

## ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА НА РАЗРАСТАНИЕ БАЙРАЧНОГО ЛЕСА: АНАЛИЗ С ПОМОЩЬЮ БИНОМИАЛЬНОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ РЕГРЕССИИ (НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА «ОСТРАСЬЕВЫ ЯРЫ» ЗАПОВЕДНИКА «БЕЛОГОРЬЕ»)

*П.А. Украинский*

Белгородский государственный национальный  
исследовательский университет, Белгород  
pa.ukrainski@gmail.com

**Аннотация.** «Острасьевы Яры» – это участок заповедника «Белогорье», лесостепная балка с байрачным лесом, разраставшимся здесь во второй половине XX – начале XXI в. По данным дистанционного зондирования известно, что в 1941 г. площадь леса насчитывала 11 га, в 1970 г. – 22 га, в 2010 г. – 34 га. Направление разрастания леса задано рельефом. Расселение древесной растительности шло с северо-западного склона балки на юго-восточный склон, из средней части балки – в верхнюю часть, с нижней части склонов – на верхнюю, с крутых участков – на более пологие, из боковых оврагов – на окружающий их склон.

В данной работе показана связь между геоморфометрическими параметрами и произрастанием леса в трех хронологических срезах. Эту связь описывают три модели биномиальной логистической регрессии – для 1941, 1970 и 2010 гг. Площадь под ROC-кривой (AUC) для 1941 г. равна 0,78, для 1970 г. – 0,74, для 2010 г. – 0,74. Предикторами в моделях являются уклон, расстояние от устья яра, индекс топографической позиции. Модель 1941 г. включает также экспозицию склона (в виде фиктивной переменной со значением «0» для юго-восточного склона и «1» для северо-западного склона). Сравнение коэффициентов регрессии для моделей, построенных на нормированных данных, показывает относительный вклад каждого предиктора. Со временем рос вклад удаленности от устья балки и уменьшались вклады индекса топографической позиции и уклона. Экспозиция склона в 1941 г. была главным фактором размещения леса, но затем ее влияние перестало быть значимым. Ожидается, что в будущем байрачный лес продолжит разрастаться и займет всю среднюю и верхнюю часть балки. Единственной характеристикой, влияющей на его размещение, останется удаленность от устья балки.

**Ключевые слова:** байрачные леса, лесовосстановление, овражно-балочная сеть, «Острасьевы Яры», рельеф, геоморфометрия, биномиальная логистическая регрессия, ROC-анализ.

Для лесостепной зоны характерен островной (инсулярный) характер лесных массивов. Это естественная форма локализации древесной растительности вблизи южной границы распространения лесов. Значительная часть лесов здесь представлена байрачными дубравами, произрастающими в верховьях овражно-балочной сети. В размещении и площади этих дубрав ведущую роль сыграл геоморфологический фактор [1].

Вырубка лесов в ходе освоения лесостепи усилила естественную инсулярность лесов. Площадь лесов уменьшилась, а существовавшие ранее массивы лесов оказались раздробленными. Однако в настоящее время есть свидетельства разрастания существующих лесов [1]. Для Белгородской области по данным дистанционного зондирования (ДДЗ) было обнаружено увеличение площади, занятой древесной растительностью в овражно-балочных системах. Это увеличение произошло

из-за разрастания лесополос и байрачных лесов [2]. Разрастание лесополос – это в большинстве случаев появление леса там, где изначально он не рос. А разрастание байрачных лесов – это возобновление лесов на тех территориях, на которых он исчез из-за антропогенной деятельности [1]. Яркий пример такого явления – «Острасьевы Яры» [3; 4].

«Острасьевы Яры» – это один из участков заповедника «Белогорье», включенный в его состав в 1995 г. Этот участок расположен в Борисовском районе Белгородской области, в 6 км к юго-востоку от центра пос. Борисовка. Участок «Острасьевы Яры» представляет собой лесостепную балку, частично покрытую байрачным лесом. В начале XX в. на ее территории находился х. Низенький. Однако с его исчезновением связано уменьшение антропогенной нагрузки, запустившее процессы самовосстановления (разрастания) байрачного леса. Установление заповедного режима закрепило

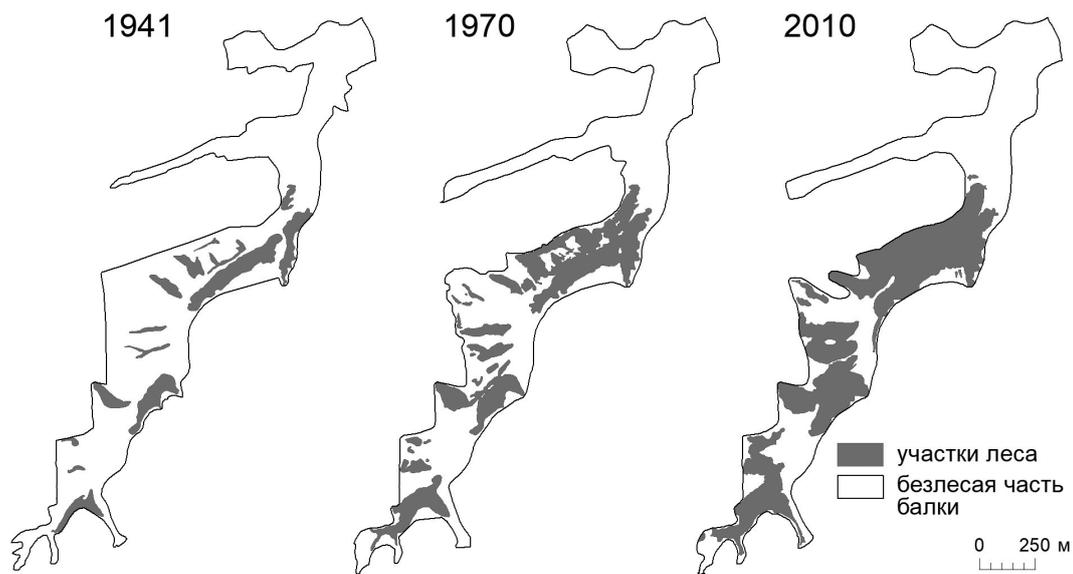


Рис. 1. Разрастание леса в «Острасьевых Ярах» с 1941 по 2010 г.

наметившуюся тенденцию к увеличению площади леса [3; 4]. Небольшая площадь участка (в границы заповедника попадает 90 га площади и 2,9 км протяженности балки) позволяет быть уверенным, что ведущим фактором, определяющим условия произрастания леса, является рельеф [5].

Представленная работа посвящена количественному описанию того, как параметры рельефа влияют на локализацию байрачного леса. Для описания этой связи была использована биномиальная логистическая регрессия. Основная цель работы – определить, какие характеристики рельефа оказывали большее влияние на локализацию леса на участке «Острасьевы Яры» на разных этапах его самовосстановления.

Исходными данными для исследования послужили сведения о локализации байрачного леса и цифровая модель рельефа (ЦМР). Сведения о локализации байрачного леса представлены тремя векторными полигональными слоями (шейп-файлами). Один слой описывает локализацию леса в 1941 г., второй – в 1970 г., третий – в 2010 г. Слои были получены в предыдущих исследованиях путем векторизации аэрофотоснимков (немецкий трофейный снимок для 1941 г.) и космических снимков (CORONA для 1970 г. и GeoEye для 2010 г.) [3; 4]. Согласно этим данным, площадь леса составляла 11 га в 1941 г., 22 га в 1970 г. и 34 га в 2010 г. (рис. 1).

Используемая в этом исследовании ЦМР была создана в ходе разработки проектов бассейнового

природопользования для Белгородской области [6; 7]. На основе этой ЦМР в ArcGIS 10.5 для участка «Острасьевы Яры» были получены растры уклона, экспозиции, общей кривизны поверхности и индекс топографической позиции (ТПИ). Для расчета последнего показателя использовался дополнительный модуль Land Facet Corridor Designer [8]. Кроме геоморфометрических характеристик, в ArcGIS также был создан растр удаленности от устья «Острасьевых Яров».

Анализ исходных данных проводился в три этапа. На первом этапе генерировались точки выборки. На втором – осуществлялся сбор исходных данных по точкам выборки. На третьем этапе производился регрессионный анализ и ROC-анализ. На первых двух этапах данные обрабатывались в ArcGIS 10.5, на третьем этапе – в среде для статистических вычислений R 4.1.0 [9].

Для создания точек выборки вначале была построена сетка квадратных ячеек размером 50 × 50 м в виде полигонального векторного слоя. Затем эта сетка была повернута по часовой стрелке так, чтобы вертикальные линии сетки стали параллельны направлению простираения балки. После этого полигональный слой был конвертирован в точечный (точки были созданы на месте центроидов полигонов). Всего было сгенерировано 352 точки выборки.

На втором этапе в таблице атрибутов точечного слоя выборки были созданы шесть полей для геоморфометрических характеристик (высота, уклон,

экспозиция, TPI, общая кривизна, удаленность от устья балки). Эти поля были заполнены значениями, которые извлекались из соответствующих растров с помощью инструмента зональной статистики.

Также для каждого из трех временных срезов (1941, 1970 и 2010 гг.) в таблице атрибутов было создано отдельное поле. Эти поля заполнялись значениями «1» («есть лес») или «0» («нет леса»). Для заполнения полей была использована выборка по расположению. Для 1941 г. 53 точки в выборке приходились на лес и 299 точек – на степь; для 1970 г. – 92 и 260 точек соответственно; для 2010 г. – 138 и 214 точек соответственно.

В конце второго этапа таблица атрибутов точечного слоя была экспортирована из ArcGIS в текстовом формате .txt для дальнейшей обработки в R. На третьем этапе анализа для каждого временного среза была создана модель биномиальной логистической регрессии. Состав моделей выбирался таким образом, чтобы число предикторов в нем было максимально возможным, но при этом все коэффициенты регрессии были статистически значимыми ( $p < 0,05$ ), и отсутствовала мультиколлинеарность. Модели подгонялись с помощью функции *glm* из базового набора функций R.

В качестве зависимой переменной в моделях выступало наличие леса, а в качестве независимых переменных (предикторов) – параметры рельефа. При этом экспозиция склонов была заменена косинусом экспозиции, чтобы уйти от

использования циркулярных данных. Также в качестве потенциального предиктора было использовано качественное выражение экспозиции (два противоположных склона балки – северо-западный и юго-восточный). Такое выражение экспозиции вставлялось в модель в виде фиктивной переменной (бинарные значения: 0 – юго-восточный склон, 1 – северо-западный склон).

Наличие мультиколлинеарности определялось по фактору увеличения дисперсии (VIF – Variance Inflation Factor). Пороговое значение VIF, превышение которого указывает на наличие мультиколлинеарности, равняется 5 [10]. Значения VIF рассчитывались с помощью функции *vif* из дополнительного пакета *car* [11].

Созданные регрессионные модели показаны в таблице 1. Наибольшее число предикторов имеет модель для 1941 г. В нее входит четыре предиктора: уклон в градусах, индекс топографической позиции, экспозиция склона (фиктивная переменная) и расстояние от устья яра в километрах. Для 1970 и 2010 гг. модели включают три предиктора. Это те же предикторы, что и в модели для 1941 г., за исключением экспозиции склона. После 1941 г. влияние этого фактора перестало быть статистически значимым. Такая ситуация отражает переход леса с северо-восточного на юго-западный склон. В 1941 г. лес произрастал преимущественно на северо-восточном склоне балки. В 1960 и 2010 гг. лес уже в равной мере распространился на оба склона балки.

Таблица 1. Модели биномиальной логистической регрессии

Переменная	Значение	Стандартная ошибка	z-критерий	p-значение	VIF
<b>1941 г.</b>					
Intercept	-5,04	0,71	-7,13	$9,92 \cdot 10^{-13}$	-
S	0,07	0,03	2,07	0,04	1,03
TPI	-2,58	0,14	-4,22	$2,48 \cdot 10^{-5}$	1,06
Skлон	0,84	0,32	2,59	0,01	1,02
Dist, км	0,70	0,23	3,07	0,002	1,07
<b>1970 г.</b>					
Intercept	-4,17	0,55	-7,57	$3,77 \cdot 10^{-14}$	-
S	0,07	0,03	2,53	0,01	1,06
TPI	-0,43	0,11	-3,88	0,0001	1,09
Dist, км	0,98	0,19	5,17	$2,34 \cdot 10^{-7}$	1,09
<b>2010 г.</b>					
Intercept	-3,49	0,48	-7,22	$4,86 \cdot 10^{-13}$	-
S	0,06	0,03	2,38	0,02	1,10
TPI	-0,31	0,10	-3,12	0,002	1,12
Dist, км	1,12	0,18	6,37	$1,88 \cdot 10^{-10}$	1,10

Из рассматриваемых геоморфометрических характеристик в модели не вошла абсолютная высота. Она была исключена по причине мультиколлинеарности (сильно коррелирует с индексом топографической позиции). Общая кривизна поверхности и косинус экспозиции не были включены в модели по причине статистической незначимости коэффициентов регрессии.

Для оценки качества моделей был проведен ROC-анализ. Он был выполнен с помощью дополнительного пакета ROCR [12]. В качестве меры предсказательной способности моделей использовалась площадь под ROC-кривой (AUC – Area Under Curve). Для 1941 г. AUC равен 0,78, для 1970 г. – 0,74, для 2010 г. – 0,74 (рис. 2). Уменьшение предсказательной способности моделей указывает на ослабление влияния рельефа.

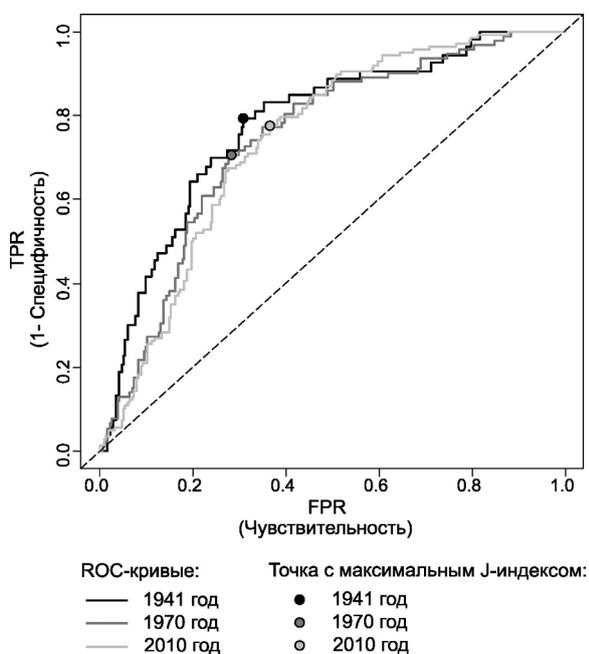


Рис. 2. ROC-кривые для созданных регрессионных моделей

Для определения оптимального порога разделения использовался J-критерий Йодена (Youden's J-statistic). Этот критерий равен сумме TPR и FPR. Оптимальным порогом разделения является тот, у которого критерий Йодена максимальный [13]. Оптимальный порог разделения смещался в большую сторону. В 1941 г. он составлял 0,15, к 1970 г. он вырос до 0,26, а к 2010 г. – до 0,35. Увеличение оптимального порога разделения отражает увели-

чение доли леса в выборке. Точность распознавания при таких порогах разделения составила для 1941 г. – 0,85, для 1970 г. – 0,74, для 2010 г. – 0,71.

Чтобы сравнить вклад каждого предиктора, были подогнаны модели на нормированных данных (табл. 2). Сравнение полученных коэффициентов регрессии показывает, что с 1941 по 2010 г. последовательно увеличивается влияние удаленности от устья балки. Влияние всех остальных факторов последовательно ослабевает. Быстрее ослабевает влияние ТРІ, медленнее – влияние уклона.

Таблица 2. Коэффициенты регрессии для моделей, построенных на нормированных данных

Год	Intercept	S	TRP	Skлон	Dist.
1941	-2,39	0,34	-0,73	0,84	0,51
1970	-1,22	0,34	-0,54	-	0,72
2010	-0,51	0,30	-0,39	-	0,82

До начала хозяйственного освоения территории «Острасьевых Яров» байрачный лес предположительно занимал большую часть балки и представлял собой единый цельный ареал. Площадь байрачного леса в 1941 г. – это, вероятно, площадь, близкая к исторически минимальной. Локализация леса при этом соответствует участкам балки, на которых труднее всего вести хозяйственную деятельность (выпас скота, сенокошение, рубку леса). Это наиболее крутая часть северо-восточного склона и боковые овраги юго-западного склона.

Ослабление влияние уклона с течением времени отражает расселение леса на более пологие участки склонов. Ослабление влияния ТРІ отражает разрастание леса по склонам снизу вверх. А усиление влияния удаленности от устья балки отражает продвижение леса из средней части балки в верхнюю и срастание отдельных фрагментов леса. При этом проникновение леса в нижнюю часть балки не отмечено.

Вероятно, в будущем байрачный лес займет на участке «Острасьевы Яры» всю верхнюю и среднюю часть балки, и только нижняя часть балки останется безлесой. Таким образом, лес займет всю свою изначальную площадь. В таком случае единственным параметром рельефа, влияющим на локализацию леса, останется удаленность от устья балки. Остальные параметры рельефа потеряют свое значение.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FZWG-2023-0011.*

**Список литературы**

1. Михно В.Б. Ландшафтные особенности инсулярности дубрав Среднерусской лесостепи // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2012. № 1. С. 14–20.
2. Терехин Э.А., Чендев Ю.Г. Анализ пространственно-временных изменений лесистости на юге лесостепи Среднерусской возвышенности по спутниковым данным // Лесоведение. 2019. № 4. С. 257–265.
3. Украинский П.А. Использование ГИС и ДДЗ для изучения исторического природопользования на территории современных ООПТ // Современные технологии в деятельности особо охраняемых природных территорий: геоинформационные системы, дистанционное зондирование Земли: сборник научных статей. Минск, 2015. С. 35–38.
4. Украинский П.А., Шекало М.В., Маринина О.А. Динамика земельных угодий Острасьевых яров во второй половине XX – начале XXI века // Региональные геосистемы. 2023. Т. 47. № 3. С. 429–442.
5. Рябцев И.С., Рябцева И.М., Тиходеева М.Ю. Особенности возобновления широколиственных пород в байрачном лесу (на примере участка «Острасьевы Яры» государственного природного заповедника «Белогорье») // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 3: Биология. 2011. № 1. С. 13–26.
6. Нарожная А.Г., Буряк Ж.А. Морфометрический анализ цифровых моделей рельефа Белгородской области разной степени генерализации // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2016. Вып. 37. № 25(246). С. 169–178.
7. Lisetskii F.N., Buryak J.A., Zemlyakova A.V., Pichura V.I. Basin Organizations of Nature Use, Belgorod region // Biogeosystem Technique. 2014. Vol. 2. No. 2. P. 163–173.
8. Jenness J., Brost B., Beier P. Land Facet Corridor Designer. USDA forest service rocky mountain research station, 2013. URL: [https://www.jennessent.com/downloads/Land\\_Facet\\_Tools.pdf](https://www.jennessent.com/downloads/Land_Facet_Tools.pdf)
9. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2021. URL: <https://www.R-project.org/>
10. Akinwande M.O., Dikko H.G., Samson A. Varianceinflation factor: as a condition for the inclusion of suppressor variable(s) in regression analysis // Open journal of statistics. 2015. Vol. 5. No. 7. P. 754–767.
11. Fox J., Weisberg S. An R Companion to Applied Regression, Third ed. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, 2018. 608 p.
12. Sing T., Sander O., Beerenwinkel N., Lengauer T. ROCr: visualizing classifier performance in R // Bioinformatics. 2005. Vol. 21. No. 20. P. 3940–3941.
13. Hassanzad M., Hajian-Tilaki K. Methods of determining optimal cut-point of diagnostic biomarkers with application of clinical data in ROC analysis: an update review // BMC Medical Research Methodology. 2024. Vol. 24. No. 1. P. 84.

INFLUENCE OF RELIEF ON BAIRAK FOREST EXPANSION:  
ANALYSIS USING BINOMIAL LOGISTIC REGRESSION  
(ON EXAMPLE OF THE OSTRASIEVY YARY, THE BELOGORYE RESERVE)

P.A. Ukrainskiy

Belgorod State National Research University, Belgorod  
pa.ukrainski@gmail.com

**Abstract.** *Ostrasyevy Yary* is part of the *Belogorye* nature reserve. This is a forest-steppe ravine with bairak forest. In the second half of the 20<sup>th</sup> century and the beginning of the 21<sup>st</sup> century, the forest grew. The forest area was 11 hectares in 1941, 22 hectares in 1970, and 34 hectares in 2010. The relief of the ravine determined the direction of forest growth. The spread of trees occurred from the northwestern slope of the ravine to the southeastern slope, from the middle part of the ravine to the upper part, from the lower part of the slopes to the upper part, from steep slopes to gentle slopes, from side gullies to the surrounding slope. Three binomial logistic regression models, for 1941, 1970 and 2010, describe this relationship. AUC for 1941 is 0,78, for 1970 – 0,74, for 2010 – 0,74. The predictors are slope, distance from the mouth of the ravine, and TPI. The 1941 model also includes aspect (as a dummy variable: 0 – southeast, 1 – northwest). Comparison of regression coefficients shows the relative contribution of each predictor. Over time, the contribution of the distance from the mouth of the ravine increased and the contributions of TPI and slope decreased. Aspect in 1941 was the main factor in forest placement, but its influence subsequently lost significance. In the future, the forest will continue to grow and will occupy the entire middle and upper part of the ravine. Only the distance to the mouth will influence the placement of the forest.

**Keywords:** bairak forests, reforestation, ravine network, *Ostrasyevy Yary*, relief, geomorphometry, binomial logistic regression, ROC-analysis.

References

1. Mikhno V.B. 2012. Landscape Features of Oak Forests Insularity in the Srednerusskaya Partially-Wooded Steppe. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geokologiya*. 1: 14–20. (In Russian).
2. Terekhin, E.A. Chendev Y.G. 2019. Satellite-Derived Spatiotemporal Variations of Forest Cover in Southern Forest – Steppe, Central Russian Upland. *Contemporary Problems of Ecology*. 12(7): 780–786.
3. Ukrainskiy P.A. 2015. Using GIS and Remote Sensing Data to Study Historical Environmental Management in the Territory of Modern Protected Areas. *Sovremennye Tekhnologii v Deyatel'nosti Osobo Okhranyaemykh Prirodnykh Territoriy: Geoinformatsionnye Sistemy, Distantionnoe Zondirovanie Zemli [Modern Technologies in the Activities of Specially Protected Natural Areas: Geographic Information Systems, Remote Sensing of the Earth]*. Minsk: 35–38. (In Russian).
4. Ukrainskiy P.A. Shchekalo M.V., Marinina O.A. 2023. Land Dynamics in Ostrasyev Yars in the Second Half of the 20<sup>th</sup> – 21<sup>st</sup> Centuries. *Regional geosystems*. 47(3): 429–442. (In Russian).
5. Ryabtsev I.S., Ryabtseva I.M., Tikhodeeva M.Yu. 2011. The Specialities of Broadleaf Woody Plants Regeneration in Bayrachny Forest (for Example the Side Ostrasevy Yary of the State Natural Reservation Belogore). *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 3: Biologiya*. 1: 13–26. (In Russian).
6. Narozhnyaya A.G., Buryak Zh.A. Morphometric Analysis of Digital Elevation Models of the Belgorod Region at Different Degrees of Generalization. *Nauchnye Vedomosti Belgorodskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Estestvennye Nauki*. 2016. 37. 25(246): 169–178. (In Russian).
7. Lisetskii F.N., Buryak J.A., Zemlyakova A.V., Pichura V.I. 2014. Basin Organizations of Nature Use, Belgorod region. *Biogeosystem Technique*. 2(2): 163–173. (In Russian).
8. Jenness J., Brost B., Beier P. 2013. Land Facet Corridor Designer. USDA forest service rocky mountain research station. URL: [https://www.jennessent.com/downloads/Land\\_Facet\\_Tools.pdf](https://www.jennessent.com/downloads/Land_Facet_Tools.pdf)
9. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria; R Foundation for Statistical Computing, 2021. URL: <https://www.R-project.org/>.
10. Akinwande M.O., Dikko H.G., Samson A. 2015. Variance inflation factor: as a condition for the inclusion of suppressor variable(s) in regression analysis. *Open journal of statistics*. 5(7): 754–767.
11. Fox J., Weisberg S. 2018. An R Companion to Applied Regression, Third Ed. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications: 608 p.
12. Sing T., Sander O., Beerenwinkel N., Lengauer T. 2005. ROCr: visualizing classifier performance in R. *Bioinformatics*. 21(20): 3940–3941.
13. Hassanzad M., Hajian-Tilaki K. 2024. Methods of determining optimal cut-point of diagnostic biomarkers with application of clinical data in ROC analysis: an update review. *BMC Medical Research Methodology*. 24(1): 84.