



УДК 502.58(571.151)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.53.55>

Оценка влияния климатических, морфометрических и геофизических параметров на возникновение грозовых пожаров в Республике Алтай

М. Ю. Кречетова, А. В. Каранин, Н. А. Кочеева, А. В. Глебова*

Горно-Алтайский государственный университет, г. Горно-Алтайск, Россия

Аннотация. Приведены результаты исследования вклада климатических и геофизических условий местности в грозовую пожарную опасность на территории Республики Алтай. При выполнении работы были использованы сведения о природных пожарах, зарегистрированных на территории Республики Алтай за период с 2016 по 2020 г. Климатические и геофизические характеристики локаций пожаров определялись на основе данных SRTMGL3, EIGEN-6C4, EMAG2, WorldClim 2.1. Информация о молниевых разрядах предоставлена сетью WWLLN. Обработка данных выполнялась с помощью факторного анализа на основе метода главных компонент. В результате исследования установлено, что наибольшая дисперсия (46 %) в рассматриваемых данных определяется различиями в климатических характеристиках (среднегодовые температура, количество осадков и плотность молний), которые, в свою очередь, обусловлены изменением высоты над уровнем моря. В качестве комплексного показателя, объединяющего эти характеристики, может быть использована первая главная компонента, на основе значений которой определены группы пожаров, сходных по климатическим показателям и ландшафтам. Вторая по величине дисперсия (14,8 %) определяется среднегодовой плотностью молний и значениями магнитных и гравитационных аномалий в локациях пожаров. Показано, что значения второй главной компоненты отражают тенденцию увеличения плотности молний с увеличением значений магнитных и гравитационных аномалий на рассматриваемой территории. Применение факторного анализа на основе метода главных компонент позволило определить типичные климатические и геофизические условия возникновения пожаров от гроз на исследуемой территории.

Ключевые слова: пожары от гроз, грозовая активность, морфометрические характеристики, геофизические условия местности, климатические показатели, WWLLN, Республика Алтай.

Благодарности. Авторы признательны Министерству природных ресурсов и экологии Республики Алтай и сотрудникам Алтайского государственного природного биосферного заповедника за предоставленные сведения и сотрудничество. Кроме того, авторы благодарны коллаборации Всемирной сети локализации молниевых разрядов (World Wide Lightning Location Network (<http://wwlln.net>)) за предоставление данных, использованных в работе.

Для цитирования: Оценка влияния климатических, морфометрических и геофизических параметров на возникновение грозовых пожаров в Республике Алтай / М. Ю. Кречетова, А. В. Каранин, Н. А. Кочеева, А. В. Глебова // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2025. Т. 53. С. 55–69. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.53.55>

Evaluation of the Impact of Climatic, Morphometric, and Geophysical Factors on Thunderstorm-Ignited Wildfires in the Altai Republic

M. Yu. Krechetova, A. V. Karanin, N. A. Kocheeva, A. V. Glebova*

Gorno-Altai State University, Gorno-Altai, Russian Federation

Abstract. The results of a study of the contribution of climatic and geophysical conditions of the terrain to thunderstorm fire danger in the Altai Republic are presented. The research utilized information on natural fires recorded in the Altai Republic from 2016 to 2020. Climatic and geophysical characteristics of fire locations were determined based on SRTMGL3, EIGEN-6C4, EMAG2, WorldClim 2.1 data. Information on lightning discharges was provided by the WWLLN network. Data processing was conducted using factor analysis based on the principal component method. The study revealed that the largest variance (46 %) in the considered data was attributed to differences in climatic characteristics (annual mean temperature, precipitation, and lightning density), which were in turn influenced by changes in elevation above sea level. The first principal component, combining these characteristics, can be used as a comprehensive indicator to classify fires with similar climatic parameters and landscapes. The second largest variance (14.8 %) was determined by annual average lightning density and values of magnetic and gravitational anomalies at fire locations. It was demonstrated that the values of the second principal component reflect an increasing trend in lightning density with higher values of magnetic and gravitational anomalies in the studied area. The application of factor analysis based on principal component method allowed for the determination of typical climatic and geophysical conditions contributing to thunderstorm fires in the investigated territory.

Keywords: lightning initiated wildfire, thunderstorm activity, morphometric characteristics, geophysical conditions of the area, climatic indicators, WWLLN, Altai Republic.

For citation: Krechetova M.Yu., Karanin A.V., Kocheeva N.A., Glebova A.V. Evaluation of the Impact of Climatic, Morphometric, and Geophysical Factors on Thunderstorm-Ignited Wildfires in the Altai Republic. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2025, vol. 53, pp. 55-69. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.53.55> (in Russian)

Введение

Грозы являются одним из главных факторов возникновения природных пожаров в Республике Алтай, в период с 2016 по 2020 г. доля пожаров от гроз составила более 60 % от суммарного числа возгораний.

Вероятность возникновения грозových пожаров зависит не только от молниевой активности, но и от природных особенностей местности. Лучше всего, в этом плане, изучены метеорологические факторы, на их основе разработаны модели прогноза сухих гроз [Model-generated ... , 2007] и лесной пожарной опасности [Барановский, 2021; Нестеров, 1949; Новгородов, Смольникова, Захаров, 1982].

Существуют работы, изучающие роль рельефа в формировании гроз [The influence ... , 2009; A ten-year ... , 2015] и природных пожаров [Adab, Kanniah, Solaimani, 2013; Baltaci, Yildirim, 2020]. Установлено, что увеличенный вертикальный обмен воздуха в горах, особенно на склонах хребтов, обращенных в сторону влагонесущих потоков воздуха, способствует образованию грозových облаков [Аджиев, Аджиева, Тумгоева, 2008]. Для природных пожаров однозначного влияния морфометрических особенностей рельефа не выявлено, некоторые авторы отмечают, что риск возникновения по-

жара уменьшается с возрастанием высоты над уровнем моря [Understanding ... , 2017] и с увеличением крутизны склона [Pandey, Ghosh, 2018], другие исследователи указывают обратные результаты [Lightning-induced ... , 2006; Forest ... , 2002]. Подобный разброс оценок может объясняться местными особенностями геосистем, требующими комплексного анализа для конкретизации выводов по указанной теме.

Кроме этого, в качестве детерминант молниевой активности и пожаров рассматривались геолого-геофизические условия (геологические разломы, гравитационные и магнитные аномалии) [Ершова, 2015; Люшвин, 2019; Tectonic ... , 2008]. Отмечается, что повышенная конвекция воздуха, изменение давления и вихреобразование над отрицательными гравитационными аномалиями способствуют образованию гроз [Борисенков, 2003], а знак гравитационной аномалии (положительная или отрицательная) может указывать на избыток или недостаток влаги в почве [Tropical ... , 2018] и водяного пара в атмосфере [Satellite observations of..., 2013], что, в свою очередь, влияет на риск возникновения пожара.

Магнитные аномалии и геологические разломы могут выступать в виде областей притяжения молниевых разрядов, это отмечено в исследованиях [Люшвин, 2019; Хайруллин, Яковлев, 1990], в то же время такая связь не является линейной, для отдельных аномалий статистически значимого увеличения грозовой активности не зарегистрировано [Ершова, 2015]. Наибольшая плотность молниевых разрядов, отклоняющаяся от средней для данной местности, выявлена для зон высоких градиентов геомагнитного поля и месторождений железных руд, для этих же участков характерна и повышенная частота пожаров [Новгородов, Смольникова, Захаров, 1982; Лесные ... , 2010].

Таким образом, к настоящему времени существует серьезный научный задел по изучению физико-географических и геофизических условий грозообразования и возникновения природных пожаров. Однако в подавляющем большинстве работ речь идет, как правило, об оценках отдельных факторов, в едином комплексе они не рассматриваются. По мнению авторов, проведенные исследования, опирающиеся на многокомпонентный анализ этих факторов, является актуальным.

Материалы и методы

В работе были использованы данные о природных пожарах, зарегистрированных на территории Республики Алтай в пожароопасные периоды (с мая по октябрь включительно) 2016–2020 гг. Отметим, что доля лесных и ландшафтных пожаров от гроз составила более 60 % от их суммарного числа. Сведения о пожарах были предоставлены Министерством природных ресурсов, экологии и туризма Республики Алтай, а также Алтайским государственным природным биосферным заповедником. Из общего объема данных были выбраны пожары с четко определенным местоположением, в качестве причины возникновения которых были указаны молнии.

Средние значения осадков, температуры и скорости ветра в пожароопасный период определялись на основе данных WorldClim 2.1 (пространственное разрешение 30 угловых секунд) [Fick, Hijmans, 2017].

Высота над уровнем моря и крутизна склонов были измерены на основе цифровой модели рельефа SRTMGL3 (пространственное разрешение 3 угловые секунды) [NASA JPL ... , 2013].

Для определения значений гравитационных аномалий и их знака использовалась глобальная модель квазигеоида EIGEN-6C4 (пространственное разрешение 0,1 градус) [EIGEN-6C4 ... , 2014].

Значения магнитных аномалий получены на основе глобальной карты магнитных аномалий EMAG2 (пространственное разрешение 2 угловые минуты) [Meyer, Saltus, Chulliat, 2017].

Данные о молниевых разрядах предоставлены Всемирной сетью локализации молниевых разрядов (World Wide Lightning Location Network¹), одна из станций которой располагается на территории Горно-Алтайского государственного университета. Следует отметить, что станции WWLLN фиксируют не все разряды, а лишь наиболее сильные из них, примерно 15–20 % от общего числа [Radiated ... , 2013]. Для анализа были выбраны молниевые разряды за пожароопасный период в радиусе 10 км от локаций природных пожаров. На основе полученных данных была вычислена средняя плотность молниевых разрядов.

Таким образом, для комплексного анализа данных о природных пожарах на территории Республики Алтай за период с 2016 по 2020 г. была сформирована выборка из 102 природных пожаров, описываемых географическими координатами, датой и временем регистрации, четырьмя климатическими характеристиками (средняя плотность молний, средние температуры, осадки и скорость ветра в период с мая по октябрь), двумя геофизическими факторами (гравитационные и магнитные аномалии) и двумя морфометрическими (высота над уровнем моря, крутизна склона).

Статистическая обработка данных включала в себя факторный анализ на основе сингулярного разложения матрицы исходных данных методом главных компонент [Прикладная ... , 1989; Jolliffe, 2002]. Предварительная обработка данных для факторного анализа включала центрирование и масштабирование данных и проверку критериев применимости факторного анализа на основе теста сферичности Бартлетта [Snedecor, Cochran, 1989] и теста Кайзера – Мейера – Олкина [Cureton, D'Agostino, 1993].

Обработка данных выполнялась в геоинформационных системах QGIS и GRASS. Вычисления и визуализация результатов были произведены с помощью библиотек ststs, scipy, sklearn, matplotlib языка Python.

Результаты и обсуждение

На первом этапе для участков грозовых пожаров была выполнена выборка климатических, морфометрических и геофизических характеристик, после чего произведена их оценка на предмет адекватности для факторного анализа. Полученные результаты показали, что данные подходят для дальнейшей работы (тест сферичности Бартлетта – 435,8 при $p < 0,001$; тест Кай-

¹ World Wide Lightning Location Network (WWLLN). URL: <http://wwlln.net> (date of access: 10.04.2025).

зера – Мейера – Олкина – 0,72). Затем рассматриваемые показатели с помощью факторного анализа были сгруппированы в две главные компоненты (два фактора), объясняющие 60,8 % общей дисперсии. Собственные значения и вклад в общую дисперсию каждой компоненты, а также и факторные нагрузки (весовые коэффициенты) рассматриваемых характеристик приведены в табл. 1.

Таблица 1

Факторные нагрузки рассматриваемых характеристик в локациях пожаров

Характеристики	Первая главная компонента	Вторая главная компонента
Крутизна склона	-0,17	0,04
Высота над уровнем моря	0,46	0,11
Средняя температура в пожароопасный период	-0,45	-0,23
Средние осадки в пожароопасный период	-0,41	0,33
Средняя скорость ветра в пожароопасный период	0,37	0,12
Средняя плотность молний в пожароопасный период	-0,38	0,46
Магнитные аномалии	-0,07	0,52
Гравитационные аномалии	0,27	0,56
Собственные значения	3,7	1,2
Вклад в общую дисперсию, %	46	14,8

Первая главная компонента (первый фактор) объясняет 46 % дисперсии данных. Наиболее значимыми здесь являются климатические показатели (среднегодовые температура, осадки, скорость ветра и плотность молний), а также высота над уровнем моря (указанные признаки выделены в табл. 1 жирным шрифтом). При этом положительный знак факторных нагрузок характеристик, как правило, интерпретируется как прямая связь этих характеристик с первой главной компонентой, отрицательный знак – как обратная зависимость. Минимальным значениям первой главной компоненты соответствуют локации природных пожаров, которые характеризуются высокими значениями среднегодовых температуры, осадков и плотности молний и низкими значениями среднегодовой скорости ветра и высоты над уровнем моря. Максимальным значениям первой главной компоненты соответствуют локации природных пожаров, которые характеризуются низкими значениями среднегодовых температуры, осадков и плотности молний и высокими значениями среднегодовой скорости ветра и высоты над уровнем моря. Таким образом, первая главная компонента интегрально характеризует изменение плотности молний в локациях пожаров в зависимости от погодноклиматических характеристик, изменение которых детерминировано физикогеографическими особенностями территории Республики Алтай.

Вторая главная компонента (второй фактор) объясняет 14,8 % данных и имеет значимые положительные весовые коэффициенты со значениями гравитационных и магнитных аномалий и средней плотностью молний. Таким образом, вторая главная компонента интегрально характеризует изменение плотности молний в связи с наличием геофизических объектов на территориях, на которых были зарегистрированы природные пожары. Распределение геофизических объектов выборки в связи с природными пожарами относи-

тельно значений второй главной компоненты имеет более сложный характер, так как эти характеристики имеют как положительные, так и отрицательные значения [Каранин, Беликова, 2023].

Визуализация результатов метода главных компонент приведена на рисунке в виде диаграммы рассеяния выборки природных пожаров и их характеристик в пространстве первой и второй главных компонент. Отображение исходных данных о природных пожарах в пространство главных компонент позволяет определить группы пожаров, имеющих близкие значения первой и второй главных компонент, характеризующих сходные климатические и геофизические условия территорий, на которых были зарегистрированы пожары.

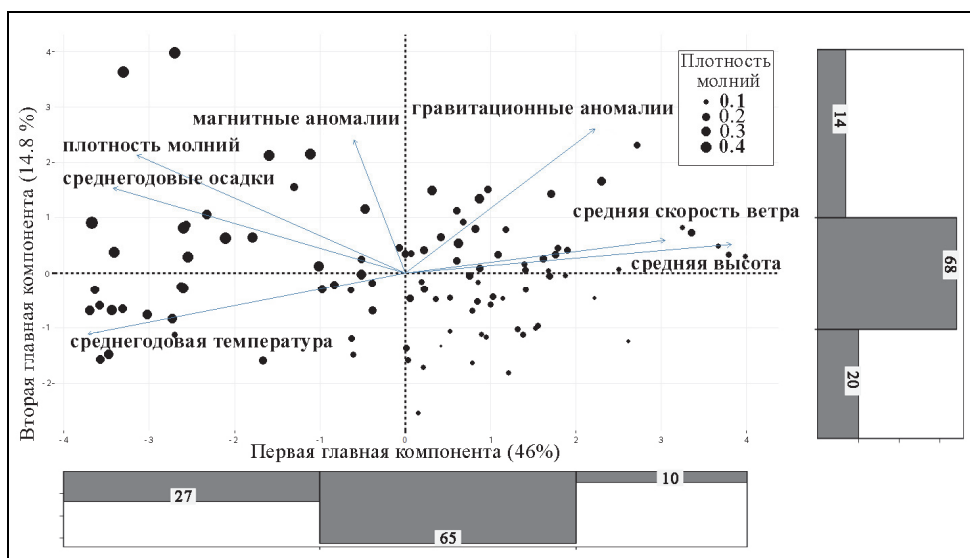


Рис. Проекция на плоскость двух главных компонент выборки объектов, представляющих характеристики природных пожаров. Главные компоненты отображены в виде осей. Векторами показаны характеристики природных пожаров от гроз, которые имеют наибольшие факторные нагрузки (см. табл. 1). Точечными объектами отображены природные пожары. Размер точечных объектов соотнесен с плотностью молний в локациях пожаров

Для анализа структуры выборки пожаров по плотности молниевой активности на осях главных компонент нами были выделены три интервала: низкий, средний, высокий. На рисунке в виде гистограмм отображено количество природных пожаров, соответствующих интервалам низких, средних и высоких значений главных компонент.

Для первой главной компоненты интервал низких значений определяется значениями меньше -1 и соответствует объектам (локациям пожаров) с высокими значениями плотности молний. Интервал средних значений находится в диапазоне от -1 до 2 и соответствует объектам, находящимся близко к началу координат и имеющим средние и низкие показатели молниевой ак-

тивности. Значения более 2 относятся к интервалу высоких значений и соответствуют в основном объектам с низкой молниевой активностью.

Для второй главной компоненты большая часть объектов, характеризующихся низкой молниевой активностью, имеет значения менее -1 . Интервал средних значений определен значениями компоненты от -1 до 1. Этому интервалу соответствует большая часть объектов. Значения свыше 1 относятся к интервалу высоких значений, которому соответствуют объекты, имеющие высокую плотность молниевой активности.

Для выделенных таким образом групп пожаров были произведены оценки попарных различий их характеристик с помощью U-критерия Манна – Уитни. Сравнивались показатели пожаров, относящихся к низким и средним интервалам значений, а также к средним и высоким интервалам значений (табл. 2, 3).

Таблица 2

Значения климатических характеристик природных пожаров относительно интервалов первой главной компоненты

Интервалы первой главной компоненты	Высота над у. м.	Средняя температура в пожароопасный период	Средние осадки в пожароопасный период	Средняя скорость ветра в пожароопасный период	Средняя плотность молний в пожароопасный период
Низкие значения (менее -1)	892,8	10,7	547,0	1,40	0,30
Средние значения (от -1 до 2)	1457,0	8,3	372,0	1,63	0,15
Высокие значения (более 2)	1982,7	4,92	283,5	1,94	0,10
U-критерий Манна – Уитни между низкими и средними значениями	88,0 $p < 0,01$	1606,5 $p < 0,01$	1675,0 $p < 0,01$	86,5 $p < 0,01$	1659,0 $p < 0,01$
U-критерий Манна – Уитни между средними и высокими значениями	21,0 $p < 0,01$	640,0 $p < 0,01$	456,5 $p < 0,05$	74,5 $p < 0,01$	466,0 $p < 0,05$

Согласно U-критерию Манна – Уитни, климатические характеристики природных пожаров, относящихся к интервалам первой главной компоненты, достоверно различаются (см. табл. 2).

Климатические характеристики тесно связаны с ландшафтными, которые в свою очередь влияют на вероятность возникновения и распространения природных пожаров. Поэтому описание групп природных пожаров относительно интервалов первой главной компоненты приведем с учетом ландшафтных комплексов, в которых были отмечены пожары от гроз (табл. 4).

Таблица 3

Значения геофизических характеристик и плотности молний в локациях природных пожаров относительно интервалов второй главной компоненты

Интервалы второй главной компоненты	Магнитные аномалии	Гравитационные аномалии	Среднегодовая плотность молний
Низкие значения (менее -1)	-54,4	-37,1	0,12
Средние значения (от -1 до 1)	-26,5	-8,5	0,19
Высокие значения (более 1)	127,1	25,9	0,27
U-критерий Манна – Уитни между низкими и средними значениями	548,5 $p > 0,05$	276,0 $p < 0,01$	304,0 $p < 0,01$
U-критерий Манна – Уитни между средними и высокими значениями	256,0 $p < 0,01$	173,0 $p < 0,01$	228,0 $p < 0,01$

Таблица 4

Количество природных пожаров относительно ландшафтных комплексов и значений первой главной компоненты

Ландшафтные комплексы	Первая главная компонента		
	Низкие значения (< -1)	Средние значения (от -1 до 2)	Высокие значения (> 2)
Низкогорные лесные	14	–	–
Среднегорные лесные	12	42	6
Среднегорные лесостепные	1	13	–
Межгорно-котловинные лесные	–	1	1
Межгорно-котловинные лесостепные	–	2	–
Горно-долинные недренируемые слабопроточные	–	2	–
Горно-долинные периодически дренируемые проточные	–	4	1
Среднегорные тундровые и луговые альпинотипные	–	1	–
Высокогорные тундровые и луговые альпинотипные	–	–	2

Первая группа природных пожаров соответствует интервалу низких значений первой главной компоненты и содержит 27 природных пожаров, локация которых характеризуется низкой средней скоростью ветра, высокими значениями среднегодовой температуры и количества осадков, высокой молниевой активностью. Минимальные значения первой главной компоненты (менее -2,5) соответствуют локациям природных пожаров, находящимся в низкогорных лесных ландшафтах (14 пожаров) и среднегорных лесных (12 пожаров). Эта группа природных пожаров характеризуется в целом более влажным климатом.

Вторая группа природных пожаров, соответствующая интервалу средних значений первой главной компоненты, состоит из 65 объектов. Участки пожаров этой группы характеризуются более высокими значениями средней скорости ветра и относительно низкими значениями среднегодовой температуры и количества осадков. Большая часть пожаров этой группы (42) соответствует среднегорному лесному ландшафту. Также этому интервалу соот-

ветствуют все природные пожары, зарегистрированные на территориях, относящихся к среднегорным лесостепным и межгорно-котловинным лесостепным ландшафтам, и некоторые пожары, локации которых относятся к другим типам ландшафтов, но их климатические характеристики сходны с пожарами, отнесенными к этому интервалу. Исходя из общей доли пожаров среди их суммарного количества (63,7 %), можно сделать предположение, что выделенные погодно-климатические условия являются наиболее типичными для возникновения пожаров от гроз на исследуемой территории.

К третьей группе природных пожаров, соответствующих высоким значениям первой главной компоненты, относятся 10 пожаров, произошедших в высокогорных и близким к ним климатических условиях. Медианное значение высоты над уровнем моря для этой группы составляет 1900 м. Климатические показатели таких территорий, как правило, характеризуются низкими показателями средних осадков и температуры в пожароопасный период. Высокий медианный показатель среднегодовой скорости ветра также объясняется рельефом: на высотах более 2000 м ветер есть всегда. Также за счет того, что в высокогорье более высокие части хребтов имеют экранный эффект для воздушных масс, формируются условия для возникновения гроз на высотах 1500–2000 м и выше. Локации природных пожаров этой группы соответствуют среднегорным лесным ландшафтам, межгорно-котловинным ландшафтам, горно-долинным периодически дренируемым проточным ландшафтам на высоте более 1700 м, а также высокогорным луговым альпийским ландшафтам на высоте более 2000 м. Несмотря на то что в условиях высокогорья возникает небольшое количество природных пожаров, за счет ветра и крутизны склона увеличивается скорость распространения горения, что потенциально способно привести к поражению достаточно больших территорий.

Для интервалов второй главной компоненты (см. табл. 3), согласно U-критерию Манна – Уитни, уровень значений гравитационных аномалий и плотности молний достоверно различается для групп пожаров, относящихся к низкому и среднему интервалам, а также среднему и высокому интервалам. Уровень значений магнитных аномалий в локациях пожаров достоверно различается для групп пожаров, относящихся к среднему и высокому интервалам второй главной компоненты. Таким образом, выделенные интервалы второй главной компоненты лучше описывают различие в значениях гравитационных аномалий и плотности молний.

Невысокое значение дисперсии, объясняющей вторую главную компоненту, определяется небольшим разбросом показателей геофизических характеристик и плотности молний в локациях пожаров, поэтому большая их часть (66,7 %) соответствует интервалу средних значений второй главной компоненты. Низким значениям второй главной компоненты соответствуют 20 природных пожаров, локации которых характеризуются отрицательными значениями магнитных и гравитационных аномалий и в основном низкими значениями плотности молний. Высоким значениям второй главной компоненты соответствуют 14 природных пожаров, локации которых характери-

зуются положительными значениями магнитных и гравитационных аномалий и в основном высокими значениями плотности молний. Таким образом, увеличению значений второй главной компоненты соответствует увеличение медианных значений характеристик геофизических аномалий и средней плотности молний. То есть вторая главная компонента отражает тенденцию увеличения плотности молний с увеличением значений магнитных и гравитационных аномалий в локациях природных пожаров на рассматриваемой территории.

Заключение

В результате исследования установлено, что наибольшая изменчивость характеристик в локациях природных пожаров (первая главная компонента) определяется изменчивостью климатических характеристик (среднегодовые температура, количество осадков и плотность молний), которые, в свою очередь, зависят от высоты над уровнем моря. Вклад в общую дисперсию по этим признакам равен 46 %.

Меньшая степень изменчивости определена для среднегодовой плотности молний, значений магнитных и гравитационных аномалий. Вклад в общую дисперсию по этим показателям составляет 14,8 %.

В пространстве двух первых главных компонент выделены три интервала (низких, средних и высоких значений) для каждой из главных компонент. Согласно U-критерию Манна – Уитни установлено статистически значимое различие между значениями характеристик пожаров, разделенных на группы в соответствии с интервалами главных компонент. Это позволяет говорить о том, что интервалы главных компонент достоверно соответствуют изменению уровня значений характеристик рассматриваемой выборки пожаров.

Показано, что значения первой главной компоненты отражают изменчивость и мозаичность климатических характеристик и ландшафтов для горной территории. Выделенные интервалы низких, средних и высоких значений первой главной компоненты определяют типичные климатические условия, соответствующие природным пожарам, локации которых относятся к низкогорным, среднегорным и высокогорным ландшафтам.

Значения второй главной компоненты могут отражать некоторую связь между изменением плотности молний и величинами геофизических аномалий, характерную не только для локаций природных пожаров, но и для рассматриваемой территории в целом [Дмитриев, Кречетова, Кочеева, 2011]. В работе показано, что увеличению значений второй главной компоненты соответствует увеличение плотности молний и увеличение значений магнитных и гравитационных аномалий. Вопрос интерпретации связи молниевой активности и геофизических аномалий является одним из наиболее сложных. Авторы считают, что полученная зависимость может быть объяснена, с одной стороны, существованием опосредованного вклада геофизических аномалий в формирование погодных условий, способствующих возникновению гроз [Борисенков, 2003; Satellite ... , 2013; Tropical ... , 2018]. С другой стороны, характер магнитных и гравитационных аномалий может детерминиро-

вать разнообразие растительного покрова и ландшафтов [Барышникова, Кропочкин, 2011], влияя таким образом на наличие горючего материала и вероятность его воспламенения от удара молнии.

Таким образом, две первые главные компоненты являются комплексными показателями локаций природных пожаров на территории Республики Алтай, отражающими изменчивость плотности молний, климатических и геофизических характеристик, а также мозаичность ландшафтов. Интервалы средних значений первой и второй главных компонент определяют наиболее типичные климатические (63,7 % локаций пожаров) и геофизические условия (66,7 % локаций пожаров) возникновения пожаров от гроз на исследуемой территории.

Применение факторного анализа на основе метода главных компонент, для данных о природных пожарах произошедших на территории Республики Алтай в период с 2016 по 2020 г. позволило обобщить результаты предыдущих работ [Каранин, Беликова, 2023; Склоновая ... , 2024]. Значения факторных координат для природных пожаров, полученные в этой работе, в дальнейшем будут использованы в качестве независимых переменных, описывающих климатические и геофизические характеристики в методах интеллектуального анализа для комплексной оценки потенциальной пожароопасности территории Республики Алтай, в том числе и на основе вероятностно-детерминированной модели, предложенной в работе [Барановский, 2021].

Список литературы

- Аджиев А. Х., Аджиева А. А., Тумгоева Х. А.* Влияние орографии на характеристики грозовой деятельности // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2008. № 2. С. 109–112.
- Барановский Н. В.* Прогнозирование лесной пожарной опасности в условиях антропогенной нагрузки / М-во науки и высшего образования РФ, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Новосибирск : СО РАН, 2021. 302 с.
- Барышникова О. Н., Крупочкин Е. П.* Магнитные аномалии и разнообразие геосистем // Известия Алтайского государственного университета. 2011. № 3-2. С. 85–87.
- Борисенков Е. П.* Роль аномалий гравитационного поля Земли в формировании конвективных движений как стимулятора грозовой активности // Труды Пятой Российской конференции по атмосферному электричеству. Владимир, 2003. Т. 2. С. 42–44.
- Дмитриев А. Н., Кречетова С. Ю., Кочеева Н. А.* Грозы и лесные пожары от гроз на территории Республики Алтай: монография. 2011. 75 с.
- Ершова Т. В.* Аномалии гравитационного и магнитного полей Земли и грозовая активность // Глобальная электрическая цепь : материалы Второй всерос. конф. Борок, 5–9 окт. 2015 г. Ярославль : Филигрань, 2015. С. 49–50.
- Каранин А. В., Беликова М. Ю.* Оценка влияния магнитных и гравитационных аномалий на формирование грозовых пожаров на территории Республики Алтай // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2023. № 1(217). С. 87–100. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-1-87-100>
- Лесные грозовые пожары как индикатор связей между атмосферой, литосферой и биосферой / С. Н. Санников [и др.] // Экология. 2010. № 1. С. 3–8.
- Люшвин П. В.* Геофизические и био явления в радиационных и магнитных аномалиях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : материалы 17-й Всерос. открытой конф. М. : Ин-т косм. иссл. РАН, 2019. С. 389.
- Нестеров В. Г.* Горимость леса и методы ее определения. М. : Гослесбумага, 1949. 76 с.
- Новгородов В. Д., Смольникова Л. Г., Захаров А. И.* Способ выявления пожароопасных областей на местности // Авт. св. № 902763. Кл. А 62. С 3/02. Бюл. изобр. 1982. № 5.

Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности / С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енкоков [и др.]. М. : Финансы и статистика, 1989.

Склоновая и высотная приуроченность молниевых разрядов и пожаров от гроз в горной местности (на примере территории Республики Алтай) / А. В. Каранин, М. Ю. Беликова, Н. А. Кочеева [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2024. № 3(223). С. 71–80. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-3-71-80>

Хайруллин К. Ш., Яковлев Б. А. Антропогенные и мезоклиматические влияния на грозы и град // Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. Нальчик, 1990. С. 102–103.

A ten-year analysis of cloud-to-ground lightning activity over the Eastern Mediterranean region / E. Galanaki, V. Kotroni, K. Lagouvardos, A. Argiriou // Atmospheric Research. 2015. Vol. 166. P. 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.07.008>

Adab H., Kanniah K. D., Solaimani K. Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques // Natural Hazards. 2013. Vol. 65. P. 1723–1743. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0450-8>

Baltaci U., Yildirim F. Effect of Slope on the Analysis of Forest Fire Risk // Hacettepe Journal of Biology and Chemistry. 2020. Vol. 48, N 4. P. 373–379.

Cureton E. E., D'Agostino R. B. Factor Analysis: An Applied Approach. 1st ed. New York: Psychology Press, 1993. 480 p. <https://doi.org/10.4324/9781315799476>

EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse / C. Forste, S. L. Bruinsma, O. Abrikosov [et al.] // GFZ Data Services, 2014. URL: <http://doi.org/10.5880/icgem.2015.1>

Fick S. E., Hijmans R. J. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatology. 2017. Vol. 37, N 12. P. 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>

Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS / R. K. Jaiswal, S. Mukherjee, D. K. Raju, R. Saxena // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2002. Vol. 4, N 1. P. 1–10. [https://doi.org/10.1016/s0303-2434\(02\)00006-5](https://doi.org/10.1016/s0303-2434(02)00006-5)

Jolliffe I. T. Principal Component Analysis. New York : Springer-Verlag, 2002.

Lightning-induced fires in the Alpine region: An increasing problem / M. Conedera, G. Cesti, G. B. Pezzatti [et al.] // Forest Ecology and Management. 2006. Vol. 234, N 1. P. S68. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.08.096>

Meyer B., Saltus R., Chulliat A. EMAG2v3: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution). Version 3. NOAA National Centers for Environmental Information, 2017. <https://doi.org/10.7289/V5H70CVX>

Model-generated predictions of dry thunderstorm potential / M. L. Rorig [et al.] // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2007. Vol. 46, N 5. P. 605–614. <https://doi.org/10.1175/JAM2482.1>

NASA JPL. NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 3 arc second [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2013. <https://doi.org/10.5067/MEASURES/SRTM/SRTMGL3.003>

Pandey K., Ghosh S. K. Modelling of Parameters for Forest Fire Risk Zone Mapping // ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2018. Vol. XLII, N 5. P. 299–304. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-299-2018>.

Radiated VLF energy differences of land and oceanic lightning / M. L. Hutchins, R. H. Holzworth, K. S. Virts [et al.] // Geophysical Research Letters. 2013. Vol. 40, N 10. P. 2390–2394. <https://doi.org/10.1002/grl.50406>

Satellite observations of terrestrial water storage provide early warning information about drought and fire season severity in the Amazon / Y. Chen, I. Velicogna, J. S. Famiglietti, J. T. Randerson // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2013. Vol. 118, N 2. P. 495–504. <https://doi.org/10.1002/jgrg.20046>

Snedecor G. W., Cochran W. G. Statistical Methods. 8th ed. Ames : Iowa State University Press, 1989. 503 p.

Tectonic Spiral Structures of the Tethyan Vortex Street: GRACE Geoid Interpretations and African Lightning Teleconnections / B. Leybourne, C. Smoot, G. P. Gregori [et al.] // 33rd IGC, Oslo NCGT Symposium, Oslo, Norway, 2008.

The influence of topography on the cloud-to-ground lightning density in South Brazil / V. Bourscheidt, O. P. Junior, K. P. Naccarato [et al.] // *Atmospheric Research*. 2009. Vol. 91, N 2-4. P. 508–513. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.06.010>

Tropical land carbon cycle responses to 2015/16 El Niño as recorded by atmospheric greenhouse gas and remote sensing data / E. Gloor, C. Wilson, M. P. Chipperfield [et al.] // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2018. Vol. 373, 1760. P. 20170302. <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0302>

Understanding forest fire patterns and risk in Nepal using remote sensing, geographic information system and historical fire data / Mir A. Matin., Vishwas Sudhir Chitale, Manchiraju S. R. Murthy [et al.] // *International journal of wildland fire*. 2017. Vol. 26, N 4. P. 276–286. <https://doi.org/10.1071/WF16056>

References

Adzhiev A.Kh., Adzhieva A.A., Tumgoeva Kh.A. Vliyanie orografii na kharakteristiki grozovoi deyatelnosti [The influence of orography on thunderstorm activity characteristics], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki* [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences], 2008, 2, pp. 109-112. (in Russian)

Baranovsky N.V. *Prognozirovanie lesnoi pozharnoi opasnosti v usloviyakh antropogennoi nagruzki* [Forest Fire Danger Forecasting Under Anthropogenic Pressure]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2021. 302 p. (in Russian)

Baryshnikova O.N., Krupochkin E.P. Magnitnye anomalii i raznoobrazie geosistem [Magnetic anomalies and geosystem diversity], *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Altai State University], 2011, no. 3-2, pp. 85-87. (in Russian)

Borisenkov E.P. Rol' anomalii gravitatsionnogo polya Zemli v formirovanii konvektivnykh dvizhenii kak stimulyatora grozovoi aktivnosti [The role of Earth's gravitational field anomalies in the formation of convective motions as a thunderstorm activity stimulator], *Trudy Pyatoi Rossiiskoi konferentsii po atmosfernomu elektrichestvu* [Proceedings of the Fifth Russian Conference on Atmospheric Electricity], 2003, 2, pp. 42-44. (in Russian)

Dmitriev A.N., Krechetova S.Yu., Kocheeva N.A. *Grozovye i lesnye pozgary ot groz na territorii Respubliki Altai* [Thunderstorms and Forest Fires Caused by Lightning in the Altai Republic]. Gorno-Altaysk, GASU Publ., 2011, 75 p. (in Russian)

Ershova T.V. Anomalii gravitatsionnogo i magnitnogo polia Zemli i grozovaya aktivnost' [Anomalies of Earth's gravitational and magnetic fields and thunderstorm activity], *Global'naya elektricheskaya tsep* [Global Electric Circuit], 2015, pp. 49-50. (in Russian)

Karanin A.V., Belikova M.Yu. Otsenka vliyaniya magnitnykh i gravitatsionnykh anomalii na formirovanie grozovykh pozharov na territorii Respubliki Altai [Assessment of the influence of magnetic and gravitational anomalies on thunderstorm fire formation in the Altai Republic], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki* [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences], 2023, no. 1 (217), pp. 87-100. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-1-87-100> (in Russian)

Lyushvin P.V. Geofizicheskie i bio yavleniya v radiatsionnykh i magnitnykh anomaliiyakh [Geophysical and bio phenomena in radiation and magnetic anomalies]. *Sovremennyye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]. Proceedings of the 17th All-Russian Conference 2019, pp. 389-390. (in Russian)

Nesterov V.G. *Gorimost lesa i metody ee opredeleniya* [Forest Flammability and Methods of Its Determination]. Moscow, Goslesbumaga Publ., 1949, 76 p. (in Russian)

Novgorodov V.D., Smolnikova L.G., Zakharov A.I. Sposob vyyavleniya pozharoopasnykh oblastei na mestnosti [Method for identifying fire-hazardous areas]. *Avt. sv.* [Certificate of Authorship] N 902763, 1982, no. 5, pp. 15-17. (in Russian)

Aivazyan S.A., Bukhshtaber V.M., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. *Prikladnaya statistika: Klassifikatsiya i snizhenie razmernosti* [Applied Statistics: Classification and Dimensionality Reduction]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1989. 198 p. (in Russian)

Sannikov S.N., Zakharov A.I., Smolnikova L.G., Sannikova N.S. Lesnye grozovye pozgary kak indikator svyazei mezhdou atmosferoi, litosferoi i biosferoi [Forest lightning fires as an indicator of atmosphere-lithosphere-biosphere connections]. *Ekologiya* [Ecology], 2010, 1, pp. 3-8. (in Russian)

- Karanin A.V., Belikova M.Yu., Kocheeva N.A., Kakorin V.A. Sklonovaya i vysotnaya priurochennost' molnivykh razryadov i pozharov ot groz v gornoi mestnosti [Slope and altitude distribution of lightning discharges and thunderstorm fires in mountainous areas]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki* [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences], 2024, no. 3 (223), pp. 71-80. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-3-71-80>. (in Russian)
- Khairullin K.Sh., Yakovlev B.A. Antropogennye i mezoklimaticheskie vliyaniya na grozy i grad [Anthropogenic and mesoclimatic influences on thunderstorms and hail], *Tezisy dokladov IV Vsesoyuznogo simpoziuma po atmosfernomu elektrichestvu* [Abstracts of the IV All-Union Symposium on Atmospheric Electricity], 1990, pp. 102-103. (in Russian)
- Galanaki E., Kotroni V., Lagouvardos K., Argiriou A. A ten-year analysis of cloud-to-ground lightning activity over the Eastern Mediterranean region. *Atmospheric Research*, 2015, 166, pp. 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.07.008>
- Adab H., Kamiah K.D., Solaimani K. Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques. *Natural Hazards*, 2013, 65, pp. 1723-1743. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0450-8>.
- Baltaci U., Yildirim F. Effect of Slope on the Analysis of Forest Fire Risk. *Hacettepe Journal of Biology and Chemistry*, 2020, 48(4), pp. 373–379.
- Cureton E.E., D'Agostino R.B. *Factor Analysis: An Applied Approach*. 1st ed. New York, Psychology Press Publ., 1993, 480 p. <https://doi.org/10.4324/9781315799476>
- Forste C., Bruinsma S.L., Abrikosov O. [et al.] EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. *GFZ Data Services*, 2014. <http://doi.org/10.5880/icgem.2015.1>
- Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2017, vol. 37, no. 12, pp. 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.
- Jaiswal R.K., Mukherjee S., Raju D.K., Saxena R. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2002, vol. 4, no. 1, pp. 1-10. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(02\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(02)00006-5)
- Jolliffe I.T. *Principal Component Analysis*. New York, Springer-Verlag Publ., 2002.
- Conedera M., Cesti G., Pezzatti G.B., Zumbrennen T., Spinedi F. Lightning-induced fires in the Alpine region: An increasing problem. *Forest Ecology and Management*, 2006, 234(1), pp. S68. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.08.096>
- Meyer B., Saltus R., Chulliat A. EMAG2v3: *Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution). Version 3. NOAA National Centers for Environmental Information*, 2017. <https://doi.org/10.7289/V5H70CVX>
- Rorig M.L., Ferguson S.A., McKay S.J., Anderson G., Clark T. Model-generated predictions of dry thunderstorm potential. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2007, vol. 46, no. 5, pp. 605-614. <https://doi.org/10.1175/JAM2482.1>
- NASA JPL. NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 3 arc second [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2013. <https://doi.org/10.5067/MEASURES/SRTM/SRTMGL3.003>
- Pandey K., Ghosh S.K. Modelling of Parameters for Forest Fire Risk Zone Mapping. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018, XLII(5), pp. 299–304. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-299-2018>
- Hutchins M.L., Holzworth R.H., Virts K.S., Wallace J.M., Heckman S. Radiated VLF energy differences of land and oceanic lightning. *Geophysical Research Letters*, 2013, vol. 40, no. 10, pp. 2390-2394. <https://doi.org/10.1002/grl.50406>
- Chen Y., Velicogna I., Famiglietti J.S., Randerson J.T. Satellite observations of terrestrial water storage provide early warning information about drought and fire season severity in the Amazon, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, vol. 118, no. 2, pp. 495-504. <https://doi.org/10.1002/jgrg.20046>
- Snedecor G.W., Cochran W.G. *Statistical Methods*. 8th ed. Ames: Iowa State University Press Publ., 1989, 503 p.
- Leybourne B., Smoot C., Gregori G.P., Paparo G., Bhat I. Tectonic Spiral Structures of the Tethyan Vortex Street: GRACE Geoid Interpretations and African Lightning Teleconnections. *33rd IGC, Oslo NCGT Symposium. Oslo, Norway*, 2008.

Bourscheidt V., Junior O.P., Naccarato K.P., Pinto I.R.C.A. The influence of topography on the cloud-to-ground lightning density in South Brazil, *Atmospheric Research*, 2009, vol. 91, no. 2-4, pp. 508-513. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.06.010>

Gloor E., Wilson C., Chipperfield M.P. et al. Tropical land carbon cycle responses to 2015/16 El Niño as recorded by atmospheric greenhouse gas and remote sensing data, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2018, no. 373 (1760), pp. 20170302. <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0302>

Matin Mir A., Chitale Vishwas Sudhir, Murthy Manchiraju S.R., Uddin Kabir [et al.]. Understanding forest fire patterns and risk in Nepal using remote sensing, geographic information system and historical fire data. *International Journal of Wildland Fire*, 2017, vol. 26, no. 4, pp. 276-286. <https://doi.org/10.1071/WF16056>

Сведения об авторах

Кречетова Марина Юрьевна

старший преподаватель, кафедра математики, физики и информатики Горно-Алтайский государственный университет
Россия, 649000, г. Горно-Алтайск, ул. Ленкина, 1
e-mail: belikovamy@yandex.ru

Каранин Андрей Владимирович
кандидат географических наук, доцент кафедры географии и природопользования Горно-Алтайский государственный университет
Россия, 649000, г. Горно-Алтайск, ул. Ленкина, 1
e-mail: vedmedk@bk.ru

Кочеева Нина Алексеевна
кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры географии и природопользования Горно-Алтайский государственный университет
Россия, 649000, г. Горно-Алтайск, ул. Ленкина, 1
e-mail: nina_kocheewa@mail.ru

Глебова Алена Викторовна
старший преподаватель, кафедра математики, физики и информатики Горно-Алтайский государственный университет
Россия, 649000, г. Горно-Алтайск, ул. Ленкина, 1
e-mail: alyna.glebova@gmail.com

Information about the authors

Krechetova Marina Yur'evna

Senior Lecturer, Department of Mathematics, Physics and Informatics Gorno-Altai State University
1, Lenkin st., Gorno-Altai, 649000, Russian Federation
e-mail: belikovamy@yandex.ru

Karanin Andrey Vladimirovich
Candidate of Sciences (Geography), Associate Professor of the Department of Geography and Environmental Management Gorno-Altai State University
1, Lenkin st., Gorno-Altai, 649000, Russian Federation
e-mail: vedmedk@bk.ru

Kocheeva Nina Alekseevna
Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Associate Professor of the Department of Geography and Environmental Management Gorno-Altai State University
1, Lenkin st., Gorno-Altai, 649000, Russian Federation
e-mail: nina_kocheewa@mail.ru

Glebova Alyona Viktorovna
Senior Lecturer, Department of Mathematics, Physics and Informatics Gorno-Altai State University
1, Lenkin st., Gorno-Altai, 649000, Russian Federation
e-mail: alyna.glebova@gmail.com

Код научной специальности: 1.6.21

Статья поступила в редакцию 10.04.2025; одобрена после рецензирования 11.07.2025; принята к публикации 11.09.2025
The article was submitted April, 10, 2025; approved after reviewing July, 11, 2025; accepted for publication September, 11, 2025