

Оригинальная статья / Original article
УДК 470.630:004.925.83
DOI: 10.18470/1992-1098-2023-2-82-91

Оценка изменения NDVI сельхозугодий Ставропольского края за период активной вегетации в 2020 г. по снимкам среднего пространственного разрешения

Светлана В. Савинова¹, Виталий В. Братков^{2,3}, Ирина Д. Мурашова²,
Павел В. Ключин¹, Надира О. Гусейнова⁴

¹Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия

²Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

³Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

⁴Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

Контактное лицо

Павел В. Ключин, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры экономики недвижимости, ФГБОУ ВО «Государственный университет по землеустройству»; 105064 Россия, г. Москва, ул. Казакова, 15. Тел. +79647989844
Email klyushinpv@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4221-036X>

Формат цитирования

Савинова С.В., Братков В.В., Мурашова И.Д., Ключин П.В., Гусейнова Н.О. Оценка изменения NDVI сельхозугодий Ставропольского края за период активной вегетации в 2020 г. по снимкам среднего пространственного разрешения // Юг России: экология, развитие. 2023. Т.18, N 2. С. 82-91. DOI: 10.18470/1992-1098-2023-2-82-91

Получена 22 сентября 2022 г.
Прошла рецензирование 14 декабря 2022 г.
Принята 6 февраля 2023 г.

Резюме

Цель. Оценить изменения NDVI сельхозугодий на территории Ставропольского края под влиянием погодно-климатических условий.

Методы. На основе данных дистанционного зондирования Земли был рассчитан спектральный/вегетационный индекс NDVI. Использованы данные с космического аппарата «Метеор-М» с пространственным разрешением 60 м за период активной вегетации 2020 г. (с мая по сентябрь), которые позволили рассчитать величину NDVI в разные моменты времени периода активной вегетации основных типов сельскохозяйственных угодий Ставропольского края. Для объяснения пространственно-временной изменчивости NDVI проведен анализ условий тепло- и влагообеспечения посредством климатограмм Вальтера по базовым метеостанциям, расположенным в степных и полупустынных ландшафтах Ставропольского края.

Результаты. Период активной вегетации в 2020 г. в степных и полупустынных ландшафтах Ставропольского края начался с первой декады апреля, когда температура воздуха поднялась выше +10°C, и закончился в середине октября. В соответствии с изменением тепло- и влагообеспечения величина NDVI менялась: в целом максимальные значения отмечались весной и в начале лета; по мере нарастания засушливости повсеместно увеличивались площади, соответствующие низким значениям NDVI. В степной зоне, где находятся основные посевы озимой пшеницы, величина NDVI снижалась от 0,45–0,3 в начале периода активной вегетации до 0,15 в конце. Значения NDVI 0,15–0,30, соответствующие различным вариантам травянистой растительности, преобладали в конце периода активной вегетации.

Заключение. Пространственно-временное распределение величины NDVI по территории Ставропольского края отражает прежде всего изменение условий тепло- и влагообеспечения. От последних зависят сроки протекания фенологических фаз естественной и культурной растительности. 2020 год характеризуется достаточным увлажнением в начале активной вегетации, что нашло свое отражение в высокой плотности всходов, и, соответственно, значительной площади NDVI, соответствующим не только травянистой, но и кустарниковой растительности в пределах степных ландшафтов. Нарастание дефицита влаги и сбор урожая во второй половине и в конце лета нивелировало различия между степными и полупустынными ландшафтами, поскольку максимальные площади занимали территории со значениями NDVI 0,15–0,3.

Ключевые слова

Ставропольский край, сельскохозяйственные угодья, температура и осадки периода активной вегетации, климатограмма Вальтера, спектральные/вегетационные индексы, NDVI.

Assessment of changes in the normalized difference vegetation index (NDVI) of farmlands of Stavropol Territory, Russia, during the period of active vegetation in 2020 based on medium spatial resolution images

Svetlana V. Savinova¹, Vitaly V. Bratkov^{2,3}, Irina D. Murashova², Pavel V. Klyushin¹ and Nadira O. Guseynova⁴

¹State University of Land Management, Moscow, Russia

²Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

³M.D. Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia

⁴Dagestan State University, Makhachkala, Russia

Principal contact

Pavel V. Klyushin, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Department of Real Estate Economics, State University of Land Use Planning; 15 Kazakova St, Moscow, Russia 105064.

Tel. +79647989844

Email klyushinpv@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4221-036X>

How to cite this article

Savinova S.V., Bratkov V.V., Murashova I.D., Klyushin P.V., Guseynova N.O. Assessment of changes in the normalized difference vegetation index (NDVI) of farmlands of Stavropol Territory, Russia, during the period of active vegetation in 2020 based on medium spatial resolution images. *South of Russia: ecology, development*. 2023, vol. 18, no. 2, pp. 82-91. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2023-2-82-91

Received 22 September 2022

Revised 14 December 2022

Accepted 6 February 2023

Abstract

Aim. Assess changes in the NDVI of agricultural land in Stavropol Territory under the influence of weather and climate conditions.

Methods. Based on earth remote sensing data, the spectral/vegetation index NDVI was calculated. We used data from the Meteor-M satellite with a spatial resolution of 60 m for the active vegetation period of 2020 (May to September), which made it possible to calculate the NDVI value at different times of the active vegetation period of the main types of agricultural land in the Stavropol Territory. To explain the spatial and temporal variability of NDVI, an analysis of the conditions of heat and moisture supply was carried out using Walter's climatograms at weather stations located in the steppe and semi-desert landscapes of Stavropol Territory.

Results. In 2020, the period of active vegetation in the steppe and semi-desert landscapes of Stavropol Territory began in the first ten days of April, when the air temperature rose above +10°C, and ended in mid-October. In accordance with the change in heat and moisture supply, the NDVI value changed: in general, maximum values were observed in spring and early summer and, as aridity increased, the areas corresponding to low NDVI values increased everywhere. In the steppe zone, where the main crops of winter wheat are located, the NDVI value decreased from 0.45–0.3 at the beginning of the active vegetation period to 0.15 at the end. NDVI values of 0.15–0.30, corresponding to different types of herbaceous vegetation, prevailed at the end of the active vegetation period.

Conclusion. The spatial and temporal distribution of the NDVI value over the territory of the Stavropol Territory reflects, first of all, changes in the conditions of heat and moisture supply. The timing of the course of the phenological phases of natural and cultivated vegetation depends on the latter. 2020 was characterized by sufficient moisture at the beginning of active vegetation, as reflected in the high density of seedlings, and, accordingly, a large area of NDVI, corresponding not only to herbaceous, but also to shrubby vegetation within the steppe landscapes. The increase in moisture deficit and harvesting in the second half and end of summer leveled the differences between the steppe and semi-desert landscapes, since the maximum areas were occupied by territories with NDVI values of 0.15–0.3.

Key Words

Stavropol Territory, farmland, temperature and precipitation during the active vegetation period, Walter's climatogram, spectral/vegetation indices, NDVI.

ВВЕДЕНИЕ

По данным Государственного доклада «О состоянии окружающей среды и природопользовании в Ставропольском крае в 2020 году» из общей площади 6616 тыс. га на земли сельскохозяйственного назначения приходится более 6101,7 тыс. га (92,2%). Сельскохозяйственные угодья занимают 5651,6 тыс. га, или 92,6% от площади земель сельскохозяйственного назначения. В структуре сельскохозяйственных угодий наибольший удельный вес занимает пашня (3929,0 тыс. га, 69,5%), а также естественные кормовые угодья (1681,8 тыс. га, 29,7%), с площадью пастбища в 1579,7 тыс. га (27,9% площади сельскохозяйственных угодий) [1].

Данная структура землепользования отражает природные особенности Ставропольского края: в западной и центральной частях преобладают степные ландшафты, а в восточной и северной – полупустыни [2]. Степная зона используется для выращивания зерновых культур, в связи с чем здесь преобладает пашня, тогда как полупустынные сельскохозяйственные земли используются под пастбища. Лишь на небольшой части предгорий и Ставропольской возвышенности имеются сохранившиеся массивы естественных лесов, которые занимают сравнительно небольшие площади. Преобладание сельскохозяйственных угодий на месте естественных степных и полупустынных ландшафтов делает территорию края интересным и удобным полигоном для мониторинга земель сельскохозяйственного назначения. Выбор 2020 года связан с тем, что урожайность сельхозкультур была близка к максимальной за последние годы. Современное повышение урожайности связано с тем, что основная часть осадков пришла на первую половину периода активной вегетации [3].

В связи с сельскохозяйственной специализацией Ставропольского края актуальной проблемой является мониторинг данной территории с целью оценки влияния природных факторов, прежде всего метеорологических условий конкретных лет, на состояние сельскохозяйственных угодий с точки зрения их продуктивности [3; 4].

В этой связи целью данной работы является анализ изменения величины NDVI на территории Ставропольского края для выявления его поступательной динамики во время вегетационного периода 2020 года, в том числе для степных (пашня) и полупустынных (пастбища) ландшафтов с характерными для них типами сельскохозяйственных угодий.

В настоящее время для мониторинга растительного покрова природных и антропогенных ландшафтов используются данные дистанционного зондирования Земли и рассчитываемые на их основе спектральные/вегетационные индексы [5–8].

Спектральные индексы – это вычисленные путем применения арифметических операций (сложения, вычитания, деления и умножения) изображения, использующие соотношения спектральных яркостей в различных каналах съемки. Таким образом, комбинируя различные каналы и проводя над ними арифметические операции, можно получить принципиально новое изображение поверхности Земли, где в каждом пикселе будет записано значение рассчитываемого индекса. То есть, подобные изображения несут новую информацию об объектах и

явлениях, которые невозможно извлечь непосредственно из исходных снимков [9; 10].

В целях картографирования растительного покрова широкое применение получили спектральные индексы, которые называются вегетационными. Они получены эмпирическим путем и основаны на закономерностях отражения электромагнитного излучения в разных частях спектра растительностью и почвами [9; 10]. Для расчета вегетационных индексов часто используются два спектральных диапазона: красный (0,62–0,75 мкм) и ближний инфракрасный (0,75–1,3 мкм), так как именно в этих зонах происходит минимальное (в красной) и максимальное (в инфракрасной) отражение энергии растительным покровом.

Широкое применение вегетационных индексов связано с относительной простотой их получения, а также разнообразием научно-практических задач, решаемых с их помощью. Основным способом использования вегетационных индексов является составление и сравнение разновременных индексных изображений на одну и ту же территорию. Например, можно составить еженедельные индексные изображения на какую-либо сельскохозяйственную территорию за вегетационный период. Тогда вначале будет заметно возрастание значений индекса от весны к лету, а затем их уменьшение с приближением осени. В этом случае можно сравнивать продуктивность различных участков территории, следить за состоянием посевов, определять последствия различных природных и антропогенных явлений.

Среди большого их количества чаще всего для оценки состояния и динамики естественной и антропогенной растительности (посевов сельскохозяйственных культур), применяется нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index). Индекс количественно характеризует объем фотосинтетически активной биомассы и вычисляется он по формуле:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED),$$

где **NIR** – это коэффициент отражения в ближней ИК области спектра, **RED** – коэффициент отражения в красной области спектра [9; 10].

Широкое распространение данного вегетационного индекса связано с тем, что большинство современных съемочных мультиспектральных систем включают данные каналы: Landsat (США), Sentinel-2 (Европейское космическое агентство), а также отечественные системы дистанционного зондирования Земли. Указанные и другие источники мультиспектральных снимков отличаются пространственным разрешением: так, снимки Landsat в указанных каналах имеют разрешение 30 м, тогда как Sentinel-2 – 10 м в пикселе. Соответственно, они отличаются пространственным охватом территории. Кроме этого, в зависимости от орбитальных характеристик, изменяется временное разрешение различных сенсоров. Поскольку используются каналы оптического диапазона, изучаемая территория должна быть свободна от облачного покрова, что, естественно, сокращает количество снимков, по которым можно вычислять NDVI.

Вычисление NDVI на основе исходных данных можно осуществлять в среде геоинформационных систем при помощи калькулятора растров (ArcGIS, QGIS и др.), хотя в последних версиях программ этого типа уже имеются специализированные инструменты для этих целей. Что касается специализированных программ для обработки данных дистанционного зондирования Земли, то в их инструментарии предусмотрен широкий набор индексов с автоматизированным процессом создания соответствующих растровых изображений.

Основным этапом обработки полученного растрового изображения NDVI является интерпретация. Поскольку оно представляет собой индекс, его значения изменяются от -1,0 до +1,0. Выделение объектов и отнесение их к различным классам опирается на связь между отдельными спектральными каналами и собственно величиной NDVI, представленной в таблице 1.

Таблица 1. Значения индекса NDVI для различных объектов [10]

Table 1. NDVI index values for various objects [10]

Тип объекта Object type	Отражение в красной области спектра Reflection in red region of spectrum	Отражение в инфракрасной области спектра Reflection in infrared region of spectrum	Значение NDVI NDVI value
Густая растительность Dense vegetation	0.1	0.5	0.7
Разряженная растительность Sparse vegetation	0.1	0.3	0.5
Открытая почва / Open ground	0.25	0.3	0.025
Облака / Clouds	0.25	0.25	0
Снег и лед / Snow and ice	0.375	0.35	-0.05
Вода / Water	0.02	0.01	-0.25
Искусственные материалы (бетон, асфальт) Artificial materials (concrete, asphalt)	0.3	0.1	-0.5

С нашей точки зрения, трактовки «типов объектов» значительно размыты и не всегда корректны с точки зрения как природных, так и антропогенных их категорий. Проще всего на основе величины NDVI выделять объекты, имеющие значения от -1,0 до 0. К ним относятся поверхности, которые в течение большей части года, во всяком случае, во время периода активной вегетации мало меняют свои спектральные отражательные свойства. Поверхности, покрытые искусственными материалами (асфальт, бетон), в силу физических свойств могут менять свои отражательные способности в наиболее длинной, тепловой части спектра. Это же можно отнести и к воде в разных агрегатных состояниях, поскольку значения NDVI, близкие к 0, характерны как для воды, так и для снега и льда. Их также можно выделять на основе так называемых «водных индексов» (например, NDWI).

Что касается природных объектов, значения NDVI которых превышает 0, то для них отмечается наиболее значительная терминологическая путаница. Например, термин «открытая почва» в случае степей и полупустынь может отражать ее сезонные состояния: в период схода снежного покрова и отсутствии растительности «открытая почва» может трактоваться как почва, на поверхности которой имеется отмершая растительность прошлого года (мортмасса в виде ветоши и степного войлока) со специфической спектральной отражательной способностью. По мере начала процессов вегетации цвет, и, соответственно, спектральная отражательная способность такой поверхности будут изменяться. Применительно к пашне термин «открытая почва» будет справедлив в том

случае, когда, во-первых, собран урожай сельскохозяйственных культур, и в этом случае на поверхности почвы имеются остатки генеративных органов культурной растительности, как в случае с началом вегетации естественной растительности. Во-вторых, после подготовки почвы к севу осенью, когда поверхность будет представлять собой именно «открытую почву», то есть почву, лишенную растительного покрова. То есть, спектральная отражательная способность данного объекта, на которой базируются расчеты индексов будет существенно отличаться в разные временные отрезки года и будет отражать как естественные сезонные процессы, так и процессы, связанные с этапами сельскохозяйственного производства.

Что касается растительности, для определения характеристик которой и применяется NDVI, то его максимальные значения связывают с максимальными запасами фитомассы. На величину индекса оказывают влияние такие факторы, как видовой состав растительности и сомкнутость. Первый в течение года и сезона практически не меняется и определяет название растительной ассоциации. Сомкнутость растительного покрова, особенно горизонтальная, мозаичность в течение года может значительно изменяться в зависимости от проективного покрытия различных ярусов растительности. В этой связи величина NDVI одной и той же природной растительной ассоциации или группы культурных растений может значительно изменяться в связи с сезонной динамикой, которая обусловлена изменением условий тепло- и влагообеспечения.

Как уже отмечалось, вегетационные индексы отражают состояние естественной и культурной растительности, обусловленное погодными-климатическими условиями. Последние в рамках физической географии/ландшафтоведения влияют на состояние разной продолжительности природных территориальных комплексов и относятся к динамике ландшафта. Еще одной дисциплиной, изучающей динамику состояния ландшафта, является фенология, к одной из задач которой относится выявление фенологических фаз различных видов растений и время их наступления. Именно они (фенологические фазы) довольно хорошо могут быть отслежены посредством вегетационных индексов, в частности – NDVI [11; 12].

Применительно к территории Большого Кавказа [11] была предложена следующая ранжировка NDVI и соответствующим этим значениям объектам по снимкам на середину – вторую половину лета: до -0,33 – водные объекты, от -0,1 до 0,1 – выходы горных пород, пески, снег, лед; до 0,2 – почва без растительного покрова, 0,2–0,4 – разрозненные заросли кустарников, пастбища, травянистая растительность; 0,4–0,5 – скудная и разреженная древесная и кустарниковая растительность; более 0,67–0,8 – густая лесная растительность, а значения индекса выше 0,8 соответствует очень мощной и густой растительности. В целом интервалы значений NDVI довольно хорошо увязываются с жизненными формами растительности (древесная, кустарниковая и травянистая).

NDVI также показывает состояние растительности на данный момент времени. Применительно к посевам сельскохозяйственных культур данный индекс может показывать состояние растений после перезимовки:

- индекс менее чем 0,15 говорит о том, что, скорее всего растения погибли;
- индекс 0,15–0,2 тоже является низким и говорит о том, что, скорее всего растения начали зимовку на очень ранней фенологической стадии.
- 0,2–0,3 говорит о том, что с растениями все хорошо, и они плавно возобновляют вегетацию.
- 0,3–0,5 – отличный показатель [13].

Таким образом, основная цель работы – сопряженный анализ условий тепло- и влагообеспечения периода активной вегетации в 2020 году и пространственного распределения NDVI по Ставропольскому краю, где на подавляющей части территории получили распространение сельскохозяйственные угодья в виде пашни и пастбищ.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для составления серии карт распределения величины NDVI по территории Ставропольского края использованы открытые данные с отечественного космического аппарата дистанционного зондирования Земли «Метеор-М». На нем установлена целевая аппаратура комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС МСУ 101 и 102) с пространственным разрешением 60 м. Съемка происходит в трех спектральных каналах (0,52–0,90 мкм), в том числе в красной и ближней инфракрасной зонах. Обработанные данные доступны в геоинформационном сервисе Единый комплекс Банк базовых продуктов (ЕК ББП). Он базируется на централизованном хранении стандартных базовых продуктов, получаемых в результате

обработки данных с отечественной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с целью дальнейшего формирования тематических продуктов. Все данные, имеющиеся в Банке базовых продуктов, проходят первичную обработку, географическую привязку, радиометрическую и атмосферную коррекцию. В Банке представлены продукты разной степени обработки [6].

Для дальнейшей тематической обработки были выбраны уже готовые тематические базовые продукты – индекс NDVI. Исходные данные в этом геоинформационном сервисе представлены в виде сцен – определенным образом нарезанных частей принимаемого со спутника потока данных. Поиск данных осуществлялся за период активной вегетации (май–сентябрь 2020 г.). Этот период был разбит на отрезки по 10 дней, когда растительность природных и культурных ландшафтов находилась в максимально близких фенологических фазах, что позволило составить мозаики-сцены на всю изучаемую территорию. Периодичность съемки космического аппарата «Метеор-М» составляет 2–3 дня, то есть количество сцен за десятидневные периоды в целом невелико. Существенной проблемой стало наличие снимков с большой площадью территории, занятой облачностью. В итоге были отобраны сцены с минимальным процентом облачности по сравнению с другими датами, по которым составлены мозаики.

Классификация и картографирование результатов пространственного распределения NDVI осуществлялось в программах ArcGIS и Mapinfo, что позволило также определить площади, занимаемые разными значениями данного индекса.

Что касается интерпретации метеорологических данных 2020 года, то для этого применялся метод климатодиаграмм, предложенный Г. Вальтером [14]. Данный метод позволяет оценить биоклиматические условия. Климатодиаграмма представляет собой совмещенный график хода температур и осадков в соотношении 1:2, то есть 10°C соответствует 20 мм осадков. В случае гумидных условий кривая осадков располагается над кривой температур; если кривая температур опускается под кривую осадков, условия засушливые, и чем ниже кривая осадков опускается под кривую температур, тем засушливее условия. То есть, данный график отражает изменение условий, от которых зависит продуктивность естественной и культурной растительности на протяжении вегетационного периода.

Для выявления метеорологических условий 2020 года были использованы данные метеостанций «Рощино» (полупустыни), «Буденновск» (сухие степи), «Ставрополь» (лесостепи байрачные) и «Новоалександровск» (степи типичные), имеющиеся в открытом доступе [15].

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Естественный ход развития растительности находится под влиянием метеорологических факторов. В течение года традиционно выделяют два периода: холодный (когда температура воздуха ниже 0°) и теплый. Наряду с периодами в умеренных широтах выделяются тривиальные сезоны года, границами которых являются также переходы через определенные температуры. В пределах сезонов выделяются подсезоны, которые также разграничиваются температурными градиентами.

Так, например, весна подразделяется на раннюю (до +5°C), среднюю (от +5 до +10°C) и позднюю (от +10 до 15°C).

Наиболее активное развитие растительности начинается при повышении температуры воздуха выше +10°C, а отрезок времени, когда она выше этой отметки, принято называть периодом активной вегетации. Однако на развитие растительности в это время начинают оказывать влияние осадки, в зависимости от которых растительный покров либо увеличивает продуцирование фитомассы, либо сокращает. Так, при

увеличении осадков в первую половину вегетационного периода продуцирование фитомассы максимально и последующая засуха не оказывает существенного влияния на конечную продукцию. Возникновение засух в это время, наоборот, снижает урожайность естественной и культурной растительности.

Климадиаграммы, отражающие изменение условий на протяжении 2020 года по базовым метеостанциям на территории Ставропольского края, иллюстрирует рисунок 1.

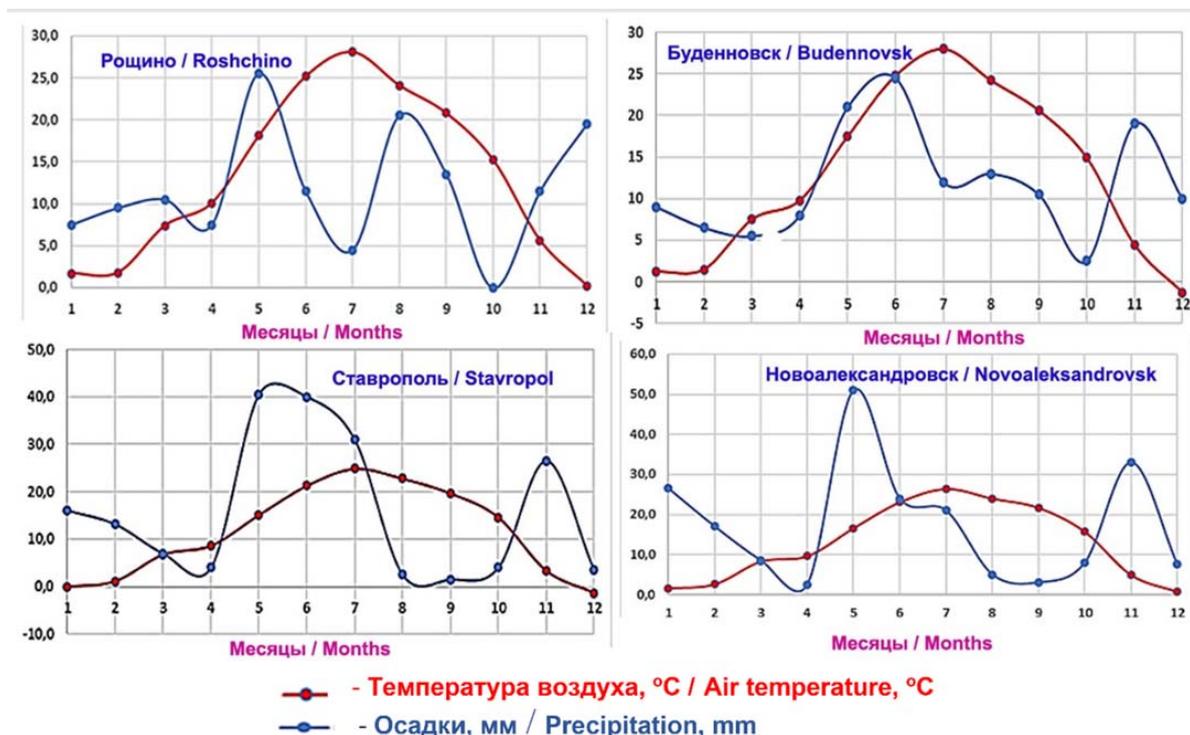


Рисунок 1. Оценка биоклиматических условий на основе климатограмм Вальтера по данным метеостанций на территории Ставропольского края

Figure 1. Assessment of bioclimatic conditions based on Walter's climatogram according to weather stations in Stavropol Territory

На представленных графиках отчетливо видно, что период активной вегетации начался в 2020 г. практически на всех метеостанциях в начале апреля, когда температура воздуха поднялась выше +10°C. Окончание вегетационного периода отмечалось примерно в середине октября. Что касается условий увлажнения, то они существенно отличались. Так, в восточной, наиболее засушливой части, недостаток влаги стал ощущаться уже к середине мая – началу июня. В степной части Ставропольского края максимум осадков отмечался как раз в мае–июне, и лишь потом количество осадков сократилось, что привело к формированию засушливых условий, которые закончились синхронно с окончанием периода активной вегетации.

Поскольку отрицательные значения NDVI чаще всего соответствуют облачности и водным объектам, для их верификации и разграничения можно использовать статистические данные. Так, по данным Института озераведения Российской Академии Наук на территории Ставропольского края расположено более 3000 озёр и искусственных водоёмов общей площадью около 700 км² (озёрность 1,06%), в том числе около 720 озёр площадью более 0,01 км² и ряд озёр меньшего

размера [1]. Площадь наиболее крупных водных объектов на территории края (Чограйского и Отказненского водохранилищ и Сенгилеевского озера) составляет около 265 км². То есть эти величины можно считать (с учетом естественных сезонных процессов, а также разрешения снимков) реперными для оценки облачности.

Максимальные значения NDVI соответствуют наиболее густой и плотной растительности. Традиционно под ней понимается древесная. В этой связи для верификации максимальных значений можно использовать данные по лесистости и площади лесного фонда Ставропольского края. Так, по данным Министерства природных ресурсов края (2021), площадь земель лесного фонда составляет 129,9 км². Лесистость территории составляет 1,6%. Оценка площади, занятой древесной растительностью на основе среднемасштабных топографических карт (1:200000), дает величину 1711 км² [1].

Как отмечалось, положительные величины NDVI могут быть объединены в три группы, которые соответствуют трем основным жизненным формам растительности: травянистой (величина NDVI до 0,3), кустарниковой (величина NDVI от 0,3 до 0,6) и

древесной (величина NDVI более 0,6). Кроме того, в разные отрезки вегетационного периода плотность растительного покрова и его проективное покрытие меняется, что также приводит к изменению величины

NDVI даже в пределах одного типа растительности. Изменение величины NDVI на территории Ставропольского края за период активной вегетации 2020 года иллюстрируют рисунки 2 и 3 и таблица 2.

Таблица 2. Изменение площадей NDVI на территории Ставропольского края за период активной вегетации 2020 года
Table 2. Change of NDVI areas in Stavropol Territory during period of active vegetation in 2020

Даты / Dates	≥0	0–0,15	0,15–0,3	0,3–0,45	0,45–0,6	0,6–0,75	0,75–0,9
21.05–30.05	1326,7	20096,7	15684,5	14741,4	12062,6	2243,9	4,3
31.05–09.06	609,4	16696,7	13386,9	15196,9	15275,5	4992,5	2,0
10.06–19.06	350,8	13843,2	12693,9	13124,4	13384,8	10898,9	1863,9
30.06–09.07	2140,8	37381,3	11594,4	6931,4	5024,0	3053,1	35,0
10.07–19.07	3154,6	41497,4	9982,2	5655,4	3959,1	1869,1	42,3
29.08–07.09	207,7	36887,4	21291,0	5447,5	1850,5	476,0	0
08.09–17.09	272,9	39743,3	18493,4	4781,8	1963,9	869,5	35,2
18.09–27.09	665,3	44199,1	15485,5	3907,3	1459,8	443,0	0

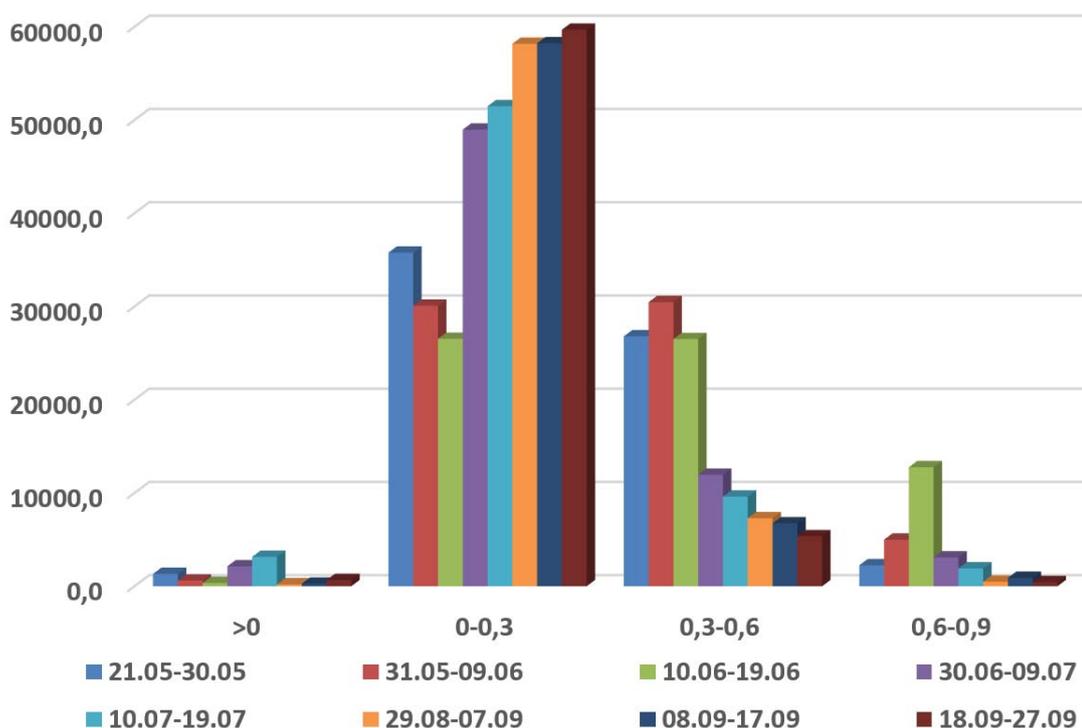


Рисунок 2. Изменения площадей разных групп значений NDVI на территории Ставропольского края
Figure 2. Changes in areas of different groups of NDVI values in Stavropol Territory

Как видно из представленных данных, в последнюю декаду мая 2020 года наибольшую площадь занимали территории, где величина NDVI составляла 0–0,3, то есть соответствовала травянистой растительности. Среди нее наибольшую площадь (20096,7 км²) занимали значения 0–0,15, которые были типичны для восточных и северных частей (полупустыни), а также для долин крупных рек. В большей части степной зоны величина NDVI соответствовала 0,15–0,3. Значения NDVI увеличивались при переходе к предгорьям, и, в меньшей степени, в западной части края. В этот период, как уже отмечалось выше, на всей территории края недостатка влаги не было. В целом в полупустынях, где растительный покров зачастую разреженный и несомкнутый, завершается его формирование. В степях, где растительный покров в целом сомкнутый, в это время отмечается активный прирост фитомассы как в естественных, так и в культурных ценозах, что хорошо

отражается данным спектральным индексом. Наиболее высокие его значения несколько превышают площадь древесной растительности.

Первая декада июня (31.05–09.06) характеризуется сравнительно небольшим изменением: за счет повышения температуры воздуха сократилась площадь значений NDVI со значениями 0–0,15 за счет увеличения площадей более высоких значений в западной и предгорной частях. В целом разные группы значений NDVI довольно близки по занимаемым площадям. Отмечается увеличение площадей, соответствующей древесной растительности более, чем в два раза по сравнению с концом мая. В целом продолжается процесс формирования естественной и культурной растительности, сопровождающийся увеличением площади листовых поверхностей, и, соответственно, проективного покрытия.

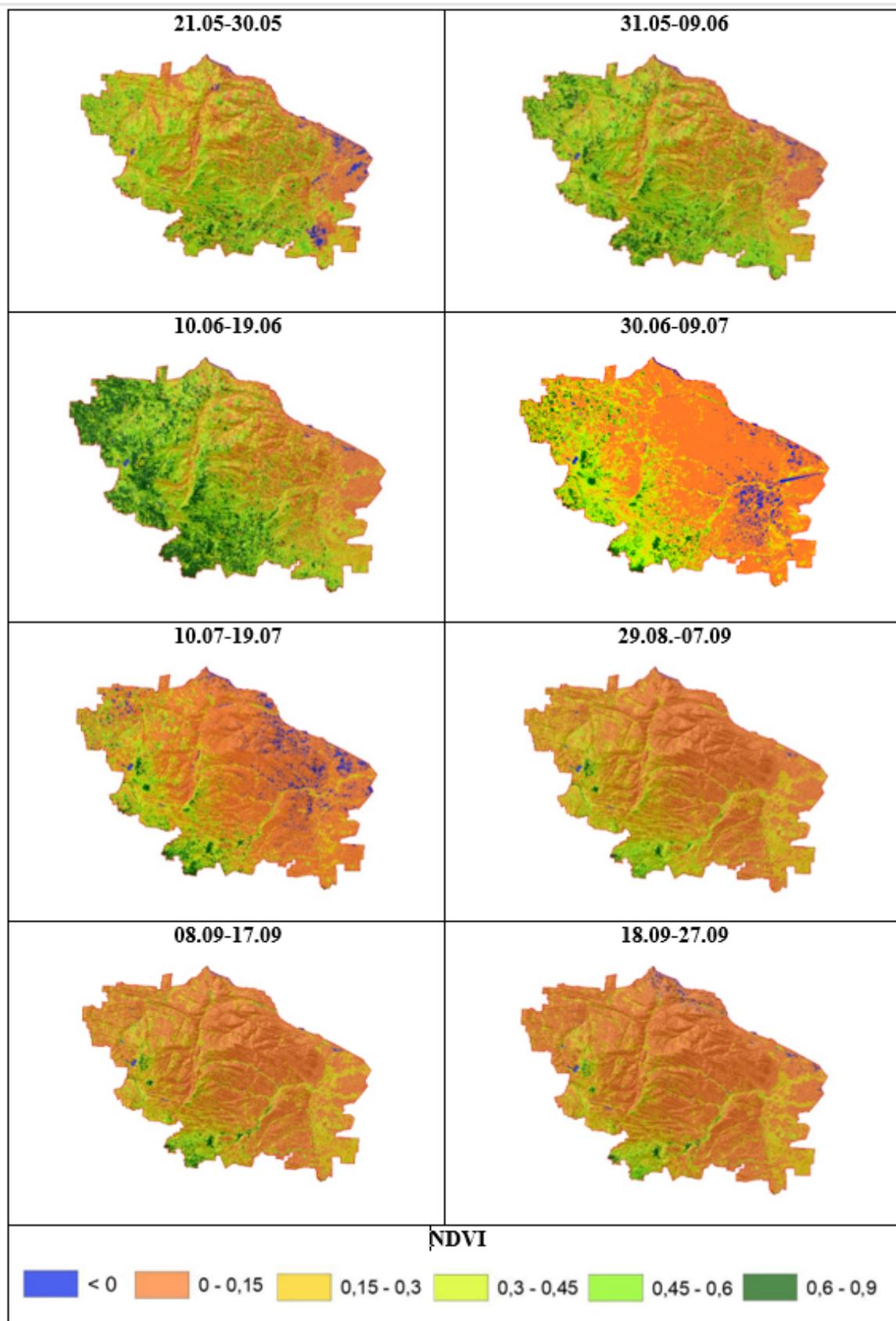


Рисунок 3. Динамика величины NDVI на территории Ставропольского края
Figure 3. Dynamics of NDVI magnitude in Stavropol Territory

Вторая декада июня (10.06–19.06) продолжает тенденции дальнейшего естественного развития растительного покрова, при этом в градациях от 0 до 0,6 площади отличаются крайне незначительно. В этот

период отмечается максимум в градации 0,75–0,9 (1863,9 км²), который практически соответствует площади лесов на территории края. В эти три периода времени отмечается тенденция к сокращению

площади отрицательных значений NDVI, что в целом согласуется с общей картиной выпадения осадков. В целом этот временной отрезок можно является концом относительно влажного периода на востоке и севере края и наиболее оптимальным с точки зрения тепло- и влагообеспечения в остальной его части. В это время растительность находится на пике своего сезонного развития.

Первая декада июля (30.06–09.07) характеризуется усилением засушливости в восточной, центральной и северной частях края. Кроме того, отмечаются локальные осадки в восточной части края (или участки, где на поверхности скапливается влага). Процессы вегетации продолжаются на юге и юго-западе края. Наибольшую площадь занимают участки с величиной NDVI 0–0,15 – 37381,3 км². В остальных градациях происходит сокращение площадей. Наиболее резко сократилась площадь, занимаемая максимальными значениями NDVI. Данная картина объясняется тем, что в это время начинается уборка озимой пшеницы, основной сельскохозяйственной культуры Ставропольского края. Это предположение подтверждается тем, что в следующую декаду (10.07–19.07) отмечается максимальная площадь в градациях NDVI от 0 до 0,15. Кроме того, значительная площадь занята облачностью в северо-восточной части края, где отмечаются минимальные положительные значения NDVI, что дает увеличение этой площади. Также интересно отметить, что площадь, соответствующая значениям NDVI с древесной растительностью (0,6–0,75) практически идентична таковой во второй декаде июня, но в другой градации (0,75–0,9): 1869,1 и 1863,9 км² соответственно.

Вторая половина лета характеризуется не столько существенным снижением температуры воздуха, сколько повсеместным сокращением количества осадков, что приводит к угнетению растительности. В этой связи с конца августа и по конец сентября продолжает оставаться максимальной площадь наиболее низких положительных значений NDVI (0–0,15). Остальные значения изменяются крайне слабо. Последняя декада сентября характеризуется максимальной за весь вегетационный период площадью NDVI с наиболее разреженным растительным покровом (44199,1 км²), который соответствует полупустыням, где естественный растительный наименее сомкнутый, и убранным сельскохозяйственным угодьям. Что касается наиболее высоких значений NDVI, то сумма площадей в градациях 0,45–0,6 и 0,6–0,75 составляет 1902,8 км², и в целом согласуется с площадью лесов на территории края.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ пространственно-временного распределения величины NDVI позволяет получать представление о естественных и антропогенных процессах, протекающих в растительном покрове. Сезонный характер развития различных типов растительности приводит к тому, что в разные фенологические фазы величина NDVI травянистой растительности изменяется довольно существенно, при этом в моменты максимального развития она может соответствовать градациям, характерным для кустарниковой растительности. Что касается древесной растительности, то ее значения изменяются не столь существенно в течение периода активной вегетации.

Вегетационный период в 2020 году длился с апреля по октябрь, однако в эти месяцы интенсивность процессов вегетации была минимальной. В этой связи, а также с учетом озвученных критериев, сцены отбиралась с начала мая по конец сентября. В итоге были выбраны восемь сцен, которые отличаются разным процентом облачности (от минимального 10–19.06, 29.08–07.09 и 08–17.09) до максимального (20–29.07).

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках госзадания ГГНТУ им. академика М.Д. Миллионщикова FZNU-2021-0002 «Оценка изменчивости агроклиматических условий Северного Кавказа в связи с глобальными изменениями климата».

ACKNOWLEDGMENT

The work was carried out within the framework of the state tasks of GGNTU Academician M.D. Millionshchikov FZNU-2021-0002 "Assessment of variability of agro-climatic conditions of the North Caucasus in connection with global climate changes".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О состоянии окружающей среды и природопользовании в Ставропольском крае. URL: <https://mpr26.ru/deyatelnost/otchety-doklady/o-sostoyanii-okruzhayushchey-sredy-i-prirodopolzovanii-v-stavropolskom-krae/> (дата обращения: 20.08.2022)
2. Шальнев В.А. Современные ландшафты Северного Кавказа. Эволюция и современность. Ставрополь: Изд-во СГУ, 2004. 264 с.
3. Волков С.Н., Савинова С.В., Черкашина Е.В., Шаповалов Д.А., Братков В.В., Ключин П.В. Оценка современных климатических изменений на территории Предкавказья для целей прогнозирования урожайности озимой пшеницы // Юг России: экология, развитие. 2021. Т. 16. N 1. С. 117–127. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2021-1-117-127>
4. Заурбеков Ш.Ш., Джандубаева Т.З. Тенденции климатических изменений в степных ландшафтах Западного Предкавказья // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2014. N 3. Т. 28. С. 76–84.
5. Адамович Т.А., Кантор Г.Я., Ашихмина Т.Я., Савиных В.П. Анализ сезонной и многолетней динамики вегетационного индекса NDVI на территории государственного природного заповедника «Нургуш» // Теоретическая и прикладная экология. 2018. N 1. С. 18–24. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2018-1-018-024>
6. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О. и др. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
7. Письман Т.И., Шевырнов А.П., Ларько А.А., Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В., Шпедт А.А., Трубников Ю.Н. Информативность спектральных вегетационных индексов для дешифрирования сельскохозяйственных полей // Биофизика. 2019. N 4. С. 740–746. <https://doi.org/10.1134/S0006302919040136>
8. Савин И.Ю., Чендев Ю.Г. Причины многолетней динамичности индекса NDVI (MODIS), осреднённого для пахотных земель на уровне муниципалитетов Белгородской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. N 2. С. 137–143. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-137-143>
9. Черепанов А.С. Вегетационные индексы // Геоматика. 2011. N 2. С. 98–102. URL: https://sovzond.ru/upload/iblock/f46/2011_02_017.pdf (дата обращения: 23.11.2023)
10. Дубинин М. NDVI – теория и практика. URL: <https://gis-lab.info/qa/ndvi.html> (дата обращения: 13.11.2022)

11. Братков В.В., Кравченко И.В., Туаев Г.А., Атаев З.В., Абдулжалимов А.А. Применение вегетационных индексов для картографирования ландшафтов Большого Кавказа // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2016. Т. 10. N 4. С. 97–111.
12. Shapovalov D.A., Klyushin P.V., Shirokova V.A., Khutorova A., Savinov S. Problems and efficiency of land use in the North Caucasian federal district // *GeoConference SGEM*. 2018. V. 18. N 5.1. P. 667–674. <https://doi.org/10.5593/sgem2018/5.1/S20.086>
13. Aeromotus education URL: <https://aeromotus.ru/obzor-vozmozhnostej-indeksa-ndvi/> (дата обращения: 01.06.2022)
14. Вальтер Г. Растительность Земного шара. Эколого-физиологическая характеристика. Перевод с немецкого. М.: Прогресс, 1968. 551 с.
15. Погода и климат. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (дата обращения: 19.03.2022)

REFERENCES

1. *O sostoyanii okruzhayushchei sredy i prirodopol'zovanii v Stavropol'skom krae* [State report on the state and environmental protection of the Stavropol Territory]. Available at: <https://mpr26.ru/deyatelnost/otchety-doklady/o-sostoyanii-okruzhayushchey-sredy-i-prirodopolzovanii-v-stavropol'skom-krae/> (accessed 20.08.2022)
2. Shal'nev V.A. *Sovremennye landshafty Severnogo Kavkaza. Evolyutsiya i sovremennost'* [Modern landscapes of the North Caucasus. Evolution and modernity]. Stavropol', SSU Publ., 2004, 264 p. (In Russian)
3. Volkov S.N., Savinova S.V., Cherkashina E.V., Shapovalov D.A., Bratkov V.V., Klyushin P.V. Assessment of current climate conditions changes in the territory of Ciscaucasia for the purposes of forecasting winter wheat yield. *South of Russia: ecology, development*, 2021, vol. 16, no. 1, pp. 117–127. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2021-1-117-127>
4. Zaurbekov Sh.Sh., Dzhandubaeva T.Z. Trends of climatic changes in step landscapes of the Western Ciscaucasia. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstven-nogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennyye i tochnyye nauki* [Dagestan State Pedagogical University journal. Natural and exact sciences]. 2014, vol. 28, no. 3, pp. 76–84 (In Russian)
5. Adamovich T.A., Kantor G.Ya., Ashikhmina T.Ya., Savinykh V.P. Analysis of seasonal and long-term dynamics of the NDVI growing index in the territory of the Nurgush State Nature Reserve.

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Светлана В. Савинова выполнила все полевые и лабораторные исследования. Виталий В. Братков осуществил поиск исторических данных и литературный обзор, принимал участие в обработке данных. Ирина Д. Мурашова участвовала в обработке и изготовлении графического материала статьи. Павел В. Ключин анализировал и интерпретировал результаты исследований, подготовил рукопись. Надира О. Гусейнова осуществляла статистическую обработку материала. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи, и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

6. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., et al. Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii [Satellite mapping of Russia's racial cover]. Moscow, IKI RAS Publ., 2016, 208 p. (In Russian)
7. Pisman T.I., Shevyrnogov A.P., Larko A.A., Botvich I.Yu., Emelyanov D.V., Shpedt A.A., Trubnikov Yu.N. Informativity of spectral vegetative indices for deciphering agricultural fields. *Biophysics*, 2019, no. 4, pp. 740–746. (In Russian) <https://doi.org/10.1134/S0006302919040136>
8. Savin I.Yu., Chendeu Yu.G. The reasons for the long-term dynamism of the NDVI (MODIS) index, averaged for arable land at the level of municipalities in the Belgorod region. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2018, vol. 15, no. 2, pp. 137–143. (In Russian) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-137-143>
9. Cherepanov A.S. [Vegetation indices]. *Geomatika*, 2011, no. 2, pp. 98–102. Available at: https://sovzond.ru/upload/iblock/f46/2011_02_017.pdf (accessed 23.11.2023)
10. Dubinin M. [NDVI – theory and practice]. *Geographic Information systems and remote sensing*. Available at: <https://gis-lab.info/qa/ndvi.html> (accessed 13.11.2022)
11. Bratkov V.V., Kravchenko I.V., Tuayev G.A., Ataev Z.V., Abdulzhaimov A.A. When changing growing indices for mapping landscapes of the Greater Caucasus. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstven-nogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennyye i tochnyye nauki* [Dagestan State Pedagogical University journal. Natural and exact sciences]. 2016, vol. 10, no. 4, pp. 97–111. (In Russian)
12. Shapovalov D.A., Klyushin P.V., Shirokova V.A., Khutorova A., Savinov S. Problems and efficiency of land use in the North Caucasian federal district. *GeoConference SGEM*, 2018, vol. 18, no. 5.1, pp. 667–674. <https://doi.org/10.5593/sgem2018/5.1/S20.086>
13. Aeromotus education. Available at: <https://aeromotus.ru/obzor-vozmozhnostej-indeksa-ndvi/> (accessed 01.06.2022)
14. Walter G. *Globe vegetation. Ekologo-fiziologicheskaya kharakteristika* [Ecological and physiological characteristics]. Moscow, Progress Publ., 1968, 551 p. (In Russian)
15. *Pogoda i klimat* [Weather and climate]. Available at: <http://www.pogodaiklimat.ru> (accessed 19.03.2022)

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Svetlana V. Savinova completed all field and laboratory studies. Vitaly V. Bratkov carried out search for historical data and a literary review and participated in data processing. Irina D. Murashova participated in the processing and production of the graphic material of the article. Pavel V. Klyushin analysed and interpreted the research results and prepared the manuscript. Nadira O. Guseynova carried out statistical processing of the material. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Светлана В. Савинова / Svetlana V. Savinova <https://orcid.org/0000-0003-4433-2528>
 Виталий В. Братков / Vitaly V. Bratkov <https://orcid.org/0000-0001-5072-1859>
 Ирина Д. Мурашова / Irina D. Murashova <https://orcid.org/0000-0001-9512-2403>
 Павел В. Ключин / Pavel V. Klyushin <https://orcid.org/0000-0002-4221-036X>
 Надира О. Гусейнова / Nadira O. Guseynova <https://orcid.org/0000-0003-3979-4293>