

УДК 911.2, 504.05, 551.582

DOI: 10.46698/VNC.2025.67.94.001

Оригинальная статья

Пространственно-временные вариации трендов индекса NDVI в горных и предгорных районах Северного Кавказа

В.Ю. Тимченко[✉], Е.С. Каменецкий[✉], А.А. Радионов[✉]

Южный математический институт Владикавказского научного центра РАН,
Россия, 362025, г. Владикавказ, ул. Ватутина, 53,
e-mail: aar200772@mail.ru

Статья поступила: 11.02.2025, доработана: 19.05.2025, принята к публикации: 21.05.2025

Резюме: Актуальность работы. Климатические изменения в Северо-Кавказском регионе приводят к изменению температурного и водного режима, что непосредственно влияет на многолетнюю изменчивость растительной биомассы и урожайность, следовательно, на устойчивое развитие сельского хозяйства, которое является одной из ведущих отраслей экономики. **Целью** исследования является изучение изменчивости количества фитомассы в горных и предгорных районах центральной части Северного Кавказа и выявление возможных агроклиматических проблем. **Методы.** Используется геопространственный отбор многолетних данных индекса вегетации NDVI для локаций исследуемой территории. Для рядов двухнедельных композитов NDVI вычислялась интегральная характеристика и проверялась модель линейной регрессии, позволяющая вычислить статистические параметры уклонов и у-пересечения. Использование QGIS и метода интерполяции изолиниями для построения карт распределения этих параметров позволяет выявить границы районов с многолетним уменьшением индексов вегетации при геоэкологическом районировании. **Результаты.** Показано, что для территории РСО-Алания и прилегающих предгорных районов индекс вегетации складывается за счет большой фитомассы лесных ландшафтов и имеет положительный тренд, что свидетельствует о сохранении благоприятных климатических условий в них. Для горных районов с высокогорным ландшафтом, покрытых альпийскими лугами или без растительного покрытия, количество фитомассы в целом небольшое, но имеет положительный тренд на увеличение, что также свидетельствует о благоприятных условиях для фитоценоза. Для равнинных районов Осетинской наклонной равнины и лесостепных ландшафтов в районе г. Дигоры – г. Беслана – с. Заманкул, на южных склонах Сунженского и Терского хребтов имеются участки с многолетним трендом на уменьшение индекса вегетации, что свидетельствует о деградации растительного покрова, изменении температурного и водного режимов этих локаций. **Выводы.** Для предгорных ландшафтов на территории РСО-Алания и прилегающих районов индекс NDVI имеет положительный тренд многолетней изменчивости. Равнинные и степные районы, а также южные склоны Сунженского и Терского хребтов имеют отрицательный уклон трендов индексов вегетации.

Ключевые слова: MODIS, индекс вегетации, NDVI, QGIS, статистические параметры, тренды, многолетние изменения, Северный Кавказ.

Для цитирования: Тимченко В.Ю., Каменецкий Е.С., Радионов А.А. Пространственно-временные вариации трендов индекса NDVI в горных и предгорных районах Северного Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 231-243. DOI: 10.46698/VNC.2025.67.94.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.67.94.001

Original paper

Spatiotemporal variations of NDVI index trends in mountainous and foothill areas of the North Caucasus

V.Yu. Timchenko^{ORCID}, E.S. Kamenetsky^{ORCID}, A.A. Radionoff^{ORCID}

Southern Mathematical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences,
53 Vatutina Str., Vladikavkaz 362025, Russian Federation,
e-mail: aar200772@mail.ru

Received: 11.02.2025, revised: 19.05.2025, accepted: 21.05.2025

Abstract: Relevance. Climatic changes in the North Caucasus region lead to changes in the temperature and water regime. This directly affects the long-term variability of plant biomass and yields, and consequently, the sustainable development of agriculture, which is one of the leading sectors of the economy. **The aim** of this research is to study the variability of the amount of phytomass in the mountainous and foothill areas of the central part of the North Caucasus and identify possible agro-climatic problems. **Methods.** Geospatial selection of long-term NDVI vegetation index data is used for the locations of the studied territory. For the two-week NDVI series, an integral characteristic was calculated and a linear regression model was tested, which makes it possible to calculate statistical parameters of slopes and y-intersections. Using QGIS and the isoline interpolation method to build maps of the distribution of these parameters allows us to identify the boundaries of areas with a long-term decrease in vegetation indices during geoecological zoning. **Results.** It is shown that for the territory of the Republic of North Ossetia–Alania and adjacent foothill areas, the vegetation index is formed due to the large phytomass of forest landscapes and has a positive trend, which indicates the preservation of favorable climatic conditions in them. For mountainous areas with a high-altitude landscape covered with alpine meadows or without vegetation, the amount of phytomass is generally small, but has a positive upward trend, which also indicates favorable conditions for phytocenosis. For the lowland areas of the Ossetian inclined plain and forest-steppe landscapes in the area of Digora – Beslan – Zamankul, on the southern slopes of the Sunzhensky and Tersky ranges there are areas with a long-term trend towards a decrease in the vegetation index, which indicates the degradation of vegetation cover, changes in temperature and water regimes of these locations. **Conclusions.** For foothill landscapes in the territory of the Republic of North Ossetia–Alania and adjacent areas, the NDVI index has a positive trend of long-term variability. The lowland and steppe regions, as well as the southern slopes of the Sunzhensky and Tersky ranges, have a negative trend bias in vegetation indices.

Keywords: MODIS, vegetation index, NDVI, QGIS, statistical parameters, trends, long-term changes, North Caucasus.

For citation: Timchenko V.Yu., Kamenetsky E.S., Radionoff A.A. Spatiotemporal variations of NDVI index trends in mountainous and foothill areas of the North Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 231–243. DOI: 10.46698/VNC.2025.67.94.001

Введение

Изменение климата непосредственно оказывает влияние на фенологический цикл растительного покрова и выражается в сдвиге дат начала и окончания сезона роста, изменении продолжительности благоприятного для роста периода [Mortier et al.,

2023]. Оценка влияния глобальных климатических изменений на окружающую среду и различные секторы экономики, адаптация хозяйственной и экономической деятельности к этим изменениям, представлены в Климатическом докладе за 2023 (https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf) и в работах [Abbass et al., 2022; Aryal et al., 2020; Chausson et al., 2020; Malhi et al., 2021; Asadi et al., 2005].

Анализ климатических изменений Северного Кавказа, влияние на водный режим и прогноз возможного агроклиматического влияния, способы адаптации рассмотрены в работах [Лурье, Панов, 2013; Ашабоков и др., 2020]. Наблюдаемым в горных районах Кавказа климатическим изменениям и их влиянию на развитие опасных гидрометеорологических явлений посвящены работы [Аджиева, Кондратьева, 2009; Яицкая и др., 2023].

Индекс NDVI является опережающим индикатором наличия, роста и общего объема фитомассы и характеристикой агроэкологического состояния территории [Черепанов, Дружинина, 2011], способен указать на ухудшение состояния растений в определенной зоне, но не дает прямых указаний о причинах возникновения проблем [Родимцев и др., 2022].

В работах [для примера Skakun et al., 2017] описано использование спутниковых данных с высоким пространственным разрешением и с временной точностью 3-5 суток для выявления пика значений NDVI и определения времени сбора урожая.

Для Большого Кавказа [Братков и др., 2016] описан метод выделения и уточнения границ природно-территориальных комплексов наиболее высоких классификационных уровней (типов и подтипов ландшафтов) на основе индекса NDVI. Для Ставропольского края [Савинова и др., 2023] на основе данных дистанционного зондирования Земли был рассчитан индекс NDVI по космическим снимкам среднего разрешения 60 м на пиксель, что позволило рассчитать величину NDVI в разные моменты активной вегетации основных типов сельскохозяйственных угодий. Оценка агроклиматических условий степных и семиаридных ландшафтов для Чеченской республики показана в работах [Керимов и др., 2024а; Керимов и др., 2024б], в которых с применением беспилотных летно-подъемных средств строились карты распределения NDVI с высоким пространственным разрешением.

Для урбанизированных, тундровых и лесных районов Западной Сибири [Esau et al., 2016] исследовался климатический отклик экосистем на основе карт индекса NDVI высокого разрешения (250 м на пиксель) по максимальным (пиковым) за лето значениям индекса и его среднегодовым значениям. Для горных районов Qinling-Daba Китая [Yao, 2024] на основе снимков с разрешением 30 м проводилась статистическая обработка распределения NDVI.

В данной работе предпринята попытка определения пространственного распределения трендов индекса NDVI по спутниковым данным низкого разрешения за многолетний период для горных, предгорных и равнинных районов РСО-Алания. Целью работы является определение многолетних климатических изменений и определение территории с возможной деградацией растительного покрова, индикатором которого служит индекс вегетации NDVI. Исследуется поле значений индекса вегетации, его пространственное распределение, а также соответствующие многолетние статистические тренды.

Методика

Для получения исходных данных используется расширенная и модифицированная методика отбора и статистической обработки рядов индексов вегетации, предложенная в работе [Каменецкий и др., 2021].

В качестве источника информации о пространственном и временном распределении вегетационного индекса NDVI и температуры использованы спутниковые данные NASA многоканальных спектрорадиометров MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, <http://modis.gsfc.nasa.gov>), находящиеся в открытом доступе.

Для проведения исследования выбран прямоугольный участок между 42.5° – 43.8° с.ш. и 42.9° – 45.0° в.д., с шагом сетки 0.10° по широте и долготе для приведения в соответствие участкам пикселям карт-схем.

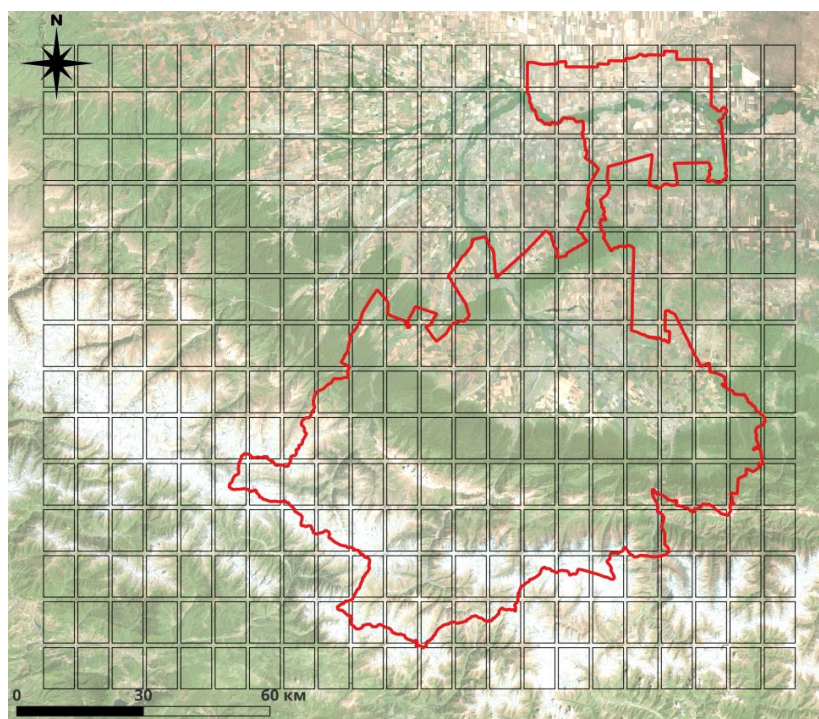


Рис. 1. Исследуемый участок. Расположение: по широте $42^{\circ}.5 - 43^{\circ}.8$ СШ и по долготе $42^{\circ}.9 - 45^{\circ}.0$ ВД, шаг сетки 0.1° . Программное обеспечение QGIS (<https://qgis.org>) /

Fig. 1. The area under study. Location: latitude $42^{\circ}.5 - 43^{\circ}.8$ N and longitude $42^{\circ}.9 - 45^{\circ}.0$ E, grid pitch 0.10 . QGIS Software (<https://qgis.org>)

В выбранный район попадает горная и предгорная территория РСО-Алания, Кабардино-Балкарской республики (КБР), Республики Ингушетия (РИ), с севера – равнинные районы Ставропольского края. В центре исследуемой территории находятся более низкие (до 1000 м) Сунженский и Терский хребты.

На рисунке 1 представлена спутниковая карта исследуемого региона с нанесенными по координатам полигонами, каждому пикселю карты-сцены соответствует центр полигона разрешением 8×10 км. Для каждого полигона вычисляется ряд из 24 значений годовых интегральных характеристик I_n численным интегрированием (методом Симпсона) графика годового изменения индекса NDVI. Для каждой ландшафтной локации проводился корреляционный анализ, проверялась модель линейной регрессии между значениями I_n и временем в виде:

$$I_n = at + b \quad (1)$$

где a – уклон линии тренда, b – у-пересечение (значение I_n в начале периода времени), t – время, в годах (от начала исследуемого периода).

Ввиду малости уклонов трендов значения у-пересечений изменяются в достаточно узком промежутке и примерно могут быть приняты в качестве многолетнего годового среднего значения интегральной характеристики для всего ряда. Далее под у-пересечением I_n подразумевается многолетнее среднее значение I_n .

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 в качестве примера для одной локации вблизи г. Владикавказа (локация обозначается $ndvi_5_17$), приведен график годового хода NDVI за весь период 2000-2023 гг., годовые значения интегральной характеристики I_n , образуют ряд, для которого построен линейный тренд изменчивости за многолетний период.

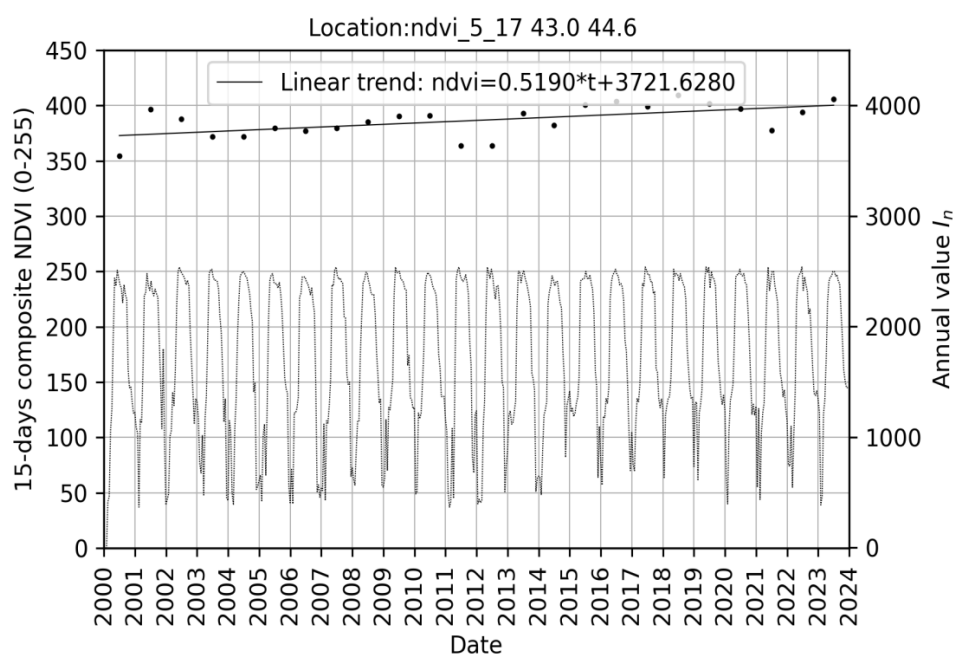


Рис. 2. График NDVI для локации вблизи г. Владикавказа ($ndvi_5_17$) за период 2000-2023 гг. Точечная линия – значения NDVI (отсчет ведется по левой шкале), кружки – значения I_n за год (отсчет ведется по правой шкале), прямая сплошная линия – тренд изменения ряда I_n /

Fig. 2. NDVI plot for locations near Vladikavkaz. ($ndvi_5_17$) for the period 2000-2023. The dotted line represents the NDVI values (calculated on the left scale), the circles represent the I_n values for the year (calculated on the right scale), and the straight solid line represents the trend in the I_n series

Тонкой точечной линией приведен годовой ход осредненных за 15 дней значений NDVI (значения двухнедельных композитов, отсчет ведется по левой шкале), кружками – вычисленные годовые значения интеграла I_n (отсчет ведется по правой шкале, на графике кружки установлены в начале соответствующего года), сплошная линия – построенный по формуле (1) тренд изменчивости интегральной характеристики I_n .

Полученные параметры у-пересечений для всех 308 ландшафтных локаций, образующих 14 рядов по 22 полигона, наносились на карту по соответствующим координатам с использованием геоинформационной системы (ГИС) QGIS (<https://>

qgis.org/), модулями пространственной интерполяции Contour plugin (<https://github.com/ccrook/QGIS-Contour-Plugin>) и приведены на рисунке 3. Насыщенность полигона соответствует значению у-пересечения локации и приводится в цветной выноске карты. Параметр у-пересечение I_n (с учетом малости уклона) характеризует среднее суммарное годовое количество фитомассы локации за многолетний период.

Из рисунка 3 видно, что наибольшие значения интегральной характеристики I_n (насыщенные зеленые полигоны) приходятся на предгорья Северного Кавказа – на северные склоны Лесистого и Пастбищного Хребтов, где преобладают ландшафты широколиственных и смешанных лесов, много наземных крупных и мелких источников водообеспечения и практически не ведется активная хозяйственная деятельность и вырубка леса. Здесь значения I_n находятся в диапазоне 3500–3800. Также, достаточно высокие значения I_n (3200–3500) приходятся на северные склоны Сунженского Хребта.

Минимальные значения I_n (светлые полигоны) приходятся на высокогорные и скалистые участки Главного Кавказского и Бокового хребтов, покрытые ледниками, не имеющие растительности. Относительно низкие значения I_n (2200–2700) на картах проявляются севернее г. Моздока в степных и лесостепных ландшафтах, где также ведется активная сельскохозяйственная деятельность. Промежуточные по параметру I_n локации приходятся на луговые и лесостепные участки равнинной территории РСО-Алания и КБР.

На рисунке 4 представлена пространственная интерполяция в виде изолиний у-пересечений интегральной характеристики многолетних индексов NDVI. Опорные значения у-пересечений I_n подписаны на изолиниях.

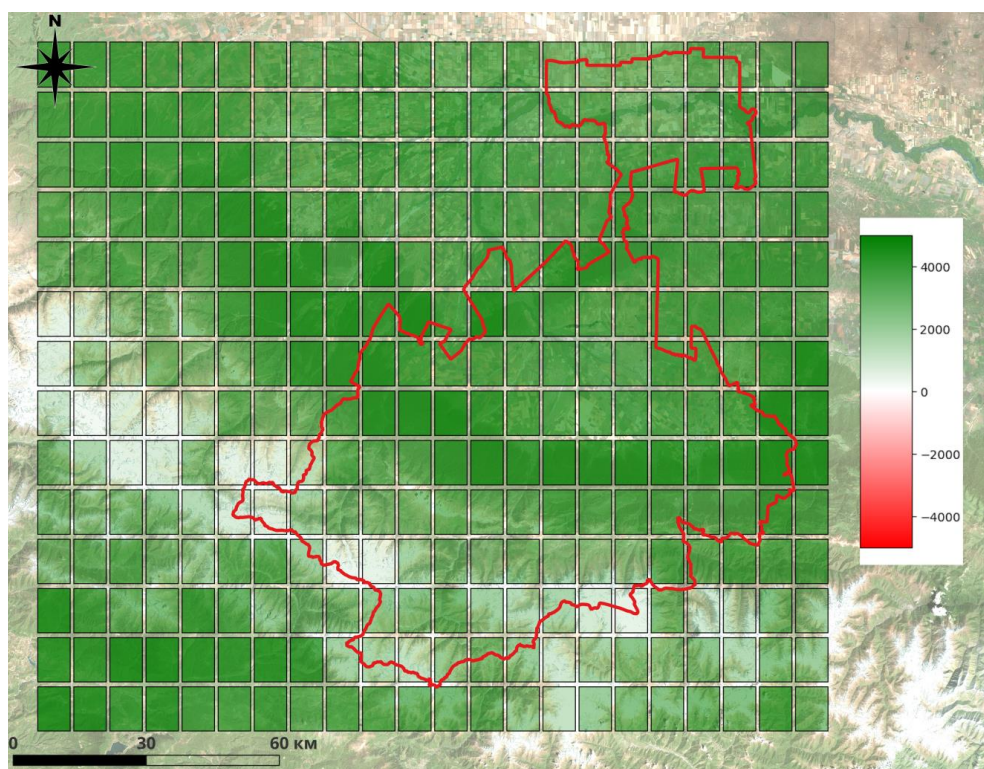


Рис. 3. Значения у-пересечений тренда I_n для изучаемых локаций /

Fig. 3. Values of y-trend intersections I_n for the studied locations

За 24-летний период для исследуемого района средние от годовых интегралов индекса NDVI (у-пересечения трендов) изменяются в пределах от низких значений 415 (для высокогорных локаций) до высоких значений 3944 (для предгорной локации вблизи с. Урух и с. Чикола).

Анализ рисунка 4 показывает, что наибольшая густота линий (которая соответствует наибольшему пространственному градиенту) приходится на границу между Главным и Скалистым хребтами, по границе растительности, а также по границе раздела участков, покрытых лесом и луговым, лесостепным ландшафтом. Изолинии в равнинных, луговых и степных ландшафтах повторяют контуры основных наземных источников водообеспечения. Это указывает на значимое влияние наличия таких наземных источников на величину фитомассы.

Внутри лесных ландшафтов изолинии I_n распределены приблизительно равномерно и в основном повторяют границы лесных массивов вне зависимости от присутствия наземных источников.

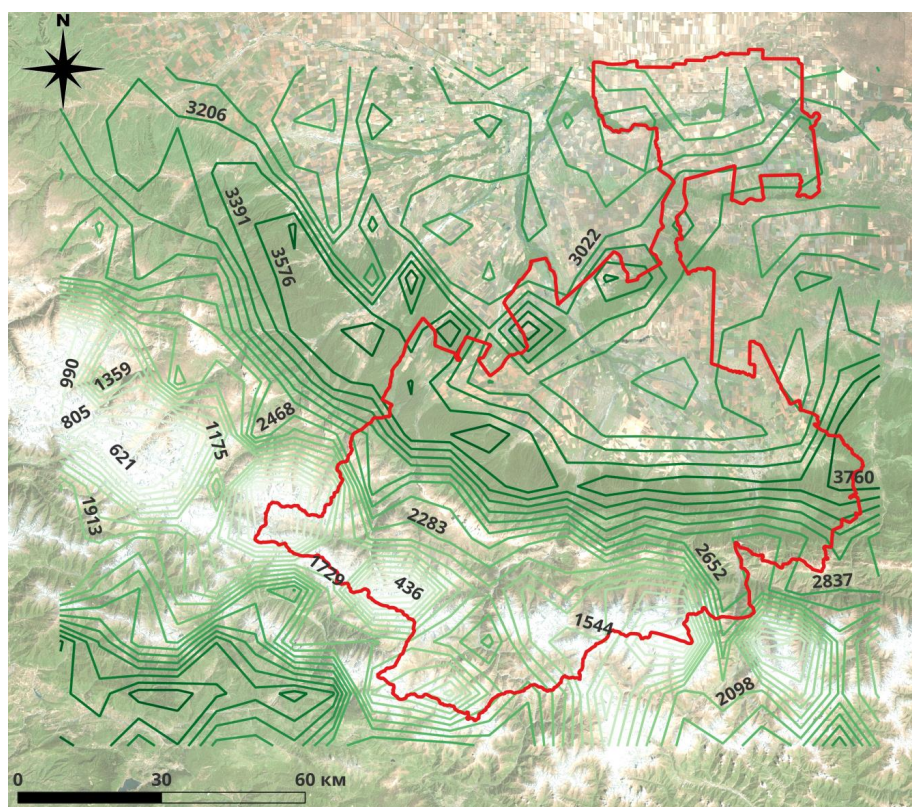


Рис. 4. Пространственная интерполяция у-пересечений трендов I_n в виде несглаженных изолиний /
Fig. 4. Spatial interpolation of y-intersections of I_n trends in the form of non-smoothed isolines

Аналогичным образом проведено картографическое нанесение уклонов трендов интегральной характеристики I_n . На рисунке 5 показана карта значений уклонов трендов I_n , которая характеризует общую многолетнюю тенденцию развития фитомассы в данной локации. Насыщенность полигона соответствует значению уклона тренда в данной локации относительно максимальных и минимальных значений по модулю по сравнению с другими локациями, а цвет показывает положительный или отрицательный знак уклонов, изображенных на карте, шкала приводится в цветной выноске карты.

Из рисунка 5 видно, что положительные тренды, свидетельствующие о суммарном возрастании годовых значений индекса вегетации для ландшафтных локаций, расположены на большей части Лесистого и Пастбищного хребтов. На территории северных склонов Большого Кавказа наибольшее значение уклона тренда I_n (уклон = 0.925–0.945) зафиксировано в локациях Высокогорный Государственный заповедник Верхняя Балкария, Национальный парк Алания, н.п. Бурон. В указанных локациях присутствует лесной ландшафт, покрытие – смешанный и хвойный лес.

Отрицательные уклоны трендов показывают суммарное сокращение индексов вегетации и фиксируются на большей части равнинной территории РСО-Алания – Осетинской наклонной равнины, на южных, имеющих сильную инсоляцию, склонах Терского и Сунженского хребтов.

Наибольшие по модулю отрицательные тренды I_n (отмечены красными полигонами на рис. 5, уклон от -0.287 до -0.414) зафиксированы в локациях Осетинская наклонная равнина и северные склоны Сунженского хребта РСО-Алания в районе н.п. Красногор, н.п. Красный Ход, г. Дигора, ландшафт лесостепной, ведется активная сельскохозяйственная обработка земли; локации на южных склонах Сунженского хребта в районе н.п. Заманкул, Брут, РСО-Алания и н.п. Далаково и Кантышево, РИ; локации на равнинной части РСО-Алания, в районе н.п. Нарт, ст. Архонская, с. Михайловское, ландшафт лесостепной и степной, ведется активная сельскохозяйственная деятельность, дорожные и строительные работы, пастбищное скотоводство.

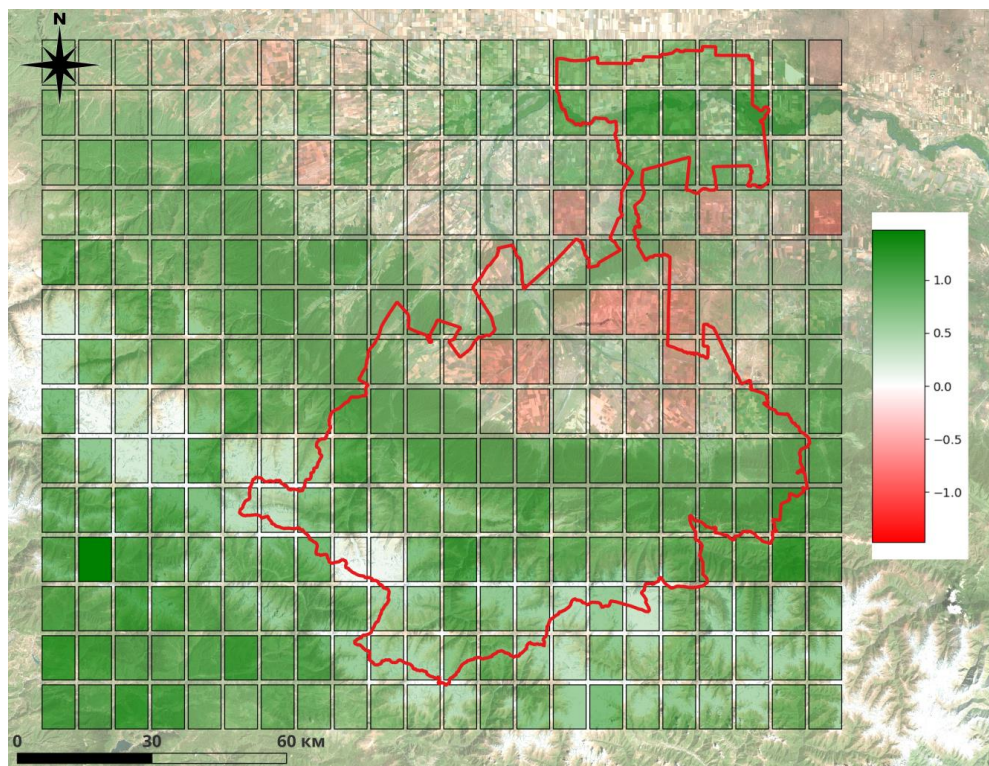


Рис. 5. Пространственное распределение полигонов по значениям уклонов трендов I_n /

Fig. 5. Spatial distribution of polygons according to the values of trend slopes I_n

На рисунке 6 представлена пространственная интерполяция уклонов I_n (опорные значения подписаны на изолиниях), которые изменяются в пределах от -0.592

(для высокогорных локаций) до +1.471 (для равнинных локаций). Околонулевые значения уклонов зафиксированы в некоторых высокогорных и равнинных районах.

Следует отметить, что ряд локаций (РСО-Алания – северо-восточнее г. Беслана, с. Карджин, с. Заманкул, с. Батако, п. Заводской, г. Ардон, с. Красногор) имеют достаточно низкие многолетние средние значения I_n . При наличии наземных источников водообеспечения – русел рек Терек, Ардон в совокупности с отрицательными значениями уклонов тренда это может указывать на активную хозяйственную и строительную деятельность, а также на возможные агроэкологические проблемы в этих локациях (изменение температурного или водного баланса, изменения в составе посевов или деградация растительного покрова).

Наличие таких микрорегионов требует дополнительных исследований в совокупности с учетом трендов температуры, водообеспеченности и дополнительных ирригационных или мелиорационных мероприятий.

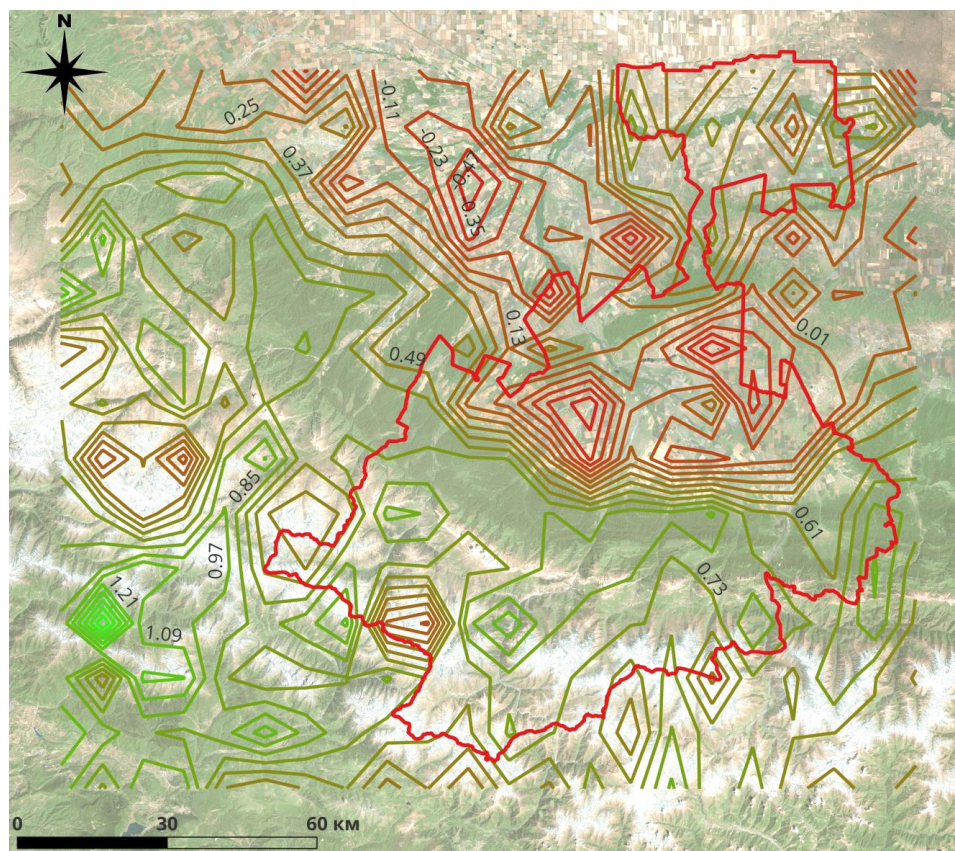


Рис. 6. Пространственное распределение изолиний уклонов многолетних трендов I_n индексов NDVI /
Fig. 6. Spatial distribution of long-term NDVI index trend slopes in the isolines form

Анализ распределения изолиний показывает несколько локализованных групп близлежащих локаций, объединенных общими отрицательными уклонами тренда I_n , в которых фитомасса сокращается наиболее заметно, в основном на равнинной части РСО-Алания, вблизи г. Алагира, г. Дигоры, с. Красногор, с. Мостиздах, ст. Архонская, с. Нарт, с. Дарг-Кох, с. Заманкул, с. Цалык, с. Верхний Курп, КБР, с. Далаково, с. Кантышево, РИ.

Заключение

Климатические изменения сказываются на геоэкологических и агроклиматических показателях территории Северо–Кавказского региона, для которого сельское хозяйство является одной из ведущих отраслей экономики и его устойчивое развитие в значительной мере зависит от климатических условий и их изменчивости.

Интегральная характеристика индекса вегетации учитывает совокупные особенности изменения NDVI в течение года. Многолетние средние I_n по сравнению с другими локациями, указывают на влияние локальных климатических условий на вегетацию растений и долговременные изменения для рассматриваемого ландшафтного региона. Полученные на основе спутниковых данных карты распределения уклонов трендов и у-пересечений позволяют получить быструю оценку условий сельскохозяйственной деятельности и сравнить их для относительно близко расположенных районов с различными ландшафтами со множеством дифференцированных компонентов.

Полученные результаты целесообразно учитывать при планировании мелиоративных мероприятий в этих районах, для использования в геоэкологическом районировании и повышения эффективности природопользования.

Выводы

Для предгорных ландшафтов на территории РСО-Алания и прилегающих районов индекс вегетации имеет высокие значения за счет большой фитомассы лесных массивов и положительный тренд многолетней изменчивости, что свидетельствует о сохранении благоприятных климатических условий.

Для высокогорных районов, покрытых альпийскими лугами или без растительного покрытия, количество фитомассы в целом небольшое, но имеет положительный тренд, что также свидетельствует о благоприятных условиях для фитоценоза.

Для равнинных районов Осетинской наклонной равнины и лесостепных ландшафтов тренды многолетней изменчивости разнонаправлены. В районе г. Дигоры – г. Беслана – с. Заманкул, на южных склонах Сунженского и Терского хребтов имеются участки с многолетним трендом на уменьшение индекса вегетации, что свидетельствует о признаках многолетней деградации растительного покрова ввиду возможного изменения температурного и водного режимов этих локаций. С использованием ГИС QGIS методом интерполяции изолиниями построены карты распределения уклонов трендов NDVI, анализ которых позволяет выявить границы районов с многолетним уменьшением индексов вегетации.

Литература

1. Аджиева А.А., Кондратьева Н.В. Изменение климата и гидрометеорологические явления в горных районах Кавказа. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2009. – Т. 1. № 1. – С. 68–72.
2. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Теунова Н.В. Пространственно-временное изменение климата юга европейской территории России, оценка его последствий, методы и модели адаптации АПК. Нальчик: Печатный двор, 2020. – 476 с.
3. Братков В.В., Кравченко И.В., Туаев Г.А., Атаев З.В., Абдулжалимов А.А. Применение вегетационных индексов для картографирования ландшафтов Большого Кавказа. // Известия ДГПУ. Естественные и точные науки. – 2016. – Т. 10. № 4. – С. 97–111.

4. Каменецкий Е.С., Радионов А.А., Тимченко В.Ю., Панаэтова О.С. Об изменчивости вегетационного индекса NDVI в предгорных районах Северного Кавказа по данным спутниковых измерений. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2021. – Т. 13. № 1(47). – С. 44–52. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-44-52.
5. Керимов И.А., Братков В.В., Бекмурзаева Л.Р. Динамика агроклиматических показателей степных ландшафтов Северного Кавказа по данным наземных наблюдений. // Геология и геофизика Юга России. – 2024а. – Т. 14. № 2. – С. 219–230. DOI: 10.46698/VNC.2024.92.31.017.
6. Керимов И.А., Эльжаев А.С., Додуев А.А. Дистанционный мониторинг лесных территорий (на примере эталонного участка «Рошни-Чу»). // Геология и геофизика Юга России. – 2024б. – Т. 14. № 4. – С. 180–191.
7. Лурье П.М., Панов В.Д. Влияние изменения климата на современное оледенение и сток рек северного склона Большого Кавказа. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2013. – Т. 5. № 2. – С. 70–77.
8. 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. № 2. – С. 82–91. DOI: 10.18470/1992-1098-2023-2-82-91.
9. Родимцев С.А., Павловская Н.Е., Вершинин С.В., Горькова И.В., Гагарина И.Н. Использование вегетативного индекса NDVI для прогноза урожайности зерновых культур. // Вестник Новосибирского государственного университета. – 2022. – № 4. – С. 56–67. DOI: 10.31677/2072-6724-2022-65-4-56-67.
10. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Вегетационные индексы. // Геоматика. – 2011. – № 2. – С. 98–102.
11. Яицкая Н.А., Дзаганя Л.М., Бригада В.С. Геоэкологические опасности в условиях климатических изменений территорий субтропической зоны Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 118–132. DOI: 10.46698/VNC.2023.54.85.010.
12. Abbass K., Qasim M.Z., Song H., Murshed M., Mahmood H., Younis I. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. // Environmental Science and Pollution Research. – 2022. – Vol. 29. – pp. 42539–42559. DOI: 10.1007/s11356-022-19718-6.
13. Aryal J.P., Sapkota T.B., Khurana R., Khatri-Chhetri A., Rahut D.B., Jat M.L. Climate change and agriculture in South Asia: adaptation options in smallholder production systems. // Environment, Development and Sustainability. – 2020. – Vol. 22. – pp. 5045–5075. DOI: 10.1007/s10668-019-00414-4.
14. Asadi M.E. Effects of global climate change on water resources. // Journal of Agricultural Meteorology. – 2005. – Vol. 60. Issue 5. – pp. 637–640. DOI: 10.2480/agrmet.637.
15. Chausson A., Turner B., Seddon D., Chabaneix N., Girardin C.A.J., Kapos V., Key I., Roe D., Smith A., Woroniecki S., Seddon N. Mapping the effectiveness of nature-based solutions for climate change adaptation. // Global Change Biology. – 2020. – Vol. 26. Issue 11. – pp. 6134–6155. DOI: 10.1111/gcb.15310.
16. Esau I., Miles V.V., Davy R., Miles M.W., Kurchatova A. Trends in normalized difference vegetation index (NDVI) associated with urban development in northern West Siberia. // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2016. – Vol. 16. Issue 15. – pp. 9563–9577. DOI: 10.5194/acp-16-9563-2016.
17. Malhi G.S., Kaur M., Kaushik P. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: a review. // Sustainability. – 2021. – Vol. 13. Issue 3. – pp. 1318–1339. DOI: 10.3390/su13031318.
18. Mortier S., Hamedpour A., Bussmann B., Wandji R.Ph.T., Latre S., Sigurdsson B.D. et al. Inferring the relationship between soil temperature and the normalized difference vegetation index with machine learning. // Machine Learning. – 2023. – 31 p. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2024.102730.

19. Skakun S., Vermote E., Roger J-C., Franch B. Combined use of Landsat-8 and Sentinel-2A images for winter crop mapping and winter wheat yield assessment at regional scale. // *AIMS Geosciences*. – 2017. – Vol. 3. Issue 2. – pp. 163–186. DOI: 10.3934/geosci.2017.2.163.

20. Yao Y. Pattern and change of NDVI and their environmental influencing factors for 1986–2019 in the Qinling-Daba Mountains of central China. // *Frontiers in Forests and Global Change*. – 2024. – Vol. 7. Art. No. 1372488. DOI: 10.3389/ffgc.2024.1372488.

References

1. Adzhieva A.A., Kondratieva N.V. Climate change and hydrometeorological phenomena in the mountainous regions of the Caucasus. *Sustainable Development of Mountainous Territories*. 2009. Vol. 1. No. 1. pp. 68–72. (In Russ.)

2. Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Tashilova A.A., Kesheva L.A., Teunova N.V. Spatial and temporal climate change in the south of the European territory of Russia, assessment of its consequences, methods and models of agro-industrial complex adaptation. Nalchik. Pechatnyy dvor. 2020. 476 p. (In Russ.)

3. Bratkov V.V., Kravchenko I.V., Tuaeov G.A., Ataev Z.V., Abdulgalimov A.A. Application of vegetation indexes for mapping landscapes of the Greater Caucasus. *Proceedings of the Dagestan State Pedagogical University. Natural and Exact Sciences*. 2016. Vol. 10. No. 4. pp. 97–111. (In Russ.)

4. Kamenetsky E. S., Radionov A. A., Timchenko V. Yu., Panaetova O. S. On the variability of the NDVI vegetation index in the foothill regions of the North Caucasus according to satellite measurements. *Sustainable Development of Mountainous Territories*. 2021. Vol. 13. No. 1(47). pp. 44–52. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-44-52. (In Russ.)

5. Kerimov I.A., Bratkov V.V., Bekmurzayeva L.R. Dynamics of agro-climatic indicators of steppe landscapes of the North Caucasus according to ground-based observations. *Geology and geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 219–230. DOI: 10.46698/VNC.2024.92.31.017. (In Russ.)

6. Kerimov I.A., Elzhaev A.S., Doduev A.A. Remote monitoring of forest territories (on the example of the reference site “Roshni-Chu”). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 180–191. (In Russ.)

7. Lurie P.M., Panov V.D. The influence of climate change on modern glaciation and river flow in the northern slope of the Greater Caucasus. *Sustainable Development of Mountainous Territories*. 2013. Vol. 5. No. 2. pp. 70–77. (In Russ.)

8. Savinova S.V., Bratkov V.V., Murashova I.D., Klyushin P.V., Huseynova N.O. Assessment of the NDVI change in farmland in the Stavropol Territory 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. DOI: 10.18470/1992-1098-2023-2-82-91. (In Russ.)

9. Rodimtsev S.A., Pavlovskaya N.E., Vershinin S.V., Gorkova I.V., Gagarina I.N. The use of the NDVI vegetative index for predicting grain yields. *Bulletin of Novosibirsk State University*. 2022. No. 4. pp. 56–67. DOI: 10.31677/2072-6724-2022-65-4-56-67. (In Russ.)

10. Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Vegetation indexes. *Geomatica*. 2011. No. 2(11). pp. 98–102. (In Russ.)

11. Yaitskaya N.A., Dzaganina L.M., Brigida V.S. Geoecological hazards in the context of climatic changes in the territories of the subtropical zone of the Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 118–132. DOI: 10.46698/VNC.2023.54.85.010. (In Russ.)

12. Abbass K., Qasim M.Z., Song H., Murshed M., Mahmood H., Younis I. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. pp. 42539–42559. DOI: 10.1007/s11356-022-19718-6.

13. Aryal J.P., Sapkota T.B., Khurana R., Khatri-Chhetri A., Rahut D.B., Jat M.L. Climate change and agriculture in South Asia: adaptation options in smallholder production systems. *Environment, Development and Sustainability*. 2020. Vol. 22. pp. 5045–5075. DOI: 10.1007/s10668-019-00414-4.
14. Asadi M.E. Effects of global climate change on water resources. *Journal of Agricultural Meteorology*. 2005. Vol. 60. Issue 5. pp. 637–640. DOI: 10.2480/agrmet.637.
15. Chausson A., Turner B., Seddon D., Chabaneix N., Girardin C.A.J., Kapos V., Key I., Roe D., Smith A., Woroniecki S., Seddon N. Mapping the effectiveness of nature-based solutions for climate change adaptation. *Global Change Biology*. 2020. Vol. 26. Issue 11. pp. 6134–6155. DOI: 10.1111/gcb.15310.
16. Esau I., Miles V.V., Davy R., Miles M.W., Kurchatova A. Trends in normalized difference vegetation index (NDVI) associated with urban development in northern West Siberia. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2016. Vol. 16. Issue 15. pp. 9563–9577. DOI: 10.5194/acp-16-9563-2016.
17. Malhi G.S., Kaur M., Kaushik P. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: a review. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Issue 3. pp. 1318–1339. DOI: 10.3390/su13031318.
18. Mortier S., Hamedpour A., Bussmann B., Wandji R.Ph.T., Latre S., Sigurdsson B.D. et al. Inferring the relationship between soil temperature and the normalized difference vegetation index with machine learning. *Machine Learning*. 2023. 31 p. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2024.102730.
19. Skakun S., Vermote E., Roger J-C., Franch B. Combined use of Landsat-8 and Sentinel-2A images for winter crop mapping and winter wheat yield assessment at regional scale. *AIMS Geosciences*. 2017. Vol. 3. Issue 2. pp. 163–186. DOI: 10.3934/geosci.2017.2.163.
20. Yao Y. Pattern and change of NDVI and their environmental influencing factors for 1986–2019 in the Qinling-Daba Mountains of central China. *Frontiers in Forests and Global Change*. 2024. Vol. 7. Art. No. 1372488. DOI: 10.3389/ffgc.2024.1372488.