

П.А. Украинский¹

ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМЫ ЛЕСОВ НА СРЕДНЕРУССКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ В СУБМЕРИДИОНАЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ (КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ НА ОСНОВЕ ЛАНДШАФТНЫХ МЕТРИК)

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена количественному описанию геометрической формы лесных массивов на территории Среднерусской возвышенности. Это новое направление в исследованиях инсулярности лесов лесостепной зоны. Оно дополняет существующие работы в области ландшафтной экологии, которые посвящены площади, расположению и фрагментированности лесов в лесостепной зоне. Данное исследование выполнено на четырех ключевых участках размером 30 на 30 км² каждый. Участки выстроены по линии север-юг, и каждый участок расположен в одной из природных подзон Среднерусской возвышенности (подзоны северной, типичной, южной лесостепи и степная зона). Для каждого участка по снимкам со спутника Sentinel-2 в программе ArcGIS 10.5 были закартографированы лесные массивы. Затем в среде для статистических вычислений R с помощью дополнительного пакета *landscapemetrics* были рассчитаны ландшафтные метрики, которые характеризуют сложность формы лесных массивов. Были использованы шесть ландшафтных метрик: средний индекс описывающей окружности (CIRCLE), средний индекс смежности (CONTIG), средний индекс фрактальной размерности (FRAC), фрактальная размерность связи периметра и площади (PAFRAC), среднее отношение периметра к площади (PARA) и средний индекс формы (SHAPE). Сравнение ландшафтных метрик для разных ключевых участков показало, что сложность формы лесов нарастает в направлении с севера на юг. Это связано с изменением ландшафтной приуроченности лесов. С севера на юг сокращается доля лесов, произрастающих на плакорах и приводораздельных склонах, и увеличивается доля байрачных лесов. Максимальное увеличение сложности формы наблюдается при переходе от лесостепной зоны к степной зоне. Из всех использованных ландшафтных метрик наибольшую чувствительность к изменению формы лесных массивов показали метрики PAFRAC и SHAPE. Эти метрики являются наиболее полезными при сравнении формы лесных массивов на различных территориях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: леса, лесостепь, инсулярность, ландшафтные метрики, Среднерусская возвышенность

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Федерально-региональный центр аэрокосмического и наземного мониторинга объектов и природных ресурсов, ул. Победы, д. 85, 308015, Белгород, Россия, *e-mail*: pa.ukrainski@gmail.com

Pavel A. Ukrainskiy¹

**CHANGES IN THE FORM OF FORESTS IN THE CENTRAL
RUSSIAN UPLAND IN THE SUBMERIDIONAL DIRECTION
(QUANTITATIVE DESCRIPTION BASED ON LANDSCAPE METRICS)**

ABSTRACT

The article is dedicated to a quantitative description of the geometric shape of forests in the territory of the Central Russian Upland. This is a new direction in the research of forest insularity in the forest-steppe zone. It complements the existing works in the field of landscape ecology, which are dedicated to the area, location and fragmentation of forests in the forest-steppe zone. This study was carried out at four key sites with a size of 30 by 30 km each. The sites are located along the north-south line, and each site is located in one of the natural subzones of the Central Russian Upland (subzones of the northern, typical, southern forest-steppe and the steppe zone). For each site, forests were mapped using images from the Sentinel-2 satellite in the ArcGIS 10.5 program. Then, in the 'R' free software environment for statistical computing, landscape metrics were calculated that characterize the complexity of the shape of forest areas, using the additional landscapemetrics package. Six landscape metrics were used, namely: average related circumscribing circle (CIRCLE), average contiguity index (CONTIG), average fractal dimension index (FRAC), perimeter-area fractal dimension (PAFRAC), average perimeter-area ratio (PARA) and average shape index (SHAPE). A comparison of landscape metrics for different key sites showed that the complexity of the forest form increases in the direction from north to south. This is due to a change in the landscape localization of forests. From north to south, the proportion of forests growing on watersheds decreases, and the proportion of ravine forests increases. The maximum increase in the complexity of the form is observed during the transition from the forest-steppe zone to the steppe zone. Of all the landscape metrics used, the PAFRAC and SHAPE metrics showed the greatest sensitivity to changes in the shape of forest areas. These metrics are most useful when comparing the forests shapes in different areas.

KEYWORDS: forests, forest-steppe, insularity, landscape metrics, Central Russian Upland

ВВЕДЕНИЕ

Среднерусская возвышенность относится к числу густонаселенных и экономически развитых территорий. В процессе заселения и хозяйственного освоения большая часть местных природных ландшафтов была превращена в антропогенно-преобразованные ландшафты – агроландшафты, селитебные и техногенные ландшафты. Сохранившиеся участки естественных или малообразованных ландшафтов имеют здесь большую ценность. Их наличие и сохранение играет решающую роль в обеспечении экологической стабильности территории и поддержке сохранения биоразнообразия.

Среднерусская возвышенность расположена большей частью в лесостепной зоне. Леса здесь составляют значительную часть сохранившихся природных ландшафтов. До начала активного заселения территории они здесь не образовывали сплошного ареала, а перемежались со степными участками. Хозяйственное освоение XVII-XX веков сопровождалось дроблением лесных массивов и уменьшением их площади [Чендев и др., 2008]. В результате совокупного влияния природных и антропогенных причин в настоящее время распространение лесов на Среднерусской возвышенности имеет островной характер. В отдельных работах такая особенность лесов обозначается термином «инсулярность» [Михно, 2012].

Работы, в которых исследуется островной характер распространения лесов на Среднерусской возвышенности, посвящены преимущественно изучению расположения

¹Belgorod State National Research University, Federal and Regional Centre for aerospace and ground monitoring of objects and natural resources, Pobedy str., 85, 308015, Belgorod, Russia, e-mail: pa.ukrainski@gmail.com

лесов, их площади и оценке степени фрагментированности [Терехин, Чендев, 2018; Украинский и др., 2017]. При этом форме лесных массивов уделяется мало внимания. Но сейчас, благодаря появлению в арсенале исследователей метода ландшафтных метрик и программного обеспечения для их расчета, существует возможность детального изучения формы лесных массивов. Подобный опыт уже получен в разных регионах мира [Mandal, Chattarjee, 2020; Wang, Pu, 2018]. Представленная работа посвящена количественному описанию формы лесных массивов на Среднерусской возвышенности. Целью работы является изучение того, как изменяется форма лесных массивов при перемещении в субмеридиональном направлении. В этом направлении сменяются границы природных зон и подзон. И в этом же направлении, с севера на юг, шло заселение и освоение территории.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этом исследовании Среднерусская возвышенность рассматривается в самых широких границах, включая территории Калачской возвышенности и Донской гряды. Для изучения формы лесов на территории Среднерусской возвышенности были выбраны четыре ключевых участка (рис. 1). Участки сменяют друг друга в направлении с севера на юг. Каждый из участков соответствует отдельной природной подзоне или зоне.

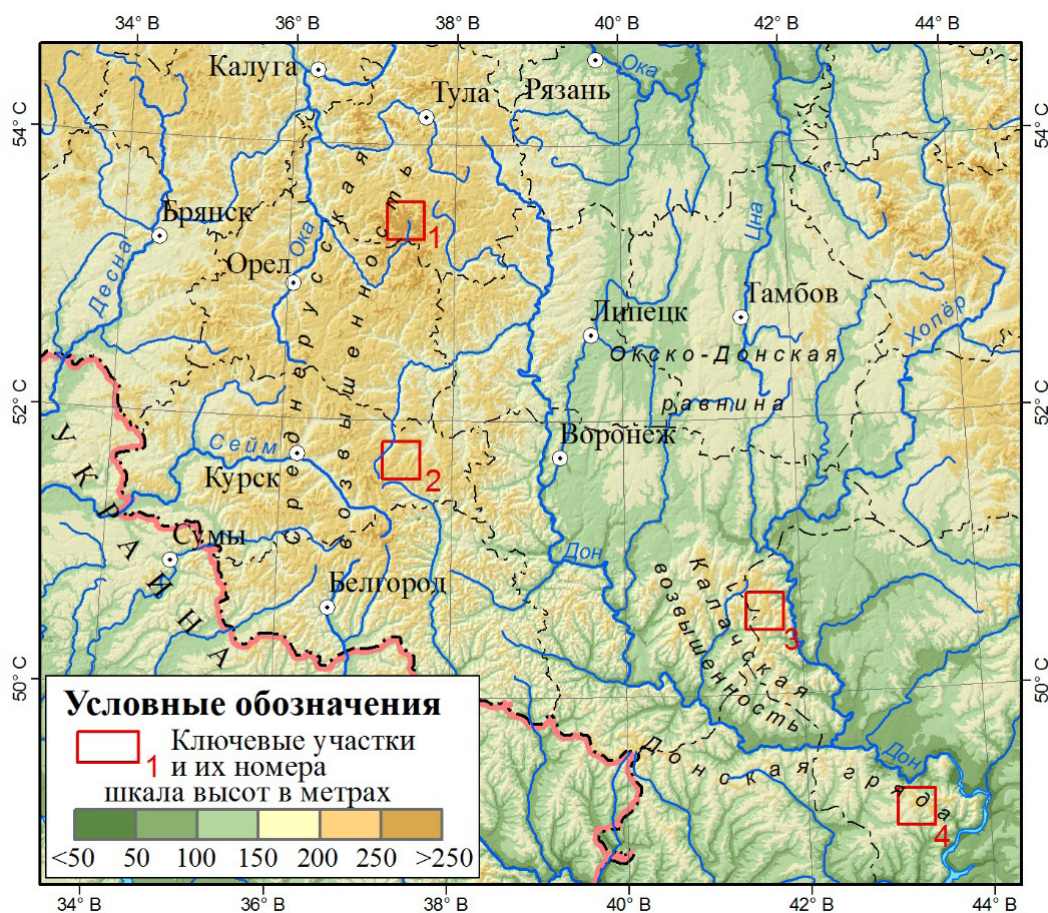


Рис. 1. Расположение ключевых участков на территории Среднерусской возвышенности

Fig. 1. Location of key sites in the territory of the Central Russian Upland

Первый, самый северный участок, расположен на юге Тульской области, на стыке Плавского, Тепло-Огаревского, Чернского и Каменского районов. Эта часть Среднерусской возвышенности называется Плавское плато. Территория первого ключевого участка относится к подзоне северной лесостепи.

Второй ключевой участок находится на востоке Курской области. Его территория относится к Тимскому, Черемисиновскому и Советскому району. Небольшие участ-

ки принадлежат к Мантуровскому и Горшеченскому району. Ключевой участок с запада примыкает к Тимско-Шигровской гряде Курско-Орловского плато Среднерусской возвышенности. Эта территория относится к подзоне типичной лесостепи.

Третий ключевой участок расположен в пределах Калачской возвышенности на границе Воронежской (Воробьевский и Калачеевский районы) и Волгоградской области (Урюпинский и Нехаевский районы). Эта территория относится к подзоне южной лесостепи. Четвертый ключевой участок расположен на западе Волгоградской области, на стыке Клетского, Иловлинского и Калачевского районов. Эта территория находится в степной зоне и является частью Донской гряды.

Ключевые участки представляют собой квадраты размером 30 на 30 км². Такой размер достаточно большой для того, чтобы охватить все местное разнообразие природных условий. И одновременно такой размер не слишком большой чтобы можно было соблюсти условия, в соответствии с которыми выбиралось конкретное место расположения участка. Это были следующие условия:

- отсутствие на территории областных и районных центров, городов и поселков городского типа,
- отсутствие на территории особо охраняемых природных территорий федерального значения (заповедников и национальных парков),
- нахождение на территории водоразделов основных рек, вытекающих с территории возвышенности (соответственно максимальные для данного региона высоты).

В соответствии с этими условиями из анализа исключались как территории с высокой степенью антропогенной преобразованности, так и минимально преобразованные территории. Выбранные ключевые участки соответствуют неурбанизированным территориям с типичными зональными условиями. С учетом расположения на водоразделах с максимальными местными высотами, ключевые участки отображают, в первую очередь, условия верхних высотно-ландшафтных ярусов Среднерусской возвышенности [Горбунов, Бевз, 2010].

Для каждого ключевого участка была составлена карта лесов на основе визуального дешифрирования космических снимков со спутников Sentinel-2A/B. Снимки были скачаны на веб-сервисе Land Viewer¹. Использовались снимки летнего сезона, снятые в 2020 году (табл. 1). При дешифрировании снимки визуализировались в программе ArcGIS 10.5 с использованием двух комбинаций каналов Sentinel-2 – в комбинации 4:3:2 (натуральные цвета) и 8:4:3 (комбинация с каналом ближнего инфракрасного диапазона). В ходе визуального дешифрирования в программе ArcGIS 10.5 производилась ручная векторизация лесов. В результате был получен векторный слой лесов с полигональной геометрией в формате шейп-файла.

Табл. 1. Космические снимки, использованные для картографирования лесов
Table 1. Satellite images used for forest mapping

Ключевой участок	Дата съемки	Спутник	Номер тайла
1	30.06.2020	Sentinel-2A	37UYE
2	25.06.2020	Sentinel-2B	37UCT
3	04.07.2020	Sentinel-2A	37UFS
4	16.06.2020	Sentinel-2B	38ULV

Для количественного описания формы лесов использовались шесть ландшафтных метрик (табл. 2), которые характеризуют степень сложности формы полигонального объекта. Далее в тексте эти метрики будут обозначаться с помощью акронимов, приня-

¹ Land Viewer. Web resource: <https://eos.com/landviewer> (accessed 28.04.2022)

тых в программе FRAGSTAT¹. Это известная и часто используемая программа для расчета ландшафтных метрик. Ее создатели популяризовали метод ландшафтных метрик, а используемая во FRAGSTAT терминология стала общеупотребительной.

Из шести использованных метрик одна метрика – PAFRAC – рассчитывается для всего ключевого участком в целом (расчет на уровне класса в терминологии FRAGSTAT). Остальные пять метрик рассчитываются для каждого отдельного полигонального объекта (расчет на уровне фрагмента (патча) в терминологии FRAGSTAT) с последующим вычислением среднего значения в пределах ключевого участка.

Табл. 2. Ландшафтные метрики, использованные для описания формы лесов
Table 2. Landscape metrics used to describe the shape of forests

Название	Акроним FRAGSTAT	Диапазон значений
Средний индекс описывающей окружности [Baker, Cai, 1992]	CIRCLE	От 0 до 1
Средний индекс смежности [LaGro, 1991]	CONTIG	От 0 до 1
Средний индекс фрактальной размерности	FRAC	От 1 до 2
Среднее отношение периметра к площади	PARA	От 0 до $+\infty$
Фрактальная размерность связи периметра и площади	PAFRAC	От 1 до 2
Средний индекс формы [Patton, 1975]	SHAPE	От 1 до $+\infty$

В этом исследовании расчет ландшафтных метрик был выполнен в среде для статистических вычислений R² (версия 3.6.3) с использованием дополнительного пакета landscapemetrics (версия 1.5.1) [Hesselbarth et al., 2019]. Пакет landscapemetrics выбран в качестве эффективной альтернативы традиционно используемой программы FRAGSTAT. В нем используется та же терминология и рассчитываются те же метрики, что и во FRAGSTAT. Но пакет landscapemetrics обеспечивает воспроизводимость результатов (за счет сохранения скриптов на языке R), имеет возможности поточной обработки данных и гибкие настройки структуры получаемых данных.

Пакет landscapemetrics, как и программа FRAGSTAT, работает только с растровыми данными. Поэтому векторный слой лесов для расчета ландшафтных метрик был конвертирован в растровый слой формата tiff. Это растрово-векторное преобразование выполнено в программе ArcGIS 10.5. Процедура конвертации имеет одну настройку, влияющую на получаемый растр. Оно было задано равным 10 м/пиксель, что соответствует разрешению снимков Sentinel-2A/B. Импорт растров и чтение их в R выполнено с помощью инструментов дополнительного пакета raster³ (версия 3.1-5).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

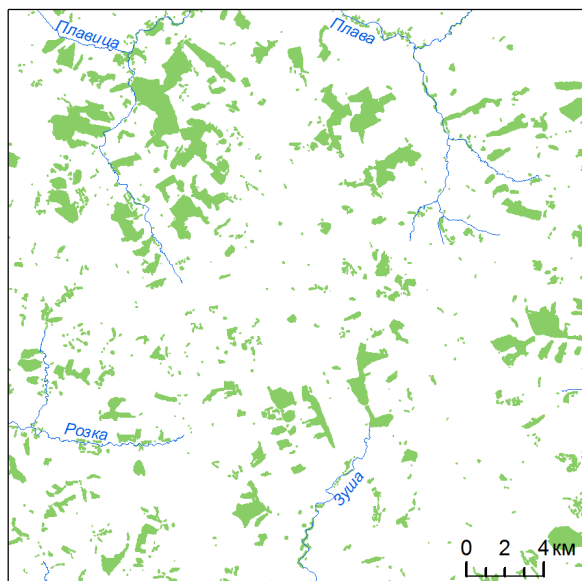
Результаты дешифрирования лесов представлены в виде картосхем на рисунке 2. Наблюдается уменьшение лесистости в направлении с севера на юг. Для первого ключевого участка (Плавское плато) лесистость составляет 8,20 %, на втором ключевом участке лесистость составляет 5,50 %, на третьем ключевом участке (Калачская возвышенность) лесистость составляет 7,99 %, на четвертом ключевом участке (Донская гряда)

¹ K. McGarigal, S.A. Cushman, E. Ene. (2012). FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. Web resource: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html> (accessed 28.04.2022).

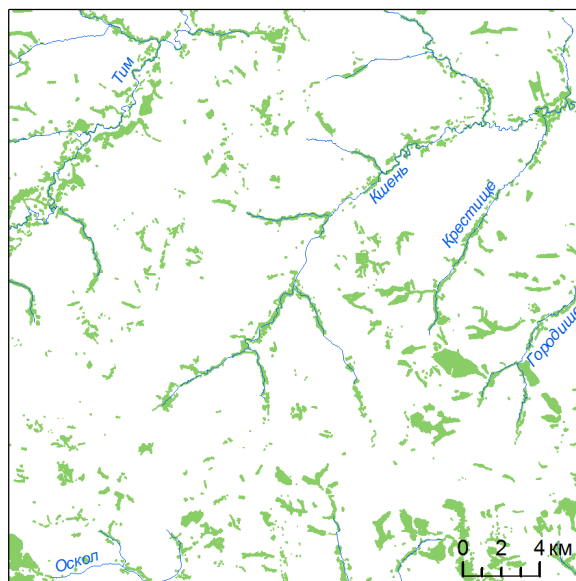
² R Core Team (2020). The R project for statistical computing. Web resource: <https://www.R-project.org/> (accessed 28.04.2021).

³ R.J. Hijmans (2020). raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 3.1-5. Web resource: <https://CRAN.R-project.org/package=raster> (accessed 28.04.2021).

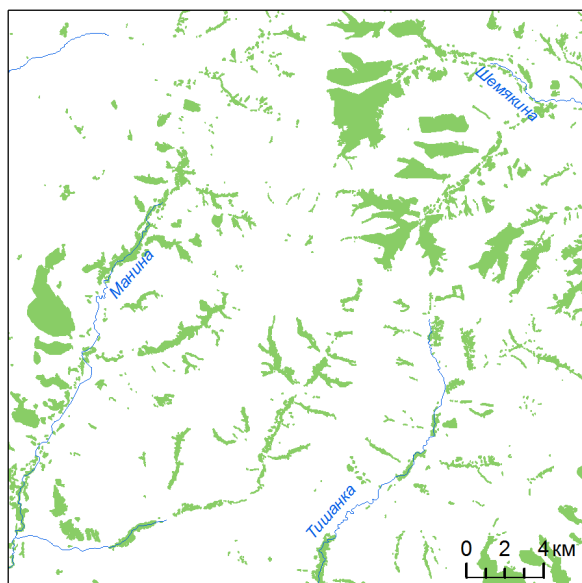
лесистость составляет 1,79 %. Помимо сокращения общей площади лесов уменьшается также средняя площадь лесного массива. На первом ключевом участке средняя площадь лесного массива составляет 5,11 га, на втором ключевом участке – 3,31 га, на третьем ключевом участке – 4,81 га, на четвертом ключевом участке – 2,12 га.



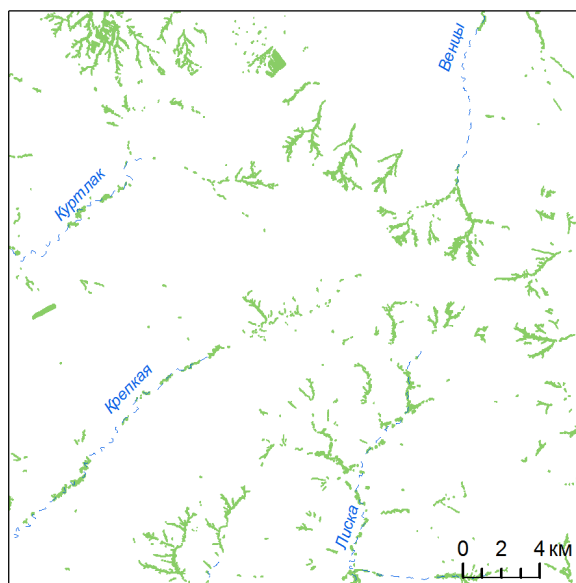
Участок 1 - Плавское плато



Участок 2 - Курско-Орловское плато



Участок 3 - Калачская возвышенность



Участок 4 - Донская гряда

Рис. 2. Картограммы лесов на ключевых участках
Fig. 2. Maps of forests in key sites

Значения ландшафтных метрик для ключевых участков показаны на рисунке 3. Для метрик FRAC, CIRCLE, PAFRAC и SHAPE значения увеличиваются при перемещении с севера на юг. Значения метрик CONTIG и PARA уменьшаются при перемещении с севера на юг. Такой характер изменения ландшафтных метрик указывает на то, что на Среднерусской возвышенности при перемещении в субмеридиональном направлении с севера на юг происходит усложнение формы лесов (рис. 3).

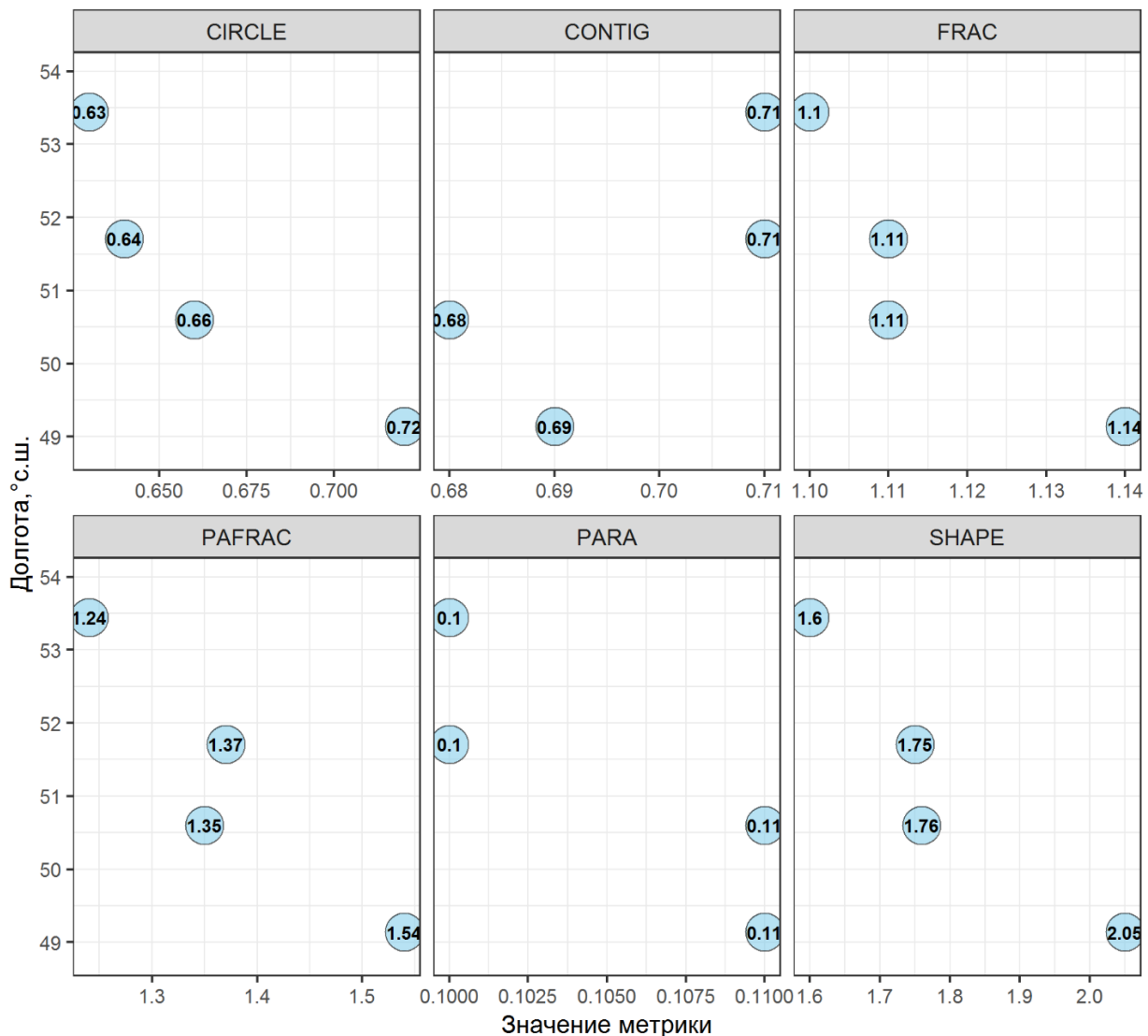


Рис. 3. Ландшафтные метрики формы лесов на ключевых участках
 Fig. 3. Landscape metrics of forest shape in key sites

Усложнение формы лесов при перемещении в южном направлении связано с изменением ландшафтной приуроченности лесов. К югу сокращается количество лесов, произрастающих на плакорах и приводораздельных склонах. Одновременно увеличивается доля байрачных лесов. Это изменение в ландшафтной приуроченности лесов соответствует климатическим изменениям, прежде всего уменьшению увлажнения территории при перемещении в южном направлении.

Форма байрачных лесов наследует форму верховьев овражно-балочной сети, в которых они произрастают. Поэтому байрачные леса часто имеют сложную разветвленную форму. Леса на плакорах и приводораздельных склонах, напротив, чаще имеют компактную форму и границу с небольшим количеством изгибов. В ходе хозяйственного освоения территории площадь приводораздельных лесов сокращалась. Нередко одновременно при этом упрощалась их форма. Рельеф на плакорах и пологих склонах позволял создавать для оставляемых после рубок фрагментов лесов прямые границы, удобные с точки зрения организации землеустройства. Примеры таких лесных массивов наблюдаются на первом ключевом участке (Плавское плато), находящемся на севере Среднерусской возвышенности.

Разные ландшафтные метрики в разной степени чувствительны к изменению формы лесных массивов. Если судить по разбросу значений, то наибольшие различия между участками показали метрики PAFRAC и SHAPE. Слабая чувствительность оказалась у метрик FRAC и PARA. Промежуточное положение занимает метрика CIRCLE.

Метрики с высокой чувствительностью к изменению формы показывают неравномерную динамику изменений между ключевыми участками. При переходе к последнему ключевому участку (участок на Калачской возвышенности) происходит более сильное усложнение формы лесов, чем при переходе между более северными ключевыми участками. Это совпадает с пересечением зональной границы между лесостепью и степью и соответствующими климатическими изменениями. Донская гряда, находящаяся в пределах степной зоны, имеет заметно меньшее увлажнение территории, чем более северные части Среднерусской возвышенности. Условия для произрастания леса здесь наихудшие из всех четырех ключевых участков. Поэтому леса расположены почти исключительно в овражно-балочной сети. При этом они занимают днища балок, донные и боковые овраги, почти не переходя на склоны балок. Из-за этого форма лесных массивов становится очень сложной.

Выявленные закономерности изменения формы лесов на Среднерусской возвышенности характерны для неурбанизированных территорий, принадлежащих к верхним ландшафтно-высотным ярусам. На других территориях (территории вокруг городов, территории в пределах нижних ландшафтно-высотных ярусов, в том числе в поймах крупных рек и на речных террасах) могут наблюдаться иные закономерности изменения формы лесов, что требует отдельного изучения.

ВЫВОДЫ

Изучение геометрической формы лесных массивов с помощью ландшафтных метрик является для региона Среднерусской возвышенности новым, но перспективным направлением исследований. Развитие этого направления может дать интересные результаты в контексте межкомпонентных связей внутри ландшафта, в частности связей между формой лесных массивов и рельефом, климатом и историей антропогенного воздействия. Ландшафтные метрики показали себя эффективным средством, позволяющим оценить степень сложности геометрической формы лесных массивов. Для лесов Среднерусской возвышенности полученные значения ландшафтных метрик указывают на усложнение геометрической формы, которое происходит при передвижении в субмеридиональном направлении с севера на юг. Среди рассмотренных шести ландшафтных метрик наиболее чувствительными к изменению формы лесных массивов оказались метрики PAFRAC и SHAPE. Эти метрики можно рекомендовать для сравнения формы лесных массивов на различных территориях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ, грант № 20-67-46017.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Science Foundation, grant No 20-67-46017.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбунов А.С., Бевз В.Н. Высотно-ландшафтные ярусы Центрального Черноземья. Вестник Воронежского отделения РГО, 2010. Т. 11. С. 15–18.
2. Михно В.Б. Ландшафтные особенности инсулярности дубрав Среднерусской лесостепи. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2012. № 1. С. 14–20.
3. Терехин Э.А., Чендев Ю.Г. Оценка изменения лесистости в современный период на юге Среднерусской возвышенности с использованием материалов разновременных космических съемок. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2018. Т. 15. № 3. С. 114–126. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-114-126.
4. Украинский П.А., Терехин Э.А., Павлюк Я.В. Фрагментация лесов верхней части бассейна реки Ворскла с конца XVIII века. Вестник Московского университета. Серия 5: География, 2017. № 1. С. 82–91.

5. Чендев Ю.Г., Петин А.Н., Серикова Е.В., Крамчанинов Н.Н. Деградация геосистем Белгородской области в результате хозяйственной деятельности. География и природные ресурсы, 2008. № 4. С. 69–75.
6. Baker W.L., Cai Y. The r.le programs for multiscale analysis of landscape structure using the GRASS geographical information system. *Landscape Ecology*, 1992. V. 7. P. 291–302. DOI: 10.1007/BF00131258.
7. Hesselbarth M.H.K., 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.
8. LaGro J. Assessing patch shape in landscape mosaics. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1991. V. 57. No. 3. P. 285–293.
9. Mandal M., Chattarjee N.D. Geo-statistical analysis to understand nature of forest patch shape complexity in panchet forest division under Bankura district, West Bengal. *Indian Journal of Ecology*, 2020. V. 47. No. 1. P. 96–101.
10. Patton D.R. A diversity index for quantifying habitat “edge”. *Wildlife Society Bulletin*, 1975. V. 3. No. 4. P. 171–173.
11. Wang W., Pu Y. Analysis of Landscape Patterns and the Trend of Forest Resources in the Three Gorges Reservoir Area. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2018. V. 6. No. 5. P. 181–192. DOI: 10.4236/gep.2018.65015.

REFERENCES

1. Baker W.L., Cai Y. The r.le programs for multiscale analysis of landscape structure using the GRASS geographical information system. *Landscape Ecology*, 1992. V. 7. P. 291–302. DOI: 10.1007/BF00131258.
2. Chendev Yu.G. Petin A.N., Serikova E.V., Kramchaninov N.N. Degradation of geosystems of the Belgorod region as a result of economic activity. *Geography and natural resources*, 2008. No. 4. P. 69–75 (in Russian).
3. Gorbunov A.S., Bezv V.N. Altitude-landscape tiers of the Central Chernozem Region. *Bulletin of the Voronezh branch of the Russian Geographical Society*, 2010. V. 11. P. 15–18 (in Russian).
4. Hesselbarth M.H.K., 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.
5. LaGro J. Assessing patch shape in landscape mosaics. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1991. V. 57. No. 3. P. 285–293.
6. Mandal M., Chattarjee N.D. Geo-statistical analysis to understand nature of forest patch shape complexity in panchet forest division under Bankura district, West Bengal. *Indian Journal of Ecology*, 2020. V. 47. No. 1. P. 96–101.
7. Mikhno V.B. Landscape features of insularity of oak forests in the Central Russian forest-steppe. *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*, 2012. No. 1. P. 14–20 (in Russian).
8. Patton D.R. A diversity index for quantifying habitat “edge”. *Wildlife Society Bulletin*, 1975. V. 3. No. 4. P. 171–173.
9. Terekhin E.A., Chendev Yu.G. Estimation of forest cover changes during modern period in the south of the Central Russian Upland using multiyear remote sensing data. *Current problems in remote sensing of the Earth from Space*, 2018. V. 15. No. 3. P. 114–126 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-114-126.
10. Ukrainskij P.A., Terekhin E.A., Pavlyuk Ya.V. Fragmentation of forests in the upper part of the Vorskla river basin since the end of the 18th century. *Moscow University Bulletin. Series 5. Geography*, 2017. No. 1. P. 82–91 (in Russian).
11. Wang W., Pu Y. Analysis of Landscape Patterns and the Trend of Forest Resources in the Three Gorges Reservoir Area. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2018. V. 6. No. 5. P. 181–192. DOI: 10.4236/gep.2018.65015.