравнение региональной модели почвенного покрова Битюго-Савала-Цнинского междуречья и архивных почвенных карт хозяйств М 1 : 10 000 ГФДЗ: *а)* цифровая карта микроструктур почвенного покрова (рис. 8) с границами районов Тамбовской области и тестовых участков  $2 \times 2$  км (рис. 11), *б)* ее фрагмент в границах Сампурского района; *в)* фрагмент цифровой карты доминантной почвы в составе почвенных комбинаций (рис. 7в); *г)* тип/подтип почв на архивных почвенных картах М 1 : 10 000.

**Fig. 10.** Comparison of the regional soil cover model of the Bityug-Savala-Tsna interfluve and archival soil maps of farms on a scale of 1 : 10,000: **a)** digital map of soil combinations (fragment of Fig. 8) with the boundaries of districts of the Tambov region and  $2 \times 2$  km test plots (Fig. 11), **б)** its fragment within the boundaries of the Sampursky district; **в)** fragment of the digital map of the dominant soil in the composition of soil combinations (fragment Fig. 7в); **г)** soil type/subtype on the archival soil maps of farms in the Sampursky district on a scale of 1 : 10,000 of the Tambov region.



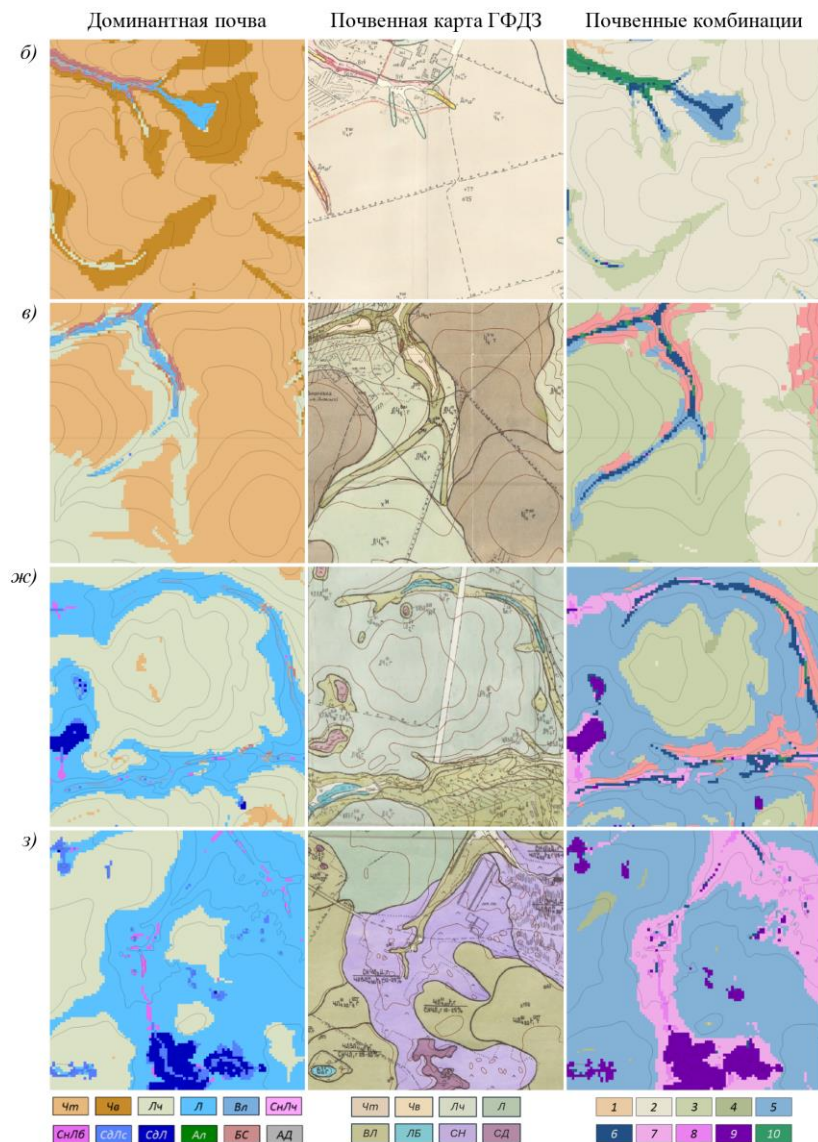
**Рис. 11.** Эрозионные почвенные комбинации пашни: **a)** преобладающая в составе ПК категория смытости почв (0 – не смытые (Э0), 1 – слабосмытые (Э1), 2 – среднесмытые (Э2)), **б)** типы почвенных комбинаций: 0 – зональные с преобладанием несмытых почв ( $Э0 > 0.9$ ); 1 – эрозионно-зональные с долей смытых почв 0.1–0.25; 2 – слабоэродированные Э1(0.25–0.5); 3 – среднеэродированные ( $Э1 + Э2 \geq 0.5$  и  $Э1 \geq Э2$ ); 4 – сильноэродированные ( $Э1 + Э2 \geq 0.5$  и  $Э1 < Э2$ ).

**Fig. 11.** Erosive soil combinations of arable land: **a)** the predominant soil erosion category in the soil combination (0 – not eroded (E0), 1 – slightly eroded (E1), 2 – moderately eroded (E2)), **б)** types of soil combinations: 0 – zonal with predominance of uneroded soils ( $E0 > 0.9$ ); 1 – erosion-zonal with the proportion of eroded soils 0.1–0.25; 2 – slightly eroded E1 (0.25–0.5); 3 – moderately eroded ( $E1 + E2 \geq 0.5$  and  $E1 \geq E2$ ); 4 – highly eroded ( $E1 + E2 \geq 0.5$  and  $E1 < E2$ ).

Ареалы смытых почв имеют вытянутую форму вдоль пологих и покатых склонов долин рек Цна и Савала и их притоков. Итоговое картографическое отображение структуры почвенного покрова региона представляет собой наложение типизированных неэрозионных (рис. 10а) и эрозионных (рис. 11б) почвенных комбинаций.

Сравнение числовой и экспертной моделей почвенно-ландшафтных связей на локальном уровне выполнено в границах участков  $2 \times 2$  км (рис. 10а, рис. 12).

Ареалы доминантных почв на числовой (левые фрагменты на рис. 12) и экспертной (центральные фрагменты) моделях демонстрируют хорошую сходимость для черноземов, лугово-черноземных почв и почв западного комплекса, удовлетворительную для луговых и солонцовых почв. В большинстве случаев границы ареалов численной модели лучше увязаны с положением в мезорельефе по сравнению с экспертными. Высокую научную и практическую ценность имеют карты почвенных комбинаций (правые фрагменты), отражающие доленое участие доминантных и субдоминантных компонентов. Они в большей степени, нежели карты доминантных почв, отражают особенности ареалов зональных почв и их смену в ряду возрастающего увлажнения (рис. 12а, ж, з) или степени деградированности от водной эрозии (рис. 12в, ж) и имеют более высокую ценность для точного земледелия и оптимизации структуры землепользований. Необходимо отметить высокую роль экспертной оценки при верификации моделей почвенно-ландшафтных связей и карт, построенных на их основе. В этой связи для почвенного картографирования в методологии структуры почвенного покрова необходимо исследовать возможности применения численных метрик рисунков структуры почвенного покрова для формальной оценки результатов моделирования.



**Рис. 12.** Локальное сравнение фрагментов региональной модели почвенного покрова Битюго-Савала-Цнинского междуречья и архивных почвенных карт хозяйств М1:10 000 ГФДЗ в границах участков  $2 \times 2$  км

(рис. 10а): *(слева)* – фрагменты цифровой карты доминантной почвы в составе почвенных комбинаций; *(в центре)* – тип/подтип почв на архивных почвенных картах хозяйств Тамбовской области М 1 : 10 000 ГФДЗ; *(справа)* – фрагменты цифровой карты почвенных комбинаций.

**Fig. 12.** Local comparison of fragments of the regional soil cover model of the Bitug-Saval-Tsna interfluvium and archival soil maps of farms on a scale of 1 : 10,000 within the boundaries of 2 × 2 km plots: *(left)* – fragments of the digital map of the dominant soil as part of soil combinations; *(center)* – soil type/subtype on the archival soil maps of farms in the Tambov region on a scale of 1 : 10,000; *(right)* – fragments of the digital map of soil combinations.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Слабопересеченный рельеф и породы с низкой фильтрационной способностью междуречий Окско-Донской низменности определили условия затрудненного поверхностного и внутрипочвенного стока и, как следствие, преобладание в структуре их почвенного покрова полугидроморфных и гидроморфных почв черноземного ряда с участием солонцов и почв западного комплекса (лугово-болотных или солодей). Региональное разнообразие почвенного покрова Битюго-Савала-Цнинского междуречья сведено к десяти типам микроструктур с учетом их компонентного состава.

Ведущими факторами дифференциации почвенного покрова региона являются: крутизна склонов и превышения (разделяющие автоморфные и гидроморфные позиции), плотность и глубина западин (индицируют западинный комплекс), а также превышение над базисом эрозии (маркирует почвы речных долин).

Экспертное сравнение цифровой модели с архивными картами показало хорошую сходимость в выделении ареалов черноземных, лугово-черноземных и гидроморфных почв, но завышение площади ареалов солонцовых почв. При этом границы почвенных контуров на цифровой карте лучше согласованы с элементами мезорельефа.

Дальнейшее развитие данного направления почвенной картографии связано с совершенствованием методов моделирования и снижения неопределенности источников пространственной информации, увеличением полноты обучающей выборки для корректной характеристики состава и соотношения компонентов почвенных комбинаций в признаковом и территориальном простран-

стве, а также формализацией способов верификации результатов на ключевых участках с минимизацией полевых обследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Величко А.А., Морозова Т.Д., Нечаев В.П., Порожнякова О.М.* Палеокриогенез, почвенный покров и земледелие. М.: Наука, 1996. 150 с.
2. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. Коллективная монография. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2014. 768 с.
3. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 224 с.
4. *Козлов Д.Н., Сорокина Н.П.* Традиции и инновации в крупномасштабной почвенной картографии // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. М.: Изд-во Почвенный ин-т им. В.В.Докучаева, 2012. С. 35–57.
5. *Козлов Д.Н., Жидкин А.П., Лозбенев Н.И.* Цифровое картографирование эрозионных структур почвенного покрова на основе имитационной модели смыва (северная лесостепь Среднерусской возвышенности) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. № 100. С. 5–35. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-100-5-35>.
6. *Минаев Н.В., Никитин А.А., Козлов Д.Н.* Идентификация масштабных уровней организации рельефа пашни // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. № 96. С. 3–21. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-96-3-21>.
7. *Мильков Ф.Н.* Окско-Донское плоскогорье. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1976. 176 с.
8. Природно-сельскохозяйственное районирование и использование земельного фонда СССР. М.: Колос, 1983. 336 с.
9. *Савин И.Ю.* Методология крупномасштабного картографирования почв: подходы, проблемы и перспективы // Почвоведение. 2025. № 10. С. 1243–1251. DOI: <https://doi.org/10.7868/S3034561825100011>.
10. *Самойлова Е.М.* Луговые почвы лесостепи. М.: Изд-во МГУ, 1981. 283 с.
11. *Сорокина Н.П., Козлов Д.Н.* Возможности цифрового картографирования структуры почвенного покрова // Почвоведение. 2009. № 2. С. 198–210.
12. *Филь П.П.* Влияние западных урочищ на гидрологическое функционирование лесостепных ландшафтов Окско-Донской низменности: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2025. 26 с.

13. *Bell J.C., Cunningham R.L., Havens M.W.* Calibration and validation of a soil-landscape model for predicting soil drainage class // Soil Science Society of America Journal. 1992. Vol. 56. No. 6. P. 1860–1866.
14. *Bishop T.F.A., Minasny B., McBratney A.B.* Uncertainty analysis for soil-terrain models // International Journal of Geographical Information Sciences. No. 20. 2006. P. 117–134.
15. *Conrad O., Hartl P., Geschke A.* SAGA GIS 2.1.4 // Geoscientific Model Development. 2015. No. 8. P. 1997–2007.
16. *Fil P.P., Yurova A.Y., Dobrokhoto A., Kozlov D.* Estimation of infiltration volumes and rates in seasonally water-filled topographic depressions based on remote-sensing time series // Sensors. 2021. Vol. 21. P. 7403. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21217403>.
17. *Fridland V.M.* Pattern of the Soil Cover. Israel Program for Scientific Translations. 1976. 291 p.
18. *Hole F.D., Campbell J.B.* Soil Landscape Analysis. 1985. 196 p.
19. *Koshel S.* Algorithm for Topologically Correct Gridding of Contour Data // Proceedings of Seventh International Conference on Geographic Information Science (GIScience 2012). Columbus OH, 2012. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2131.8561>.
20. *Kozlov D., Lozbenev N., Levchenko E.* Soil combinations as an object of DSM: a case study in chernozems area of the Russian Plain // GlobalSoilMap – Digital Soil Mapping from Country to Globe. CRC Press, 2018. 7 p.
21. *Malone B.P., McBratney A.B., Minasny B.* Empirical estimates of uncertainty for mapping continuous depth functions of soil attributes // Geoderma. 2011. No. 160 (3–4). P. 614–626. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.11.013>.
22. *McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B.* On digital soil mapping // Geoderma. 2003. No. 117 (1–2). P. 3–52.
23. *Minasny B., McBratney A.B.* Digital soil mapping: A brief history and some lessons // Geoderma. 2016. Vol. 264. Part B. P. 301–311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017>.
24. *Qi F., Zhu A.X.* Comparing three methods for modeling the uncertainty in knowledge discovery from area-class soil maps // Computers and Geosciences. Vol. 37 (9). 2011. P. 1425–1436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.10.016>
25. *Scarpone C., Schmidt M.G., Bulmer C.E., Knudby A.* Modelling soil thickness in the critical zone for Southern British Columbia // Geoderma. 2016. No. 282. P. 59–69.
26. *Smirnova M.A., Lozbenev N.I., Levchenko E.A., Fil P.P., Kozlov D.N.* Chernozems of eastern european forest-steppe lowland landscapes:

Morphology, classification and spatial distribution // *Geoderma Regional*. 2025. Vol. 41. e00965

27. Vermeulen D., Van Niekerk A. Machine learning performance for predicting soil salinity using different combinations of geomorphometric covariates // *Geoderma*. 2017. No. 299. P. 1–12

28. Webster R., Burrough P.A. Multiple discriminant analysis in soil survey // *European Journal of Soil Science*. 1974. Vol. 25 (1). P. 120–134.

## REFERENCES

1. Velichko A.A., Morozova T.D., Nechaev V.P., Porozhnyakova O.M., *Paleokriogeneza, pochvennyy pokrov i zemledeliye* (Paleocryogenesis, soil cover and agriculture), Moscow: Nauka, 1996, 150 p.
2. *Edinyj gosudarstvennyj reestr pochvennyh resursov Rossii* (Unified State Register of Soil Resources of Russia), Version 1.0, Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute of the Russian Agricultural Academy, 2014, 768 p.
3. *Klassifikaciya i diagnostika pochv SSSR* (Classification and Diagnostics of Soils of the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 224 p.
4. Kozlov D.N., Sorokina N.P., Traditions and innovations in large-scale soil mapping, In: *Digital soil mapping: theoretical and experimental studies*, Moscow: Izd-vo Pochvnyy in-t im. V.V. Dokuchayeva, 2012, pp. 35–57.
5. Kozlov D.N., Zhidkin A.P., Lozbenov N.I., Digital mapping of soil cover eroded patterns on the basis of soil erosion simulation model (northern forest-steppe of the Central Russian Upland), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, Vol. 100, pp. 5–35, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-100-5-35>.
6. Minayev N.V., Nikitin A.A., Kozlov D.N., The scale levels identification for the plowland topography organization, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, Vol. 96, pp. 3–21, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-96-3-21>.
7. Milkov F.N., *Oksko-Donskoe ploskomet'e* (Oka-Don flat land), Voronezh: Izd-vo VGU, 1976, 176 p.
8. *Prirodno-sel'skohozyajstvennoe rajonirovanie i ispol'zovanie zemel'nogo fonda SSSR* (Natural and agricultural zoning and use of the land fund of the USSR), Moscow: Kolos, 1983, 336 p.
9. Savin I.Yu., Large-scale soil mapping methodology: approaches, challenges, and prospects, *Eurasian Soil Science*, 2025, Vol. 58, 134, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229325600897>.
10. Samoylova E.M., *Lugovye pochvy lesostepi* (Meadow soils of the forest-steppe), Moscow: Izd-vo MSU, 1981, 283 p.
11. Sorokina N.P., Kozlov D.N., Vozmozhnosti tsifrovogo kartografirovaniya struktury pochvnogo pokrova (Possibilities of digital mapping of the soil cover structure), *Pochvovedenie*, 2009, No. 2, pp. 198–210.

12. Fil P.P., *Vliyaniye zapadinnykh urochishch na gidrologicheskoye funktsionirovaniye lesostepnykh landshaftov Oksko-Donskoy nizmennosti: Avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* (The influence of depressions on the hydrological functioning of forest-steppe landscapes of the Oka-Don Lowland, Extended abstract of candidate thesis), 2025, 26 p.
13. Bell J.C., Cunningham R.L., Havens M.W., Calibration and validation of a soil-landscape model for predicting soil drainage class, *Soil Science Society of America Journal*, 1992, Vol. 56(6), pp. 1860–1866.
14. Bishop T.F.A., Minasny B., McBratney A.B., Uncertainty analysis for soil-terrain models, *International Journal of Geographical Information Sciences*, 2006, No. 20, pp. 117–134.
15. Conrad O., Hartl P., Geschke A., SAGA GIS 2.1.4, *Geoscientific Model Development*, 2015, No. 8.
16. Fil P.P., Yurova A.Y., Dobrokhotoy A., Kozlov D., Estimation of infiltration volumes and rates in seasonally water-filled topographic depressions based on remote-sensing time series, *Sensors*, 2021, Vol. 21, p. 7403.
17. Fridland V.M., *Pattern of the Soil Cover*, Israel program for scientific translations, 1976, 291 p.
18. Hole F.D., Campbell J.B., *Soil Landscape Analysis*, 1985, 196 p.
19. Koshel S., Algorithm for topologically correct gridding of contour data, *Proceedings of GIScience*, 2012, pp. 1–5.
20. Kozlov D., Lozbeney N., Levchenko E., Soil combinations as an object of DSM: a case study in chernozems area of the Russian Plain, In: *GlobalSoilMap – Digital Soil Mapping from Country to Globe*, CRC Press, 2018.
21. Malone B.P., McBratney A.B., Minasny B., Empirical estimates of uncertainty for mapping continuous depth functions of soil attributes, *Geoderma*, 2011, Vol. 160 (3–4), pp. 614–626.
22. McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B., On digital soil mapping, *Geoderma*, 2003, No. 117 (1–2), pp. 3–52.
23. Minasny B., McBratney A.B., Digital soil mapping: A brief history and some lessons, *Geoderma*, 2016, Vol. 264, Part B, pp. 301–311.
24. Qi F., Zhu A.X., Comparing three methods for modeling the uncertainty in knowledge discovery from area-class soil maps, *Computers and Geosciences*, 2011, Vol. 37 (9), pp. 1425–1436.
25. Scarpone C., Schmidt M.G., Bulmer C.E., Knudby A., Modelling soil thickness in the critical zone for Southern British Columbia, *Geoderma*, 2016, No. 282, pp. 59–69.
26. Smirnova M.A., Lozbeney N.I., Levchenko E.A., Fil P.P., Kozlov D.N., Chernozems of eastern european forest-steppe lowland landscapes:

Morphology, classification and spatial distribution, *Geoderma Regional*, 2025, Vol. 41.

27. Vermeulen D., Van Niekerk A., Machine learning performance for predicting soil salinity using different combinations of geomorphometric covariates, *Geoderma*, 2017, No. 299, pp. 1–12.

28. Webster R., Burrough P.A., Multiple discriminant analysis in soil survey, *European Journal of Soil Science*, 1974, Vol. 25 (1), pp. 120–134.