

УДК: 528.94:631.4(470.32)

DOI: 10.35595/2414-9179-2025-2-31-519-533

П. А. Украинский<sup>1</sup>

## КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПОЧВЕННОГО РАЗНООБРАЗИЯ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА LANDSCAPEMETRICS (НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЧЕРНОЗЕМЬЯ)

### АННОТАЦИЯ

С помощью пакета landscapemetrics в среде для статистических вычислений R была выполнена количественная оценка и картографирование почвенного разнообразия на территории Центрально-Черноземного района и Орловской области. Исходными данными для анализа послужила почвенная карта Черноземья, составленная в 1983 г. в м-бе 1:600 000. Векторный вариант этой карты был преобразован в дискретный растр с пространственным разрешением 1 000 м/пикс. На основе этих данных были рассчитаны четыре ландшафтные метрики: индекс разнообразия Шеннона, индекс разнообразия Симпсона, условная энтропия и предельная энтропия. Расчет производился на трех масштабных уровнях: для всего Черноземья, для отдельных областей и для каждого пикселя исходной карты. Локальные значения для каждого пикселя исходной почвенной карты рассчитаны в круглом скользящем окне с радиусом 25 км. В результате были получены раstry ландшафтных метрик. Анализ этих растров позволил выявить общие закономерности в пространственном распределении почвенного разнообразия на территории Центрально-Черноземного района. Обнаружено, что характер чередования участков повышенного и пониженного почвенного разнообразия различается в степной и лесостепной части Черноземья. В лесостепи чередование происходит с запада на восток, а в степи — с севера на юг. В целом исследуемую территорию можно разделить на четыре участка повышенного почвенного разнообразия (три в лесостепной зоне и один в степной) и три участка пониженного почвенного разнообразия (два в лесостепи и один в степи). Для участков повышенного почвенного разнообразия характерна приуроченность к границам крупных природных регионов (растительных зон или геоморфологических провинций). Для участков пониженного почвенного разнообразия характерна приуроченность к центральным частям крупных природных регионов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** почвенное разнообразие, почвенные карты, ландшафтные метрики, Центрально-Черноземный район

Pavel A. Ukrainskiy<sup>2</sup>

## MEASURING AND MAPPING OF SOIL DIVERSITY USING LANDSCAPEMETRICS PACKAGE (ON EXAMPLE OF THE CENTRAL-CHERNOZEM REGION)

### ABSTRACT

Using the landscapemetrics package in the R statistical computing environment, a quantitative assessment and mapping of soil diversity in the Central-Chernozem Region (the Central Black Earth Region) and the Oryol Region was performed. The input data for the analysis was the

<sup>1</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы, д. 85, Белгород, Россия, 308015, e-mail: pa.ukrainski@gmail.com

<sup>2</sup> Belgorod National Research University, 85, Pobedy str., Belgorod, 308015, Russia,  
e-mail: pa.ukrainski@gmail.com

soil map of the Central-Chernozem Region, compiled in 1983 at a scale of 1:600 000. The vector version of this map was converted into a discrete raster with a spatial resolution of 1 000 m/px. Based on these data, four landscape metrics were calculated: Shannon diversity index, Simpson diversity index, conditional entropy and marginal entropy. The calculation was performed at three scale levels: for the entire Central-Chernozem Region, for individual regions and for each pixel of the original map. Local values for each pixel of the original soil map were calculated in a circular moving window with a radius 25 km. As a result, rasters of landscape metrics were obtained, the analysis of which made it possible to identify general patterns in the spatial distribution of soil diversity in the Central-Chernozem Region. It was found that the nature of alternation of areas of increased and decreased soil diversity differs in the steppe and forest-steppe parts of the Central-Chernozem Region. In the forest-steppe, alternation occurs from west to east, and in the steppe — from north to south. In general, the territory of the Central-Chernozem Region can be divided into four areas of increased soil diversity and three areas of decreased soil diversity. In the forest-steppe part of the Central-Chernozem Region, there are three areas of increased and two areas of decreased soil diversity. In the steppe part of the Central-Chernozem Region, there is one area of increased and one area of decreased soil diversity. Areas of increased soil diversity are characterized by their confinement to the boundaries of large natural regions (vegetation zones or geomorphological provinces). Areas of decreased soil diversity are characterized by their confinement to the central parts of large natural regions.

**KEYWORDS:** soil diversity, soil map, landscape metrics, Central-Chernozem Region

## ВВЕДЕНИЕ

Почвоведение, в силу своего объекта изучения, тесно связано с экологией. Почвы формируются под влиянием различных экологических факторов, в свою очередь самостоятельно выступая в качестве экологического фактора. Тематическая связь почвоведения и экологии проявилась в существовании такого направления исследований, как изучение экологических функций почв и в формировании отдельной научной отрасли — экологического почвоведения [Дергачева, 2009; Хазиев, 2017]. Однако для смежных наук помимо тематических связей могут возникать и связи методические, когда методы исследований проникают из одной науки в другую. Такая связь сейчас формируется между географией почв и ландшафтной экологией [Saldaña, 2013].

Из ландшафтной экологии в географию почв в настоящее время проникает метод ландшафтных метрик. Этот метод приобрел популярность с появлением в 1995 г. программы FRAGSTAT<sup>1</sup>, позволяющей рассчитывать ландшафтные метрики на основе растровых слоев. Эта программа стала активно использоваться для изучения пространственной структуры ландшафтов, растительного покрова, земельных угодий. FRAGSTAT используется настолько широко, что выражение «метрики FRAGSTAT» стало синонимом термина «ландшафтные метрики», а акронимы ландшафтных метрик из FRAGSTAT стали общепринятыми сокращениями для обозначения ландшафтных метрик. Да и сам термин «ландшафтные метрики» потеснил в использовании свой синоним «ландшафтные индексы» именно благодаря использованию во FRAGSTAT. В географии почв ландшафтные метрики применяются пока довольно редко. Но уже существует ряд работ, где с их помощью проводится количественная оценка и выполняется картографирование разнообразия почвенного покрова.

<sup>1</sup> McGarigal K., Cushman S. A., Ene E. FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps. Официальный сайт FRAGSTAT, 2024. Электронный ресурс: <https://fragstats.org/index.php/tutorial> (дата обращения 02.06.2025)

Для Германии с помощью программы FRAGSTAT было оценено почвенное разнообразие и составлена карта его изменения по территории страны. Эта работа была выполнена на основе почвенной карты Германии м-ба 1:1 000 000. В качестве меры почвенного разнообразия использовался индекс разнообразия Симпсона [Behrens, 2009]. В Китае аналогичное исследование для всей страны и крупных геоморфологических регионов было проведено с расчетом индекса разнообразия Шеннона и анализом факторов, влияющих на почвенное разнообразие [Luo et al., 2021]. В Польше известно исследование почвенного разнообразия в г. Иновроцлав, в рамках которого с помощью FRAGSTAT для почвенного покрова рассчитывались такие ландшафтные метрики, как индекс разнообразия Шеннона, индекс выравненности Шеннона, индекс разнообразия Симпсона и индекс выравненности Симпсона [Pindral, 2022].

В России оценка и картографирование почвенного разнообразия с помощью программы FRAGSTAT проведены для территорий Карелии, Московской обл. и Дагестана. В этих работах анализировались почвенные карты трех различных м-бов (1:10 000, 1:500 000 и 1:2 500 000). На основе этих карт с помощью расчетов в скользящем окне были составлены карты локальных значений индекса разнообразия Шеннона [Красильников и др., 2020; Gerasimova et al., 2020]. Нужно оговориться, что оценка почвенного разнообразия на территории России проводилась и ранее, но выполнялась обычно либо для исследуемой территории целиком, либо для отдельных единиц территориального деления внутри исследуемой территории [Смирнова, Геннадьев, 2017; Алябина, 2018]. Карты локальных значений ландшафтных метрик для почвенного покрова, полученные на основе расчетов в скользящем окне, до недавнего времени практически не создавались.

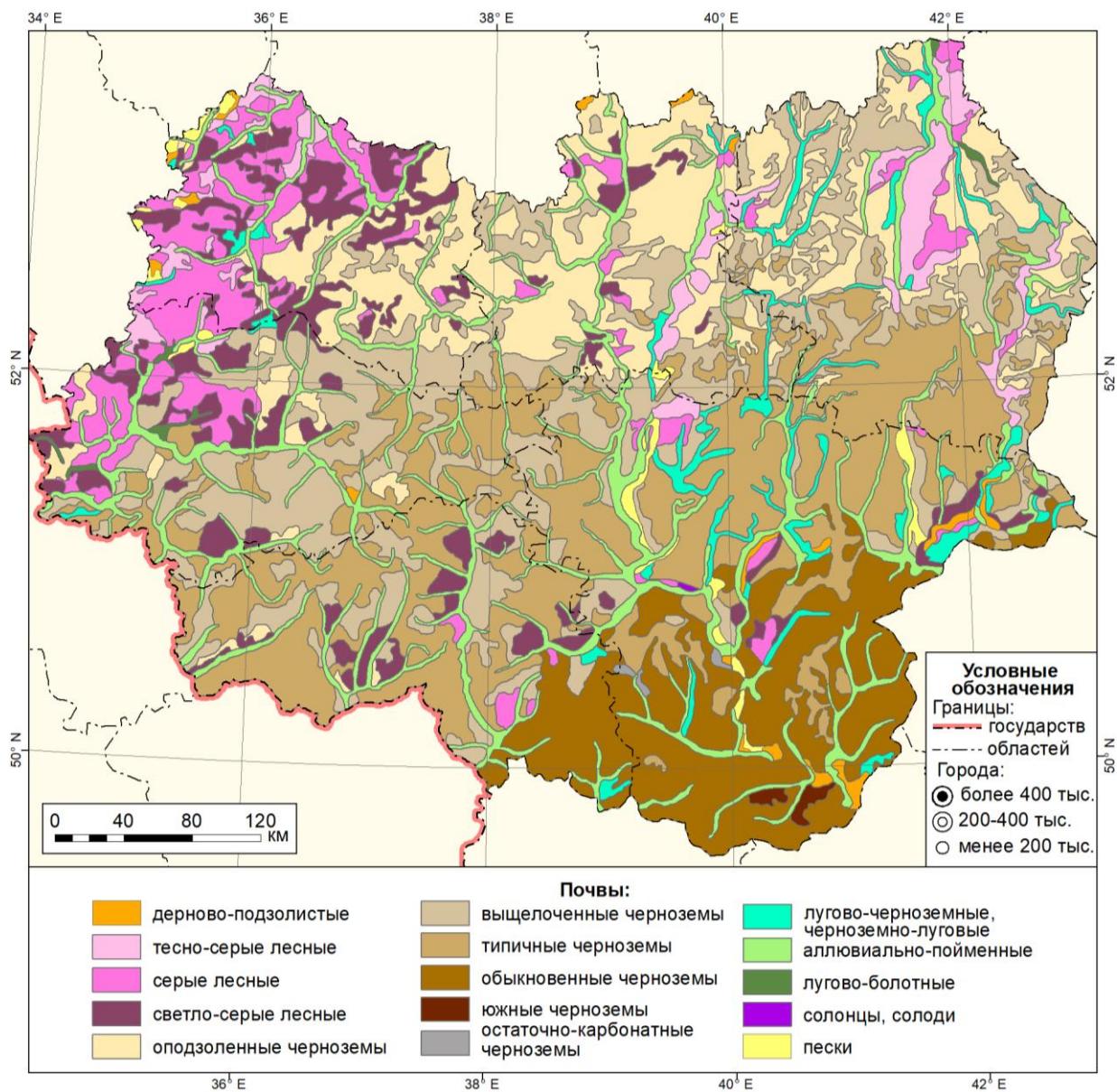
К настоящему времени коллектив разработчиков программы FRAGSTAT перестал заниматься ее интенсивным и активным развитием. Появились альтернативы FRAGSTAT, позволяющие рассчитывать ландшафтные метрики на основе растровых слоев. Это плагин LecoS для QGIS и пакет landscapemetrics для языка программирования R. В этой работе использован пакет landscapemetrics. С точки зрения его разработчиков преимуществом landscapemetrics являются кроссплатформенность, открытый исходный код, интеграция в большие рабочие процессы, ряд новых ландшафтных метрик, наличие служебных функций для визуализации ландшафтных метрик и проведения манипуляций с ними [Hesselbarth et al., 2019]. При использовании landscapemetrics пользователь получает все преимущества языка R. Это возможность гибкой настройки структуры получаемых данных и возможность коррекции алгоритма расчетов пользователем. Продвинутые пользователи языка R могут самостоятельно внедрять в landscapemetrics новые ландшафтные метрики. За счет сохранения скриптов на языке R пакет landscapemetrics обеспечивает точную воспроизводимость результатов [Nowosad, Stepinski, 2019].

В этой работе демонстрируется использование пакета landscapemetrics для изучения разнообразия почвенного покрова. Целью исследования является количественная оценка и картографирование разнообразия почвенного покрова Центрально-Черноземного района (ЦЧР) на уровне типов и подтипов почв. Это включает в себя как расчет ландшафтных метрик на уровне всего ЦЧР и отдельных областей, так и расчет локальных значений ландшафтных метрик. Создаваемые растры локальных значений ландшафтных метрик являются основой для картографирования почвенного разнообразия, выделения участков повышенного и пониженного почвенного разнообразия и описания географии размещения этих участков.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемая территория охватывает ЦЧР и Орловскую область (рис. 1). Включение Орловской обл. в состав ЦЧР в рамках этого исследования необходимо пояснить.

Согласно Общероссийскому классификатору экономических районов, в настоящее время Орловская обл. не входит в состав ЦЧР<sup>1</sup>. Однако среди отечественных экономико-географов существует мнение, что Орловскую обл. все-таки необходимо перевести из Центрального района в состав ЦЧР [Лейзерович, 2014]. Среди же физико-географов сложилась практика изучения Орловской обл. совместно с областями ЦЧР, например в ландшафтных и почвенных исследованиях [Овчинникова, 2019]. Анализируемая нами почвенная карта ЦЧР в соответствии с такой устоявшейся практикой включает территорию Орловской обл. Наша исследуемая территория также охватывает не только «официальные» области ЦЧР, но и Орловскую обл.



*Рис. 1. Почвы исследуемой территории*  
*Fig. 1. Soils of the study area*

<sup>1</sup> Общероссийский классификатор экономических регионов. ОК 024-95. (утв. Постановлением Госстандарта России от 27.12.1995 № 640) (дата введения 01.01.1997)

Центрально-Черноземный район (ЦЧР) расположен в центре Восточно-Европейской равнины. Для него характерен умеренно-континентальный климат с теплым летом и умеренно-холодной зимой. Восточная часть района относится к Среднерусской возвышенности, западная — к Окско-Донской низменности, а на крайнем западе начинается Приволжская возвышенность. Речная сеть образована Доном, Сеймом, Окой и их притоками. С севера на юг сменяются три растительные зоны — южный край зоны смешанных и широколиственных лесов, лесостепная зона и северная часть степной зоны. Естественная растительность в значительной мере сведена и заменена полями сельскохозяйственных культур. В почвенном покрове преобладают черноземы (70,7 % территории), вторые по распространенности — серые лесные почвы (9,0 % территории) [Соловиченко и др., 2012].

В качестве исходных данных для оценки почвенного разнообразия была использована оцифрованная почвенная карта ЦЧР (рис. 1). Она взята из архива пространственных данных Федерально-регионального центра аэрокосмического и наземного мониторинга природных ресурсов и объектов НИУ «БелГУ». Исходные данные представляют собой векторный слой в формате шейп-файла с системой координат проекции WGS-84 UTM 37N (EPSG: 32637). В таблице атрибутов этого слоя содержится поле с названиями почв. Всего в атрибутивных данных имеются названия 15 почв:

- дерново-подзолистые,
- светло-серые лесные,
- серые лесные,
- темно-серые лесные,
- черноземы оподзоленные,
- черноземы выщелоченные,
- черноземы типичные,
- черноземы обыкновенные,
- черноземы южные,
- черноземы остаточно-карбонатные,
- лугово-черноземные и черноземно-луговые,
- аллювиально-пойменные,
- лугово-болотные,
- солонцы и солоди,
- пески.

Печатным первоисточником исходных векторных данных является «Карта почвенного покрова Центрально-Черноземной зоны» в м-бе 1:600 000. Она составлена в 1983 г. в Центрально-Черноземном государственном проектном институте по землеустройству. Основой ее стали почвенные карты области в м-бе 1:200 000 и 1:300 000. Карты области, в свою очередь, составлялись в 1979–1981 гг. на базе материалов почвенных обследований 1970-х гг. [Соловиченко и др., 2012].

Обработка исходных данных проведена в среде для статистических вычислений R (версия 4.1.0)<sup>1</sup> с использованием дополнительных пакетов *landscapemetrics* (версия 1.5.6)

<sup>1</sup> R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2021. Электронный ресурс: <https://www.R-project.org/> (дата обращения 28.04.2025)

[Hesselbarth et al., 2019], raster (версия 3.6-20)<sup>1</sup> и rgdal (версия 1.5-28)<sup>2</sup>. Картографическое оформление результатов выполнено в программе ArcGIS 10.5.

Пакет landscapemetrics, как и программа FRAGSTAT, работает с растровыми данными. Поэтому исходный векторный слой почвенной карты был преобразован в программе ArcGIS в растровый слой. В этом растровом слое названию каждой почвы соответствует целочисленное значение от 1 до 15. Пространственное разрешение растра при его создании задано равным 1 000 м/пикс. 1 000 м — это расстояние, которое превышает ширину самого узкого выдела на карте минимум в 3–4 раза. По этой причине при таком пространственном разрешении структура почвенных выделов сохраняется от генерализации, но в тоже время значительно сокращается время обработки данных при расчетах в скользящем окне. Полученный растровый слой был записан в формат geoTIFF для последующей обработки в R. Использованный код на языке R представлен на рис. 2.

Чтение растрового слоя почв в R выполняется с помощью функции raster из пакета raster. В результате создается объект класса RasterLayer. Этот объект используется в качестве входных данных при расчете ландшафтных метрик с помощью функций из пакета landscapemetrics. Для чтения векторных данных используется функция readOGR из пакета rgdal, которая создает объект SpatialPolygonDataFrame. С помощью этой функции в R импортировался полигональный слой границ областей ЦЧР.

```
#Подключение пакетов
library(raster)
library(landscapemetrics)
library(rgdal)

#Чтение пространственных данных
SOIL<-raster('SOIL.tif')
Regions<-readOGR('Regions.shp')

#Расчет ландшафтной метрики
lsm_l_shdi(landscape=SOIL)
sample_lsm(landscape=SOIL,y=Regions,what='lsm_l_shdi')

#Настройка параметров скользящего окна
Window<-focalWeight(x=SOIL,d=25000,type='circle',fillNA=T)
Window<-apply(X=Window,MARGIN=2,FUN=function(x) ifelse(x>0,1))

#Расчет локальных значений в скользящем окне
SHDI<-window_lsm(landscape=SOIL,window=Window,what='lsm_l_shdi')

#Экспорт растра
writeRaster(x=SHDI,filename='SHDI.tif')
```

*Рис. 2. Код на языке R, использованный для расчета ландшафтных метрик (на примере индекса разнообразия Шеннона). Синий шрифт — названия функций, зеленый шрифт — названия аргументов функций, жирный черный шрифт — названия объектов*

*Fig. 2. R code used to calculate landscape metrics (on example of Shannon diversity index).*  
*Blue font — names of functions, green font — names of function arguments,*  
*bold black font — names of objects*

<sup>1</sup> Hijmans R. J. Raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 3.6-20. The Comprehensive R Archive Network, 2023. Электронный ресурс: <https://CRAN.R-project.org/package=raster> (дата обращения 28.04.2025)

<sup>2</sup> Bivand R., Keitt T., Rowlingson B. rgdal: Bindings for the “Geospatial” Data Abstraction Library. R package version 1.5-28. The Comprehensive R Archive Network, 2021. Электронный ресурс: <https://CRAN.R-project.org/package=rgdal> (дата обращения 28.04.2025)

В пакете `landscapemetrics` для расчетов на уровне всей исследуемой территории (`landscape level` в терминологии FRAGSTAT) доступны девять метрик разнообразия. Кроме того, в `landscapemetrics` есть пять новых метрик — метрики сложности, основанные на теории информации [Nowosad, Stepinski, 2019]. Внутри группы метрик разнообразия, как и внутри группы метрик сложности, все метрики похожи по методике расчета, а потому склонны сильно коррелировать друг с другом. Мы предварительно проверили корреляцию результатов и отобрали наименее скоррелированные ландшафтные метрики. В итоге для количественной оценки почвенного разнообразия были рассчитаны четыре ландшафтные метрики: индекс разнообразия Шеннона (SHDI), индекс разнообразия Симпсона (SIDI), условная энтропия (CONDENT) и предельная энтропия (ENT). Ландшафтные метрики рассчитывались для всей территории ЦЧР, для отдельных областей и для каждого пикселя исходного растра (расчет в скользящем окне).

Для расчета ландшафтных метрик на уровне всего ЦЧР использовались функции `lsm_1_shdi` (SHDI), `lsm_1_sidi` (SIDI), `lsm_1_condent` (CONDENT) и `lsm_1_ent` (ENT). В качестве аргумента эти функции принимают объект класса `RasterLayer`. При расчете ландшафтных метрик на уровне областей или отдельных пикселей функции `sm_1_shdi`, `lsm_1_sidi`, `lsm_1_condent` и `lsm_1_ent` применяются внутри функций-оберток `sample_lsm` и `window_lsm`.

Для расчета ландшафтных метрик на уровне областей ЦЧР использовалась функция `sample_lsm`. Она принимает в качестве аргументов анализируемый растер (объект класса `RasterLayer`), векторный слой с полигональными объектами (объект класса `SpatialPolygonsDataFrame`) и название функции для расчета ландшафтной метрики.

Перед расчетом локальных значений ландшафтных метрик предварительно настраиваются параметры скользящего окна. Нами использовалось круговое скользящее окно радиусом 25 км. Размер скользящего окна выбран исходя из желаемого уровня генерализации результатов. При радиусе 25 км диаметр скользящего окна оказывается в 1,5–2 раза меньше, чем размер физико-географических районов ЦЧР по наименьшей протяженности.

Для описания параметров скользящего окна использована функция `focalWeight` из пакета `raster`, которая создает объект класса матрица. В качестве аргументов она принимает анализируемый растер (объект класса `RasterLayer`) и радиус круга (задается в единицах системы координат растра).

Локальные значения ландшафтных метрик рассчитываются в скользящем окне при помощи функции `window_lsm`. Она принимает в качестве аргументов анализируемый растер (объект класса `RasterLayer`), параметры скользящего окна (объект класса «матрица», созданный функцией `focalWeight`) и название функции для расчета ландшафтной метрики. Функция `window_lsm` создает растер ландшафтной метрики в виде объекта класса `RasterLayer`. Созданные растры ландшафтных индексов экспортируются из R при помощи функции `writeRaster` из пакета `raster`.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Значения ландшафтных метрик, рассчитанные для всего ЦЧР и отдельных областей, показаны в табл. 1. Все четыре метрики указывают на то, что наибольшим почвенным разнообразием на уровне типов и подтипов почв отличается Орловская обл. Наименьшим почвенным разнообразием согласно индексу разнообразия Шеннона, условной энтропии и предельной энтропии отличается Белгородская обл. По индексу разнообразия Симпсона наименьшее почвенное разнообразие обнаруживается в Липецкой обл.

Суммарная статистика по локальным значениям ландшафтных метрик, рассчитанным в скользящем окне с радиусом 25 км, показаны в табл. 2. Наибольшим варьированием на территории ЦЧР отличается предельная энтропия (коэффициент

вариации 28,7 %). К ней близок по варьированию индекс разнообразия Шеннона (коэффициент вариации 28,1 %). Индекс разнообразия Симпсона и условная энтропия отличаются меньшим варьированием (коэффициент вариации 24,6 % для обеих метрик).

*Табл. 1. Значения ландшафтных метрик для областей ЦЧР  
Table 1. Landscape metrics values for regions of the Central-Chernozem Region*

Область	SIDI	SHDI	CONDENT	ENT
Белгородская	0,73	1,56	0,62	2,26
Воронежская	0,77	1,76	0,71	2,53
Курская	0,79	1,78	0,77	2,57
Липецкая	0,72	1,59	0,73	2,28
Орловская	0,81	1,80	0,82	2,59
Тамбовская	0,79	1,71	0,75	2,46
ЦЧР целиком	0,85	2,09	0,79	3,02

*Табл. 2. Локальные значения ландшафтных метрик на территории ЦЧР  
Table 2. Local values of landscape metrics in the territory of the Central-Chernozem Region*

	Минимум	Среднее	Медиана	Максимум	Стандартное отклонение
<b>SIDI</b>	0,00	0,61	0,64	0,87	0,15
<b>SHDI</b>	0,00	1,21	1,22	2,09	0,34
<b>CONDENT</b>	0,00	0,65	0,66	1,15	0,16
<b>ENT</b>	0,00	1,74	1,76	3,01	0,50

При визуальном сопоставлении полученных растров ландшафтных метрик было замечено, что значения в них имеют схожее распределение в пространстве. Корреляционный анализ подтвердил это наблюдение. Между значениями ландшафтных метрик наблюдается сильная положительная корреляция, превышающая 0,95 (табл. 3), только между условной энтропией и другими метриками корреляция слабее (менее 0,80).

*Табл. 3. Коэффициенты корреляции Спирмена для локальных значений ландшафтных метрик (*p*-значения для всех коэффициентов меньше 0,05)  
Table 3. Spearman correlation coefficients for local values of landscape metrics (*p*-values for all coefficients are less than 0.05)*

	SIDI	SHDI	CONDENT	ENT
<b>SIDI</b>	1,00	0,97	0,78	0,97
<b>SHDI</b>	0,97	1,00	0,79	0,9998
<b>CONDENT</b>	0,78	0,79	1,00	0,79
<b>ENT</b>	0,97	0,9998	0,79	1,00

Сильная корреляция указывает на то, что все рассмотренные метрики являются взаимозаменяемыми. При необходимости выбора какой-то одной метрики можно использовать любую из них. С одинаковым успехом можно применять как традиционные метрики (индексы разнообразия Симпсона и Шеннона), так и более новые (условная энтропия и предельная энтропия). При необходимости использовать более одной метрики можно порекомендовать сочетание предельной энтропии и условной энтропии. В этой паре

корреляция более низкая. При этом достоинством предельной энтропии является больший диапазон значений и большее варьирование (табл. 2).

С учетом высокой скоррелированности растротов и схожего пространственного распределения значений для нанесения на карту была выбрана только одна метрика из четырех — индекс разнообразия Шеннона (рис. 3). Его выбору также способствовало то, что он использовался в других исследованиях почвенного разнообразия на территории России [Красильников и др., 2020; Gerasimova et al., 2020].

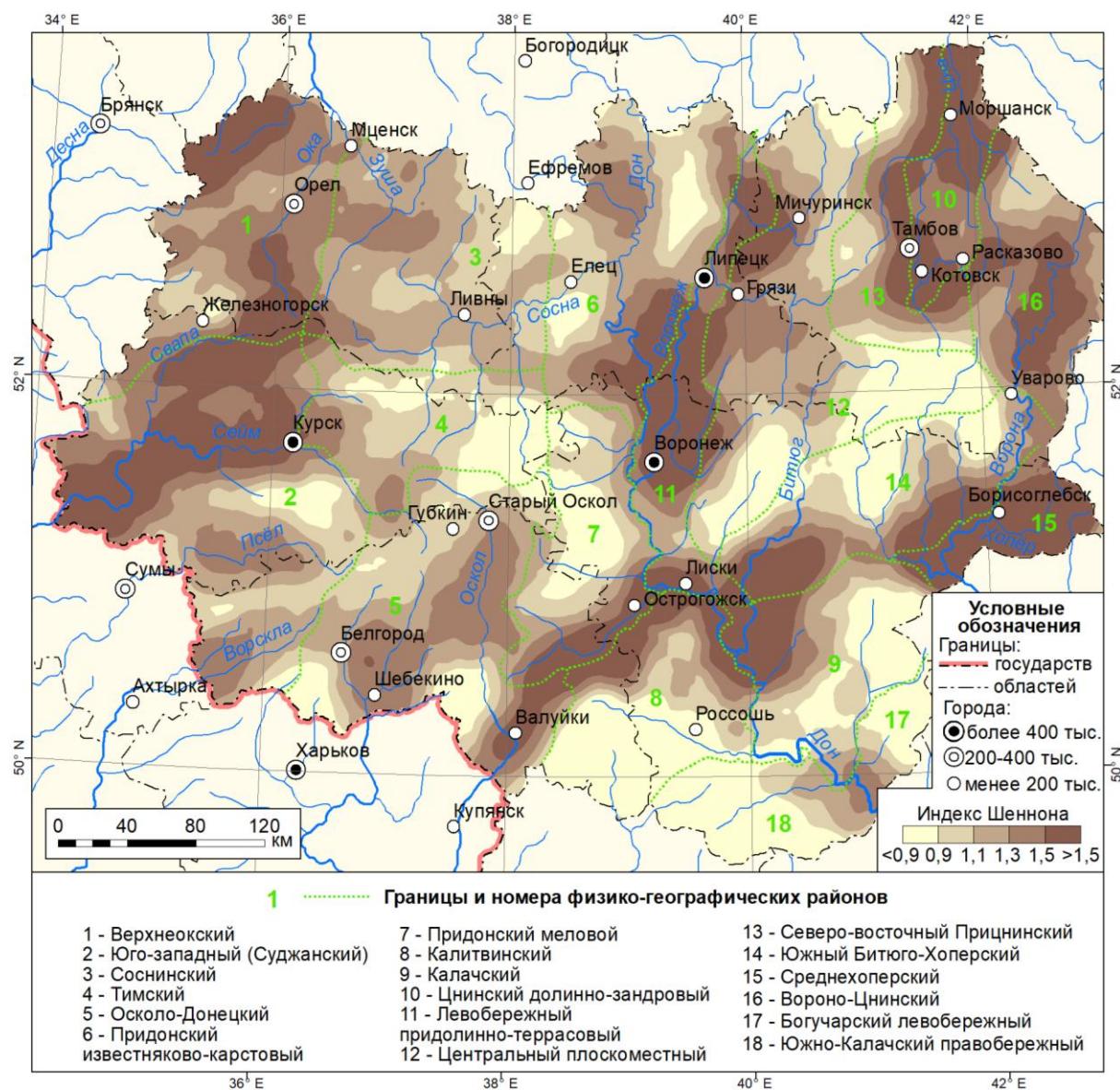


Рис. 3. Значения индекса разнообразия Шеннона для почвенного покрова ЦЧР  
Fig. 3. Shannon diversity index values for soil cover of the Central-Chernozem Region

Среднее значение индекса Шеннона можно использовать для разделения участков с повышенным и пониженным почвенным разнообразием. При таком подходе в ЦЧР к участкам с повышенным почвенным разнообразием относится 52 % территории, а к участкам с пониженным почвенным разнообразием — 48 % территории. Всего выделяется

четыре крупных участка повышенного почвенного разнообразия и три крупных участка пониженного почвенного разнообразия.

Характер чередования участков повышенного и пониженного почвенного разнообразия различается в степной и лесостепной части ЦЧР. В лесостепной зоне, к северу от линии Борисоглебск – Острогожск – Валуйки (примерно по ней проходит ось Воейкова), участки повышенного и пониженного почвенного разнообразия простираются в субмеридиональном направлении (с севера на юг), а чередуются — в субширотном (с запада на восток). Здесь выделяется три участка повышенного почвенного разнообразия, между которыми расположены два участка пониженного почвенного разнообразия.

В степной зоне, к югу от линии Борисоглебск – Острогожск – Валуйки, наблюдается противоположная закономерность. Здесь участки повышенного и пониженного почвенного разнообразия простираются в субширотном направлении (с запада на восток), а чередуются — в субмеридиональном (с севера на юг). В степной части ЦЧР выделяется один участок повышенного почвенного разнообразия и один участок пониженного почвенного разнообразия. Ниже при описании расположения этих участков они будут сопоставлены с физико-географическими районами (ФГР) по районированию Ф. Н. Милькова.

Три участка повышенного почвенного разнообразия в лесостепной части ЦЧР можно условно обозначить как Западный (Окско-Сеймицкий), Центральный (Приворонежский) и Восточный (Цнинско-Воронинский) участки. Два участка пониженного почвенного разнообразия в лесостепной части ЦЧР можно обозначить как Западный (Среднерусский) и Восточный (Окско-Донский).

Западный (Окско-Сеймицкий) участок повышенного почвенного разнообразия лесостепной части ЦЧР расположен в Курской и Орловской обл. и охватывает Верхнеокский и северную часть Юго-Западного (Суджанского) ФГР Среднерусской возвышенности. Участок протягивается вдоль западной границы ЦЧР и предваряет с востока переход от Среднерусской возвышенности к Полесской и Приднепровской низменностям, а также переход от лесостепной зоны к зоне смешанных и широколиственных лесов. Восточная граница Западного участка повышенного почвенного разнообразия ЦЧР сначала идет с севера на юг по долинам Зуши и Неручи. Затем она проходит вдоль нижней (меридиональной) части долины Тускаря. После впадения Тускаря в Сейм граница участка поворачивает на запад и идет вдоль долины Сейма до впадения в него Реута. Западнее Реута участок охватывает междуречье Сейма и Псла.

Центральный (Приворонежский) участок повышенного почвенного разнообразия лесостепной части ЦЧР расположен в Воронежской и Липецкой обл. Он находится на стыке Среднерусской возвышенности и Окско-Донской низменности и охватывает Левобережный придолинно-террасовый физико-географический район (ФГР) Окско-Донской низменности. Участок начинается у северной границы ЦЧР и простирается до впадения р. Воронеж в Дон. К северу от Липецка участок охватывает территорию по левобережью р. Воронеж. Между Липецком и Воронежем он занимает междуречье Дона, Воронежа и Усмани.

Восточный (Цнинско-Воронинский) участок повышенного почвенного разнообразия ЦЧР расположен в Тамбовской обл. Этот участок охватывает Цнинский долинно-зандровый ФГР Окско-Донской низменности и Вороно-Цнинский ФГР окраины Приволжской возвышенности. Он предваряет с запада переход от Окско-Донской равнины к Приволжской возвышенности. Этот участок занимает бассейн Цны и бассейн Вороны.

Западный (Среднерусский) участок пониженного почвенного разнообразия лесостепной части ЦЧР протягивается с севера на юг через все области за исключением Тамбовской. Он охватывает территорию бассейнов Сосны, Оскола, Северского Донца, Ворсклы, верховья Псела и Сейма, Правобережье Дона, а также охватывает пять ФГР на Среднерусской возвышенности: Соснинский, Тимский, Придонский известняково-карсто-

вый, Придонский меловой, Осколо-Донецкий. В силу своего большого размера этот участок неоднороден по почвенному разнообразию. В южной его части вкраплены небольшие ареалы повышенного почвенного разнообразия.

Восточный (Окско-Донской) участок пониженного почвенного разнообразия расположен в Тамбовской, Липецкой и Воронежской обл., в пределах Центрального плоскогорийского ФГР и западной части Северо-Восточного Прицнинского ФГР Окско-Донской низменности. В западной своей части он охватывает бассейн Икорца и верхнюю часть бассейна Битюга. Восточнее он расширяется, охватывая территории вокруг водоразделов Цны, Хопра и Битюга. Далее на север участок продолжается вдоль водораздела Цны и Воронежа.

Участок повышенного почвенного разнообразия в степной части Черноземья находится в Белгородской и Воронежской обл. Он расположен вдоль линии Борисоглебск – Острогожск – Валуйки, на стыке двух растительных зон — лесостепной и степной. Этот участок протягивается вдоль р. Тихая Сосна, затем вдоль широтного отрезка Дона (в р-не Лисок), далее охватывает междуречье Дона, Битюга и Осереди и восточнее протягивается вдоль Хопра.

Участок пониженного почвенного разнообразия в степной части ЦЧР расположен по обе стороны от Дона к югу от линии Борисоглебск – Острогожск – Валуйки. К востоку от Дона этот участок охватывает Калачскую возвышенность и расположенный на ней бассейн Толучеевки. К западу от Дона участок охватывает бассейны Богучара, Черной Калитвы и Айдара. Это территория Богучарского правобережного и Южно-Калачского левобережного ФГР Среднерусской возвышенности.

На территории ЦЧР различные почвы неравномерно распределены между участками высокого и низкого почвенного разнообразия (рис. 4).

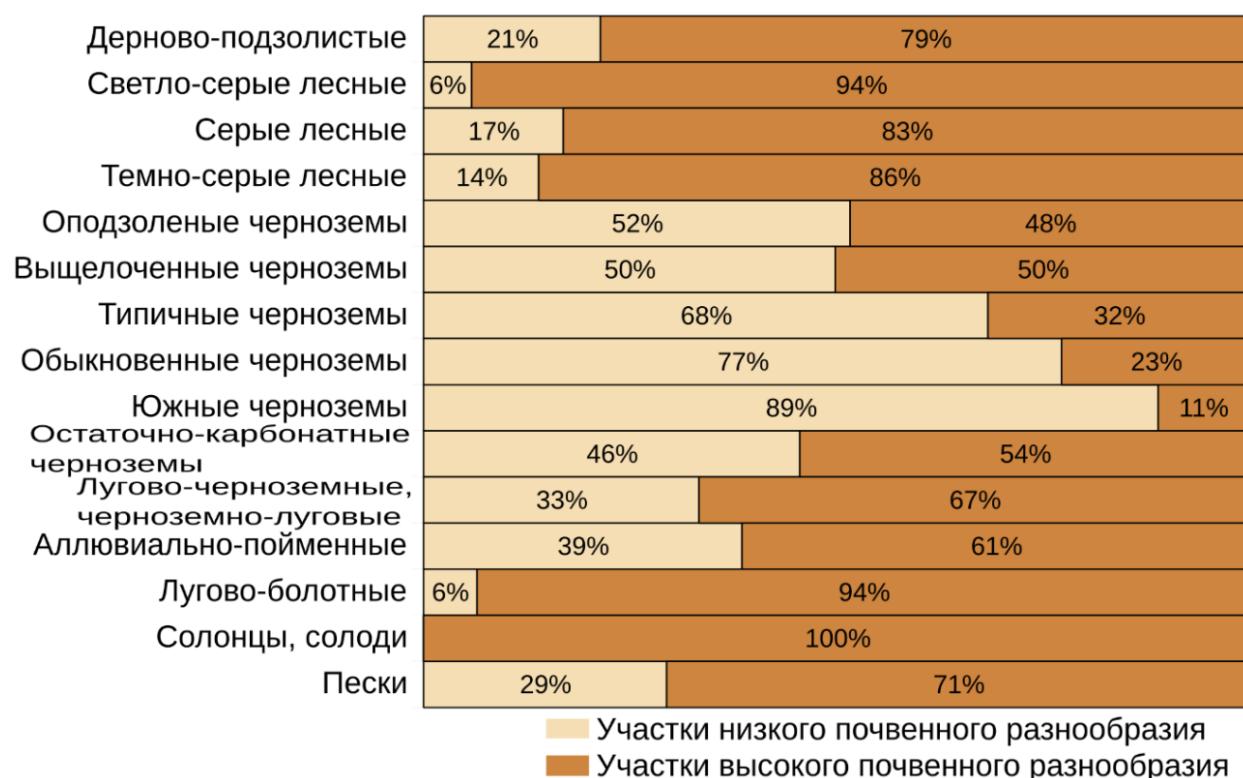


Рис. 4. Распределение почв по участкам повышенного и пониженного почвенного разнообразия

Fig. 4. Distribution of soils into areas of high and low soil diversity

На участках повышенного почвенного разнообразия увеличена доля дерново-подзолистых, светло-серых, серых и темно-серых лесных почв. Это почвы, сформировавшиеся под лесной растительностью. Они встречаются на окраине растительной зоны смешанных и широколиственных лесов и в лесостепной зоне. Как отмечалось выше, увеличение почвенного разнообразия совпадает с территорией, где одна растительная зона переходит в другую.

На участках повышенного разнообразия также выше доля лугово-черноземных и черноземно-луговых, аллювиально-пойменных и лугово-болотных почв. Как отмечалось выше, увеличение почвенного разнообразия совпадает с территориями, где одна геоморфологическая провинция переходит в другую. Для таких территорий характерна повышенная густота речной сети и большая ширина речных долин.

Основным почвенным фоном территории, почвами, преобладающими в центральных частях геоморфологических провинций и в центре лесостепной зоны, являются черноземы. Именно такие территории в ЦЧР отличаются пониженным почвенным разнообразием.

Подытоживая анализ расположения участков с повышенным и пониженным почвенным разнообразием, можно сформулировать главную географическую закономерность. Она заключается в том, что в ЦЧР участки повышенного почвенного разнообразия приурочены к границам крупных природных регионов (растительных зон и геоморфологических провинций). Перефразируя — повышенное почвенное разнообразие сопряжено с региональными ландшафтными экотонами. Участки пониженного почвенного разнообразия, наоборот, тяготеют к центральным частям крупных природных регионов (рис. 3).

Наличие пространственной сопряженности региональных ландшафтных экотонов и повышенного почвенного разнообразия упоминается для северо-запада европейской территории России и Среднего Поволжья [Абакумов, Гагарина, 2015]. Для ЦЧР такое явление ранее не описывалось, а существующие обобщения географии почвенного покрова проведены на более низком уровне иерархии геосистем — на уровне типов местности [Соловиченко и др., 2012].

В целом почвенное разнообразие ландшафтных экотонов на территории России пока еще остается почти не исследованным. Его изучение в перспективе способствует развитию пространственного анализа в экологическом почвоведении, превращая его, по сути, в гомолог ландшафтной экологии в ландшафтovedении [Абакумов, Гагарина, 2015]. Уже сегодня очевидно, что одним из факторов развития этого направления является активизация работ по количественной оценке почвенного разнообразия с помощью ландшафтных метрик. Использование языка R и его специализированных пакетов при решении этой задачи может стать стандартом анализа пространственных данных, также как применение R стало для многих ученых стандартом статистического анализа.

## ВЫВОДЫ

Язык R и его дополнительный пакет *landscapemetrics* являются удобным и эффективным средством анализа пространственной структуры почвенного покрова, в т. ч. для оценки и картографирования почвенного разнообразия. Анализ географии ландшафтных метрик, рассчитанных для почвенной карты ЦЧР, показал неоднородность этого региона по почльному разнообразию. Для ЦЧР характерно чередование участков повышенного и пониженного почвенного разнообразия. Характер этого чередования различается в степной и лесостепной части ЦЧР. В лесостепи чередование происходит с запада на восток, а в степи — с севера на юг. В самом общем виде территорию ЦЧР можно разделить на семь частей — четыре участка повышенного почвенного разнообразия и три участка пониженного почвенного разнообразия. В лесостепной части ЦЧР находится три участка повы-

шенного и два участка пониженного почвенного разнообразия, в степной части ЦЧР — один участок повышенного и один участок пониженного почвенного разнообразия. Для участков повышенного почвенного разнообразия характерна приуроченность к границам крупных природных регионов (растительных зон или геоморфологических провинций). Другими словами, повышенное почвенное разнообразие проявляется в региональных ландшафтных экотонах. Для участков пониженного почвенного разнообразия характерна приуроченность к центральным частям крупных природных регионов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00169, <https://rscf.ru/project/23-17-00169/>.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This work was funded by the Russian Science Foundation, Project No. 23-17-00169, <https://rscf.ru/en/project/23-17-00169/>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абакумов Е. В., Гагарина Э. И. Геогенные экотоны и вопросы охраны почв. Теоретическая и прикладная экология, 2015. № 1. С. 102–105.
- Алябина И. О. Картографическая оценка разнообразия почв России. Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение, 2018. № 1. С. 8–15.
- Дергачева М. И. Экология почв: становление новой науки биосферного класса. Сибирский экологический журнал, 2009. Т. 16. № 2. С. 143–150.
- Красильников П. В., Герасимова М. И., Голованов Д. Л., Головлёва Ю. А., Конюшкова М. В., Сидорова В. А., Сорокин А. С. Разнообразие и пространственная организация почвенного покрова в разных картографических масштабах. Почвоведение, 2020. № 8. С. 913–920. DOI: 10.31857/S0032180X20080092.
- Лейзерович Е. Е. Об основных экономических районах (макрорайонах) России. Региональные исследования, 2014. № 3(45). С. 4–11.
- Овчинникова Т. В., Косинова И. И., Смольянинов В. М., Галкин А. Н., Ашихмина Т. В. Эколо-геодинамическая характеристика территории Центрально-Черноземного региона. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология, 2019. № 3. С. 104–110.
- Смирнова М. А., Геннадьев А. Н. Количественная оценка почвенного разнообразия: теория и методы исследования. Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2017. № 4. С. 3–11.
- Соловченко В. Д., Тютюнов С. И., Уваров Г. И. Воспроизводство плодородия почв и рост продуктивности сельскохозяйственных культур Центрально-Черноземного региона. Белгород: Отчий край, 2012. 255 с.
- Хазиев Ф. Х. Почва и экология. Вестник Академии наук РБ, 2017. Т. 24. № 3(87). С. 29–38.
- Behrens T., Schneider O., Lösel G., Scholten T., Hennings V., Felix-Henningsen P., Hartwich R. Analysis on Pedodiversity and Spatial Subset Representativity — The German Soil Map 1:1,000,000. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2009. V. 172. No. 1. P. 91–100. DOI: 10.1002/jpln.200700339.

Gerasimova M. I., Golovleva I. A., Konyushkova M. V., Sorokin A. S., Krasilnikov P. V. Assessment of Soil Diversity using Soil Maps with Different Scales in Eastern Fennoscandia, Russia. *Geoderma Regional*, 2020. V. 21. Art. e00274. DOI: 10.1016/j.geodrs.2020.e00274.

Hesselbarth M. H., Sciaini M., With K. A., Wiegand K., Nowosad J. Landscapemetrics: An Open-Source R Tool to Calculate Landscape Metrics. *Ecography*, 2019. V. 42. No. 10. P. 1648–1657. DOI: 10.1111/ecog.04617.

Luo M., Wang T., Li Z., Zhang T., Yang J., Li N., Li Z. Spatial Distribution Characteristics of Pedodiversity and its Major Driving Factors in China based on Analysis Units of Different Sizes. *Catena*, 2021. V. 207. Art. 105701. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105701.

Nowosad J., Stepinski T. F. Information Theory as a Consistent Framework for Quantification and Classification of Landscape Patterns. *Landscape Ecology*, 2019. V. 34. P. 2091–2101. DOI: 10.1007/s10980-019-00830-x.

Pindral S., Kot R., Hulisz P. The Influence of City Development on Urban Pedodiversity. *Scientific Reports*, 2022. No. 12. Art. 6009. DOI: 10.1038/s41598-022-09903-5.

Saldaña A. Pedodiversity and Landscape Ecology. *Pedodiversity*. Boca Raton: CRC Press, 2013. P. 105–132. DOI: 10.1201/b14780.

## REFERENCES

Abakumov E. V., Gagarina E. I. Geogenic Ecotones and Issues of Soil Protection. *Theoretical and Applied Ecology*, 2015. No. 1. P. 102–105 (in Russian).

Alyabina I. O. Cartographic Assessment of Soil Diversity in Russia. *Moscow University Bulletin. Series 17. Soil Science*, 2018. No. 1. P. 8–15 (in Russian).

Behrens T., Schneider O., Lösel G., Scholten T., Hennings V., Felix-Henningsen P., Hartwich R. Analysis on Pedodiversity and Spatial Subset Representativity — The German Soil Map 1:1,000,000. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2009. V. 172. No. 1. P. 91–100. DOI: 10.1002/jpln.200700339.

Dergacheva M. I. Soil Ecology: The Formation of a New Science of the Biosphere Class. *Siberian Ecological Journal*, 2009. V. 16. No. 2. P. 143–150 (in Russian).

Gerasimova M. I., Golovleva I. A., Konyushkova M. V., Sorokin A. S., Krasilnikov P. V. Assessment of Soil Diversity using Soil Maps with Different Scales in Eastern Fennoscandia, Russia. *Geoderma Regional*, 2020. V. 21. Art. e00274. DOI: 10.1016/j.geodrs.2020.e00274.

Hesselbarth M. H., Sciaini M., With K. A., Wiegand K., Nowosad J. Landscapemetrics: An Open-Source R Tool to Calculate Landscape Metrics. *Ecography*, 2019. V. 42. No. 10. P. 1648–1657. DOI: 10.1111/ecog.04617.

Khaziev F. Kh. Soil and Ecology. *Bulletin of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*, 2017. V. 24. No. 3(87). P. 29–38 (in Russian).

Krasilnikov P. V., Gerasimova M. I., Golovanov D. L., Golovleva Yu. A., Konyushkova M. V., Sidorova V. A., Sorokin A. S. Diversity and Spatial Organization of Soil Cover at Different Cartographic Scales. *Eurasian Soil Science*, 2020. No. 8. P. 913–920 (in Russian). DOI: 10.31857/S0032180X20080092.

Leizerovich E. E. About the Main Economic Regions (Macroregions) of Russia. *Regional Research*, 2014. No. 3(45). P. 4–11 (in Russian).

Luo M., Wang T., Li Z., Zhang T., Yang J., Li N., Li Z. Spatial Distribution Characteristics of Pedodiversity and its Major Driving Factors in China based on Analysis Units of Different Sizes. *Catena*, 2021. V. 207. Art. 105701. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105701.

*Nowosad J., Stepinski T. F.* Information Theory as a Consistent Framework for Quantification and Classification of Landscape Patterns. *Landscape Ecology*, 2019. V. 34. P. 2091–2101. DOI: 10.1007/s10980-019-00830-x.

*Ovchinnikova T. V., Kosinova I. I., Smolyaninov V. M., Galkin A. N., Ashikhmina T. V.* Ecological and Geodynamic Characteristics of the Territory of the Central-Chernozem Region. *Bulletin of Voronezh State University. Series: Geology*, 2019. No. 3. P. 104–110 (in Russian).

*Pindral S., Kot R., Hulisz P.* The Influence of City Development on Urban Pedodiversity. *Scientific Reports*, 2022. No. 12. Art. 6009. DOI: 10.1038/s41598-022-09903-5.

*Saldaña A.* Pedodiversity and Landscape Ecology. *Pedodiversity*. Boca Raton: CRC Press, 2013. P. 105–132. DOI: 10.1201/b14780.

*Smirnova M. A., Gennadiev A. N.* Quantitative Assessment of Soil Diversity: Theory and Research Methods. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya* (Moscow University Bulletin. Series 5. Geography), 2017. No. 4. P. 3–11 (in Russian).

*Solovichenko V. D., Tyutyunov S. I., Uvarov G. I.* Reproduction of Soil Fertility and Increase in Productivity of Agricultural Crops in the Central-Chernozem Region. Belgorod: Otchiy Krai (Native Land), 2012. 255 p. (in Russian).

---