

Анатолий Анатольевич Радионов

Южный математический институт ВНЦ РАН (ЮМИ ВНЦ РАН), научный сотрудник лаборатории математического моделирования, кандидат технических наук, Россия, РСО-А, Владикавказ; e-mail: aar200772@mail.ru

Василий Юрьевич Тимченко

ЮМИ ВНЦ РАН, соискатель лаборатории математического моделирования, Россия, РСО-А, Владикавказ; e-mail: timchenko.vasily@mail.ru

Ольга Софокловна Панаэтова

ЮМИ ВНЦ РАН, аспирант лаборатории математического моделирования, ВРоссия, РСО-А, Владикавказ

Давид Григорьевич Минасян

ЮМИ ВНЦ РАН, научный сотрудник лаборатории математического моделирования, кандидат технических наук, Россия, РСО-А, Владикавказ; e-mail: davidmd@yandex.ru

Изменчивость вегетационного индекса NDVI для равнинных районов предгорий Северного Кавказа в зависимости от водообеспеченности

Аннотация. В работе исследуется изменчивость вегетационного индекса NDVI для равнинных и степных районов РСО-А в зависимости от водообеспеченности, анализируются тренды индекса NDVI и атмосферных осадков на основе метода интегральной характеристики. По данным спутниковых измерений MODIS вычислены статистические коэффициенты линейной регрессии метеорологических параметров. Показаны различия в характере изменения индекса, зависящие от присутствия водных источников, количества атмосферных осадков и температуры по данным моделей реанализа MERRA.

Ключевые слова: вегетационный индекс NDVI, равнинные и степные территории, климатические изменения, статистический анализ.

Anatoly A. Radionoff

SMI VSC RAS, Department of Mathematical Modeling, Researcher, PhD, Russia, RNO-A, Vladikavkaz e-mail: aar200772@mail.ru

Vasily Yu. Timchenko

SMI VSC RAS, Department of Mathematical Modeling, graduate student, Russia, RNO-A, Vladikavkaz e-mail: timchenko.vasily@mail.ru

Olga S. Panaetova

SMI VSC RAS, Department of Mathematical Modeling, graduate student, Russia, RNO-A, Vladikavkaz

David G. Minasian

SMI VSC RAS, Department of Mathematical Modeling, Researcher, PhD, Russia, RNO-A, Vladikavkaz e-mail: davidmd@yandex.ru

Variability of NDVI vegetation index for lowland areas of North Caucasus foothills depending on water supply

Abstract. The paper examines the variability of the NDVI vegetation index for the lowland and steppe regions of the North Ossetia-Alania depending on water supply, analyzes the trends of the NDVI index and atmospheric precipitation based on the integral characteristic method. Statistical coefficients of linear regression of meteorological parameters were calculated from MODIS satellite measurements. The differences in the nature of changes in the index, depending on the presence of water sources, the amount of precipitation and temperature according to the MERRA sis models are shown.

Keywords: NDVI vegetation index, lowland and steppe areas, climatic changes, statistical analysis.

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающие в настоящее время климатические флуктуации и их долгосрочные последствия диктуют необходимость определения и прогнозирования долговременных изменений основных метеорологических параметров для территории РФ, и в частности Северного Кавказа.

В соответствии с оценочным докладом Росгидромета [1], среднегодовая аномалия температуры

воздуха, в сравнении со средними показателями за 1961–1990 годы, составила +1,35 °С. Осредненная по территории России аномалия температуры составила +2,00 °С, что на 0,15 °С выше предыдущего максимума лета 2016 года, и почти на 0,4 °С выше, чем летом 2010 года. Потепление продолжалось по всей России в целом за 2021 год и во все сезоны.

Климатические изменения оказывают непосредственное влияние на состоянии растительного покрова, вегетацию и продуктивность сельскохозяй-

зяйственных культур, а также на возрастание экологических рисков [2–4]. Для исследования и общей оценки состояния растительного покрова и фотосинтетически активной биомассы широко используется нормализованный относительный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), обычно называемый вегетационным индексом NDVI, который может быть рассчитан по данным дистанционного зондирования Земли на основе космических снимков с ИСЗ [5–7].

Оценка экологических рисков, а также оценка запасов фитомассы и урожайности сельхозкультур (для земель сельскохозяйственного назначения) строятся на основе множества факторов, таких как: количество осадков, средняя и максимальная температура воздуха и почвы, водообеспеченность и объем стока рек, загрязнение почв и воды, уровень инсоляции и других [8–9].

Например, в работе [10] показано, что эвотранспирация несхоженного травяного покрова может моделироваться различными эмпирическими соотношениями, но в основном зависит от потока получаемой энергии при условии хорошей водообеспеченности. Здесь под травяным покровом понимаются все травянистые сельхозкультуры, для которых проводились прямые измерения.

Проведенные исследования [11] позволили выявить положительную корреляционную зависимость между показателем вегетационного индекса (NDVI) и продуктивностью для пустынных экосистем. Проведена оценка разнообразия и анализа продуктивности пастбищной растительности (заповедный режим, охранный и выпасной) различных типов природных экосистем региона Черные Земли, включающие участки в Государственном природном биосферном заповеднике (ГПБЗ) «Черные Земли».

В работе [12] приводятся результаты расчета NDVI для ландшафтов заказника «Байдарский» и Севастопольского региона. Определен индекс NDVI для селитебных комплексов, дубовых и буковых лесов на склонах средней крутизны. На основе анализа NDVI и запасов наземной фитомассы определены участки угнетенной растительности для модельного заказника. Они расположены на сельскохозяйственных угодьях, местах пожаров и редколесий. Также доказана ведущая средообразующая роль растительности заказника «Байдарский» при формировании геоэкологической ситуации в городе Севастополе.

В исследовании [13] были проанализированы зависимости межгодовой и внутригодовой динамики условий вегетации от гидротермического фактора для центральной части Карагандинской области. Были сопоставлены ряды NDVI и осадков, NDVI и температур и вычислены линейные корреляционные коэффициенты уравнений линейной регрессии между рядами. Для оценки надежности коэффициента корреляции применялся критерий Фишера. В 16-летнем цикле выявлена тесная положительная корреляционная связь между усредненными NDVI за вегетационный период и суммами осадков.

Вторым важнейшим фактором, обуславливающим межгодовую динамику условий вегетации в аридных регионах, является фактор осадков. Отмечается тесная зависимость между величиной межгодовой вариативности осадков и степенью их влияния на динамику растительного покрова. Также отмечается сильное влияние осадков, выпавших в предыдущие 2–4 года, на текущие условия вегетации. Увеличение коэффициента корреляции, рассчитанного между рядами аккумулированных осадков и рядами NDVI, служит сигналом того, что осадки предыдущих лет оказывают влияние на текущую динамику растительного покрова.

В работе [14] исследованы пространственно-временные особенности изменений NDVI для территории Беларуси в текущем столетии и установлена их связь с изменениями климата. Вегетационный индекс территорий сельскохозяйственного назначения преимущественно понижается. Главным фактором межгодовой изменчивости биопродуктивности земель сельскохозяйственного назначения является количество осадков в вегетационный период, определяющее свыше 60 % дисперсии осадков и NDVI. Долгопериодные изменения NDVI объясняются сочетанием усиливающего фотосинтез действия углекислого газа и угнетающего растительность потепления воздуха при практически неизменном количестве осадков. При сохранении наблюдаемых климатических тенденций биопродуктивность сельскохозяйственных земель во многих регионах Беларуси к середине текущего столетия может снизиться более чем на 20 % по сравнению с 2000 годом. Видно, что на территории Беларуси главным фактором изменчивости NDVI является количество осадков. Наиболее тесная корреляция между NDVI и количеством осадков характерна для территорий, отведенных под пашни и сельскохозяйственные угодья. На большей части сельскохозяйственных земель коэффициент корреляции между NDVI и количеством осадков превышает 0.8, т. е. количеством осадков на этих территориях определяется свыше 60 % межгодовой изменчивости надземной биомассы.

В работе [15] исследуется временная изменчивость вегетационного индекса NDVI для предгорных равнинных районов Юга России, а также анализируются тренды индекса NDVI на основе интегральной характеристики. Показана изменчивость вегетационного индекса NDVI в горных и предгорных районах РСО-А и вычислены тренды интегральной характеристики индекса NDVI. В работе [16] для анализа сезонной и многолетней изменчивости нормализованного относительного вегетационного индекса NDVI используются данные многоканальных спутнорадометров MODIS с разрешением 10×10 км за 20-летний период времени. Нисходящий тренд индекса NDVI [17] связан с изменением во времени уровня увлажненности почв, учитывая в основном нисходящие тренды количества осадков. Показано, что наклон тренда

интегральной характеристики NDVI увеличивается на 5...15 % с увеличением удаленности от горного хребта. Тренды температуры для всех рассмотренных локаций восходящие, при этом максимальная температура в летний период времени заметно не увеличивается. Тренд интегральной характеристики для количества осадков в основном нисходящий, конкретные значения имеют довольно большой разброс. Количество осадков уменьшается с удалением от горных хребтов.

В настоящей работе показана зависимость многолетних трендов NDVI для необрабатываемых участков степных территорий Северного Кавказа и земель сельскохозяйственного назначения от наличия наземных водных источников в условиях возрастающего многолетнего тренда температуры и уменьшения количества атмосферных осадков.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для выявления особенностей многолетней изменчивости NDVI на территории южных районов РФ за период 2003–2021 гг. проводится анализ годового хода значений NDVI. В этот период в измерительных данных не имеется значительных пропусков.

Для исследования был выбран равнинный район, который находится в лесостепной зоне севернее г. Моздока, РСО-А, и г. Прохладного, Кабардино-Балкарская Республика, восточнее г. Зеленокумска, КБР, южнее г. Буденновска: Левокумское, Нефтекумск, Прасковее и западнее – Ачикулак Ставропольского края. Рельеф местности представляет собой слабохолмистую равнину со степным и лесостепным ландшафтом (так называемые «буруны»), включающую земли сельскохозяйственного назначения (пастбища и селхозугодия травянистых культур). Означенный район в период 2010–2021 гг. регулярно имел аномальные и опасные значения температуры, свыше 35° при небольшом количестве осадков. По западному и северному периметрам протекает р. Кума, в центральной части – р. Горькая Балка. По южному периметру через ряд населенных пунктов протекает р. Кура, также расположены Курское и Ростовское водохранилища. Высота территории района составляет около 150 метров над уровнем моря, а отдельные позиции расположены на высоте от 29 до 215 метров.

Координаты района: между 43°54'00" – 44°45'00" с. ш., 44°00'00" – 45°06'00" в. д. (или 43°,9 – 44°,7 с. ш., 44°,0 – 45°,10 в.д.) шаг сетки 0°, 20.

В пределах выбранного района выделялось 30 географических локаций, расположенных на равных расстояниях друг от друга. Этим локациям соответствовали точки на серии снимков с ИСЗ, из которых определяется величина NDVI для данной локации.

С учетом разрешающей способности использованных спутниковых данных и моделей реанализа, среднее расстояние между локациями по прямоугольной топографической сетке составляло 20 км.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве источника информации о пространственном и временном распределении вегетационного индекса NDVI использованы спутниковые данные многоканальных спектрорадиометров MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, <http://modis.gsfc.nasa.gov>), установленных на космических аппаратах EOS Terra и Aqua [<https://terra.nasa.gov>]. Результаты обработки получаемых спектральных снимков размещаются Американским аэрокосмическим агентством NASA в открытом доступе. На сайте NASA Earth Observations [<https://neo.sci.gsfc.nasa.gov>] доступны снимки распределения вегетационного индекса NDVI по всей поверхности Земного шара.

Массив осредненных за 16 суток значений NDVI, представленный в виде совокупности пикселей, связанных к поверхности Земли, образует карту-сцену в виде единого изображения. Все изображения карт-сцен нормированы в едином размере 3600x1800 пикселей, угловой размер 1 пикселя равен 0.1 x 0.1 градус с пространственным разрешением пикселя в надире порядка 10 x 10 км. Такие данные называются двухнедельным композитом.

Принимая во внимание достаточно грубое разрешение, отметим, что оно является скорректированным и усредненным представлением индекса на основании верифицированных алгоритмов (так называемый продукт Level 2), что позволяет рассматривать общие для исследуемого района закономерности без учета влияния погодных условий и особенностей орографии, в том числе микромасштабного и антропогенного влияния.

Ряды ежедневных данных температуры на высоте 2 м над поверхностью (сухой столб) и скорректированного суммарного суточного количества осадков получены с информационного портала NASA (онлайн-сервис POWER Data Access Viewer, <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>) и представляют собой ассимилированную климатическую модель MERRA-2 (NASA's Goddard Earth Observing System (GEOS) – Data Assimilation System Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications, <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>), базирующуюся на измерениях ближайших наземных пространственно-разнесенных метеостанций, спутниковых наблюдениях и данных моделирования.

Доступ осуществлялся посредством функций библиотеки netCDF4 (<https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>) для каждой выбранной на основании координат локации, для которой за период с 01.01.2003 по 31.12.2021 г. строился временной ряд ежедневных значений температуры и количества осадков. Кроме того, в работах [10–12] подробно описывались источники получения спутниковых данных, находящихся в открытом доступе и некоторые методики их обработки.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

По каждому из отобранных за период с 01.01.2003 по 31.12.2021 г. изображений карт-сцен для индекса вегетации NDVI по географическим координатам каждой локации с использованием специализированной библиотеки PILLOW (<https://python-pillow.org>) выбирался одиночный пиксель 16-дневного композита, соответствующий исследуемому региону за рассматриваемый период. Яркость пикселя в диапазоне от 0 до 255 соответствует значению вегетационного индекса. Получаемые с сайта NASA значения NDVI обрабатываются и используются в исходном виде.

Значение индекса вегетации принято измерять от -1 до 1. Для возможной интерпретации при необходимости значения NDVI нормируются по формуле: $(NDVI - 127) / 128$.

В результате обработки совокупности снимков получаются временные ряды вегетационного индекса NDVI для выбранных локаций за период исследования, которые являются пространственно-осредненными в результате обработки по стандартным алгоритмам MODIS и привязанными к конкретной позиции, а также характеризуются гладкостью и отсутствием разрывов в изучаемый период, т. е. 16-дневные композиты являются осредненными.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Для анализа многолетней изменчивости и выявления трендов каждого ряда исследуемых параметров (индекса NDVI по данным NASA, количества осадков и температура согласно модели реанализа MERRA-2) используется интегральная характеристика для каждого ряда. Для каждой выбранной географической локации вычислялась интегральная характеристика I_n кривой годового хода, получаемая численным интегрированием ряда значений параметра за этот год методом Симпсона (входящим в библиотеку Scipy, <https://scipy.org>), и таким образом для каждой локации получен ряд годовых значений I_n каждого параметра.

Для описания многолетних трендов проверялась модель линейной регрессии между значениями интегральной характеристики исследуемого параметра и временем, для чего методом наименьших квадратов (входящим в библиотеку Numpy, <https://numpy.org>) по полиному 1 порядка определялись коэффициенты линии тренда для каждого исследуемого ряда.

Для выявления долговременной изменчивости строилась статистическая гипотеза линейной зависимости изменения I_n от времени в виде:

$$I_n = a \cdot t + b, \quad (1)$$

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

По своему смыслу коэффициенты линии тренда: у-пересечение – пересечение линии тренда с осью ординат, определяющее начальное значение; уклон

– тангенс угла наклона прямой тренда.

Тренд интегральных характеристик I_n вычисляется за период 2003–2021 гг., соответственно каждый ряд состоит из 19 значений.

Гипотеза (1) проверялась для каждого из трех рядов данных: индекс NDVI, температура на высоте 2 м, количество осадков, как в работах [16, 17].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для каждой из 30 локаций (таблица 1) получены ряды значений индекса NDVI по данным MODIS, вычислен ряд годовых интегральных характеристик I_n и построены тренды этих многолетних рядов.

Для каждой локации получены значения статистических параметров: у-пересечение линии тренда (начальное значение графика тренда) и уклон линии тренда (определяющий тенденции изменения параметра).

Пример графика хода индекса NDVI (MODIS), тренда и коэффициентов уравнения для линейной гипотезы для одной позиции $ndvi_1_1$ с координатами $44^\circ, 1$ с. ш. и $44^\circ, 2$ в. д. приведены на рис. 1.

На основании данных модели реанализа MERRA обрабатывались данные по скорректированному суточному количеству осадков и по средней температуре на высоте 2 метра, полученные из открытого источника NASA (рис. 2 и 3)

ОБСУЖДЕНИЕ

Для географического районирования и классификации климата регионов Будыко и соавторами [18, 19] применялся метод суммы температур, превышающих 10°C за год, по которому находилась регрессия с другими метеопараметрами. Интегральная характеристика в данной работе, в применении к индексу вегетации, температуре и количеству осадков, является аналогом подобного метода, а с использованием библиотечных функций программного обеспечения интегральную характеристику можно применять для рядов данных с пробелами и разрывами.

Годовой ход климатического параметра (температуры, количества осадков, индекса вегетации) описывает скорость роста по сезонам, длительность высоких значений, появление дополнительных периодов вегетации, т. е. развитие фитомассы в рамках одного конкретного годового отрезка.

Интегральная характеристика индекса вегетации I_n учитывает совокупные особенности развития NDVI в течение года. Тенденции, выявленные в изменчивости I_n , по сравнению с другими периодами могут указывать на изменение локальных климатических условий для вегетации растений, направление их долговременных изменений для рассматриваемого ландшафтного региона.

Годовой ход количества осадков обосновывает предпосылки появления дополнительных периодов вегетации (особенно повторная вегетация на сель-

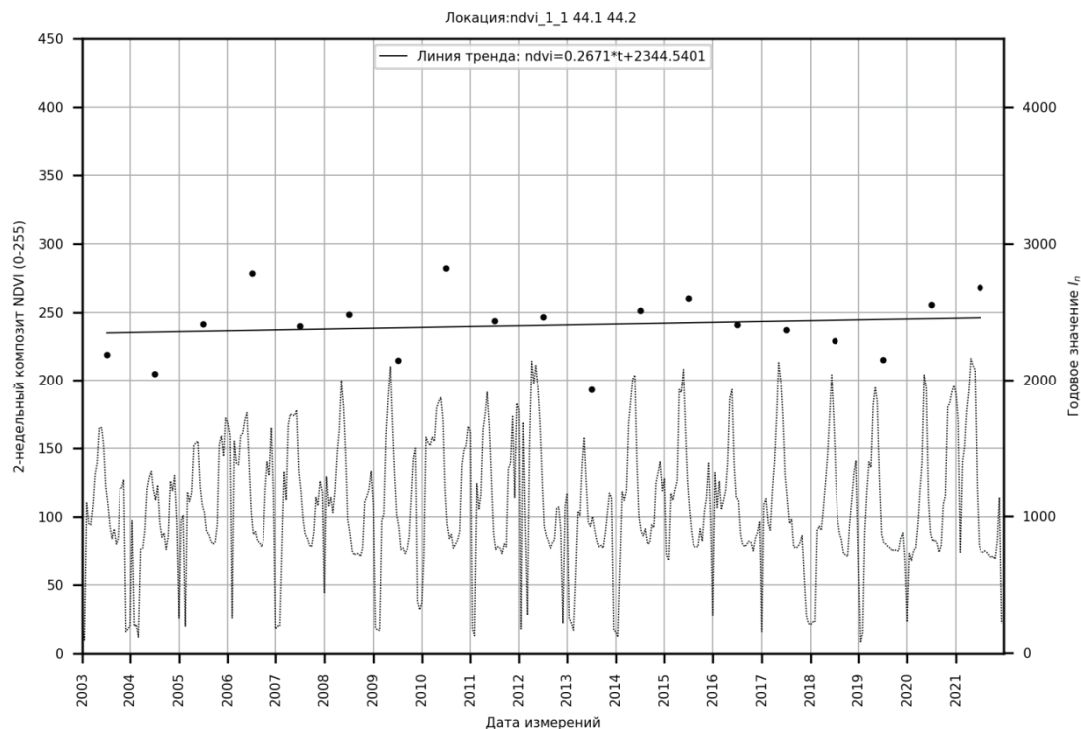


Рис. 1. Двухнедельный композит индекса вегетации NDVI для локации *ndvi_1_1* и значение его интегральной характеристики (правая шкала)

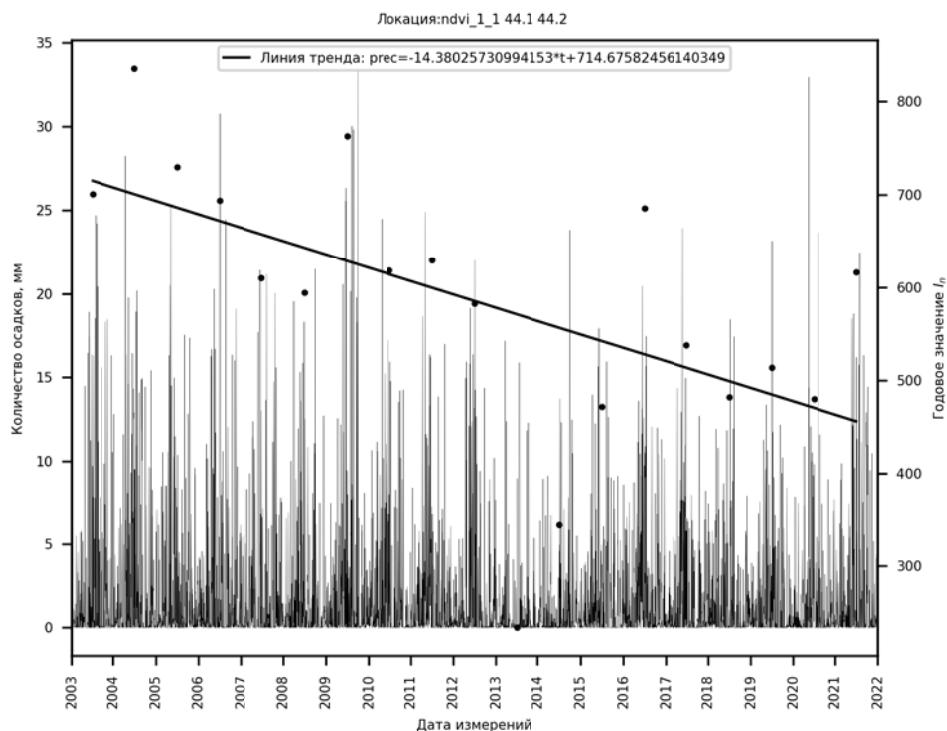


Рис. 2. Годовой ход и значения интегральной характеристики количества осадков, линейный тренд его изменчивости для локации *ndvi_1_1*

скохозйственных угодьях после сбора основного урожая) или изменение основного времени роста и развития фитомассы в большую или меньшую сторону. Ряды количества осадков носят вероятност-

ный характер и не имеют непрерывный характер, что затрудняет их анализ.

Интегральная характеристика количества осадков показывает общее (накопленное) количество

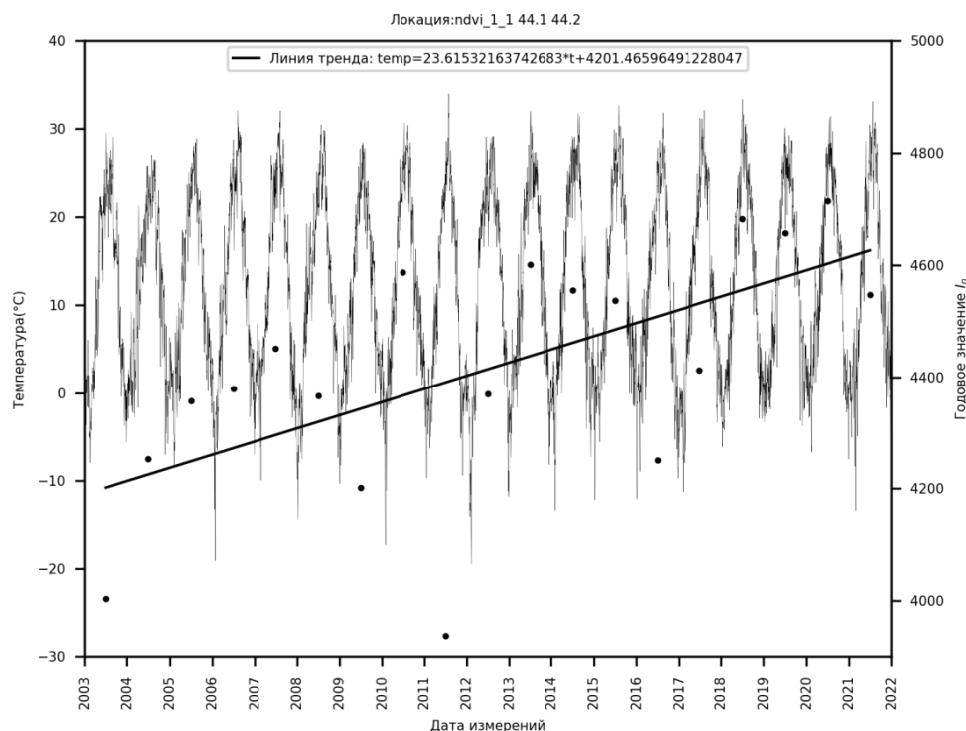


Рис. 3. Годовой ход и значения интегральной характеристики температуры на высоте 2 м, линейный тренд его изменчивости для локации *ndvi_1_1*

осадков, полученных из данных модели реанализа MERRA-2 за год, что косвенно входит в характеристику водообеспеченности, в том числе характеризует засушливость конкретного годового отрезка по сравнению с другими годами. Кроме того, изменчивость интегральной характеристики количества осадков (модельного параметра MERRA-2) указывает на долговременные мезомасштабные климатические изменения данного региона.

Годовой ход суточной температуры на высоте 2 метра над поверхностью согласно данным модели MERRA-2 в течение года также косвенно характеризует интенсивность испарения влаги с поверхности почвы и транспирацию влаги от растений, в совокупности с осадками – наличия дополнительных периодов вегетации, что входит в характеристику водообеспеченности [10].

Интегральная характеристика температуры дает длительность общего благоприятного для развития и сохранения фитомассы периода (от установления средних положительных температур начала вегетации до окончания вегетации), или изменение основного времени роста и развития фитомассы в большую или меньшую сторону.

Многолетние изменения интегральной характеристики (вычисляемые стандартными средствами интегрирования пакетов прикладных программ) позволяют не задействовать расчет многолетнего среднего для данной позиции (как суммы значений параметра за период, отнесенного к продолжительности самого периода) с последующим вычислением вариации индекса для каждого года, а сразу

построить тренд, что оптимизирует последующий анализ, дает быструю оценку эффективности сельскохозяйственной деятельности, сравнение условий для относительно близко расположенных районов.

Проанализированные локации разделились по знаку наклона тренда NDVI на 3 группы – локации с положительным уклоном тренда (5 позиций: *ndvi_0_2*, *ndvi_0_3*, *ndvi_0_4*, *ndvi_1_1*, *ndvi_3_5*), локации с отрицательным уклоном тренда (15 позиций: *ndvi_0_1*, *ndvi_1_2*, *ndvi_1_3*, *ndvi_1_4*, *ndvi_2_0*, *ndvi_2_3*, *ndvi_3_0*, *ndvi_3_1*, *ndvi_3_2*, *ndvi_3_3*, *ndvi_3_4*, *ndvi_4_0*, *ndvi_4_1*, *ndvi_4_3*, *ndvi_4_4*) и локации с нейтральным трендом, т. е. малым по модулю углом наклона тренда положительного и отрицательного знака (10 локаций – остальные).

Для выявления возможных факторов, оказавших влияние на изменчивость вегетационного индекса, из таблицы 1 были отобраны и проанализированы те локации, для которых уклон тренда имел значимую величину (модуль углового коэффициента a , по значению > 0.1). Для данных локаций сопоставлялись значения трендов осадков, температуры и наличие наземных водных источников.

Для локаций, для которых углы уклона тренда имели положительное значение, многолетние значения интегральной характеристики индекса NDVI преимущественно росли, что свидетельствовало о долговременном суммарном увеличении индекса NDVI и, следовательно, об увеличении и длительном сохранении количества фитомассы, увеличении совокупного времени ее вегетации, вторичной вегетации в период осадков и т. п.

Таблица 1

Статистические параметры трендов годовых интегральных характеристик I_n индекса вегетации NDVI для различных локаций				
Позиция	Широта	Долгота	уклон тренда	у-пересечение
ndvi_0_0	43°,9	44°,0	-0.03	2677
ndvi_0_1	43°,9	44°,2	-0.20	2513
ndvi_0_2	43°,9	44°,4	0.70	2360
ndvi_0_3	43°,9	44°,6	0.53	2512
ndvi_0_4	43°,9	44°,8	0.14	2646
ndvi_0_5	43°,9	45°,0	-0.02	2674
ndvi_1_0	44°,1	44°,0	0.04	2685
ndvi_1_1	44°,1	44°,2	0.27	2344
ndvi_1_2	44°,1	44°,4	-0.41	2605
ndvi_1_3	44°,1	44°,6	-0.39	2675
ndvi_1_4	44°,1	44°,8	-0.14	2826
ndvi_1_5	44°,1	45°,0	0.07	2550
ndvi_2_0	44°,3	44°,0	-0.45	2790
ndvi_2_1	44°,3	44°,2	-0.04	2504
ndvi_2_2	44°,3	44°,4	0.02	2420
ndvi_2_3	44°,3	44°,6	-0.16	2645
ndvi_2_4	44°,3	44°,8	-0.03	2395
ndvi_2_5	44°,3	45°,0	0.051	2405
ndvi_3_0	44°,5	44°,0	-0.46	2838
ndvi_3_1	44°,5	44°,2	-0.47	2395
ndvi_3_2	44°,5	44°,4	-0.53	2590
ndvi_3_3	44°,5	44°,6	-0.55	2425
ndvi_3_4	44°,5	44°,8	-0.43	2550
ndvi_3_5	44°,5	45°,0	0.25	2584
ndvi_4_0	44°,7	44°,0	-0.25	2672
ndvi_4_1	44°,7	44°,2	-0.45	2491
ndvi_4_2	44°,7	44°,4	0.56	2169
ndvi_4_3	44°,7	44°,6	-0.27	2295
ndvi_4_4	44°,7	44°,8	-0.335	2589
ndvi_4_5	44°,7	45°,0	-0.05	2733

Для позиций, для которых углы уклона тренда имели существенное отрицательное значение, многолетние значения интегральной характеристики индекса NDVI преимущественно уменьшались, что свидетельствует о долговременном суммарном уменьшении индекса NDVI и, следовательно, об уменьшении фитомассы вследствие разных причин, сокращении совокупного времени вегетации.

При детальном картографическом изучении выяснено, что тренды со значимым положительным уклоном приходятся на локации, в которых имеются источники неатмосферного водообеспечения – водоемы, реки или действующая система мелиорации (оросительные каналы и другие мелиоративные сооружения или объекты).

Тренды со значимым отрицательным уклоном приходятся на локации, в которых присутствует степной или аридный ландшафт («буруны») и отсутствуют неатмосферные источники водообеспечения, а также на участки, не используемые в сельскохозяйственных целях.

Также для отобранных позиций рассчитаны статистические коэффициенты трендов интегральных характеристик температуры и атмосферных осадков по данным, полученным с использованием онлайн-сервиса POWER Data Access Viewer.

На рис. 2 в качестве примера представлен годовой ход количества осадков для позиции ndvi_1_1, а на рис. 3 – график многолетнего хода температуры, с соответствующими трендами и их статистическими характеристиками.

Таблица 2

Статистические параметры годовых интегральных характеристик количества осадков и вегетационного индекса NDVI для выделенных локаций							
Позиция	Широта	Долгота	Уклон тренда осадков	у-пересечение тренда осадков	Уклон тренда NDVI	у-пересечение тренда NDVI	
ndvi 0 2	43° 9	44° 4	-14,38	714	0.70	2360	
ndvi 0 3	43° 9	44° 6	-14,38	714	0.53	2512	
ndvi 0 4	43° 9	44° 8	-13,94	662	0.14	2646	
ndvi 1 1	44° 1	44° 2	-14,38	715	0.27	2344	
ndvi 2 5	44° 3	45° 0	-12,48	777	0.051	2405	
ndvi 4 2	44° 7	44° 4	-8,799	541	0.56	2169	
ndvi 0 0	43° 9	44° 0	-11,27	687	-0.03	2677	
ndvi 0 5	43° 9	45° 0	-13,94	662	-0.02	2674	
ndvi 4 0	44° 7	44° 0	-8,37	561	-0.25	2672	
ndvi 4 5	44° 7	45° 0	-10,65	523	-0.05	2733	
ndvi 3 3	44° 5	44° 6	-8,80	541	-0.55	2425	

Выяснено, что для всех 30 локаций по имеющимся данным модели реанализа MERRA-2 тренды интегральной характеристики температуры имеют положительный уклон, что указывает на увеличение периода положительных температур и рост их по величине для всего исследуемого района. Это может свидетельствовать о долговременном многолетнем тренде на сохранение высокой температуры в указанном локальном ландшафтном районе, о чем ранее отмечалось в работе [16]. Данный район характеризуется степным ландшафтом с отдельными аридными участками, местами малопригодными для сельскохозяйственного использования.

Разнонаправленность трендов выделенных локаций и большой разброс значений вычисленной интегральной характеристики осадков может свидетельствовать о вероятностном характере суммарного объема выпадающих осадков в данной локации и о зависимости скорее от состояния атмосферы, чем от местных условий, а также о слабом влиянии на рост или спад интегральной характеристики индекса вегетации, являющегося характеристикой совокупного состояния фитомассы.

Вместе с тем взаимно однозначной зависимости знаков трендов температуры с увеличением или уменьшением угла уклона тренда годовой интегральной характеристики индексов NDVI не зафиксировано, т. к. для всех локаций тренды температуры возрастающие.

Учитывая локальность района, отсутствие географических препятствий, способных вносить искажения в равномерность осадков и температуры и, как следствие, – в неразрывность интерполяции данных реанализа, для определения возможной зависимости между уклоном тренда вегетационного индекса NDVI и уклоном тренда количества осадков по данным модели реанализа MERRA-2 отобраны 11 локаций – 5 локаций с зафиксированными источниками открытой воды, для которых тренд NDVI растущий, 5 позиций по краям исследуемого района и центральная локация.

В таблице 2 приведены статистические коэффициенты годовых интегральных характеристик количества осадков и вегетационного индекса NDVI для 11 выделенных локаций.

При рассмотрении трендов количества осадков однозначной взаимосвязи знаков уклонов со знаками уклонов трендов годовой интегральной характеристики индексов NDVI также не зафиксировано. По таблице 2 для отобранных локаций коэффициент корреляции между начальными значениями (у-пересечениями) трендов количества осадков (5-й столбец) и трендов вегетационного индекса (7-й столбец) составил – 0.12, т. е. слабую отрицательную корреляцию.

Для описанных выше 5 локаций с положительным трендом годовой интегральной характеристики индекса NDVI, соответствующим локациям с наличием источников открытой воды, наблюдается совпадение знака уклона тренда осадков со знаком

уклона тренда индекса вегетации; для 15 локаций знаки трендов NDVI и количества осадков противоположны (таблица 1); остальные локации имеют малые по абсолютной величине значения статистических параметров (< 0.1).

Годовой ход осадков показывает, что выпадение атмосферной влаги и ее объем носит скорее вероятностный характер в течение года, при наличии испарения, грунтового стока и транспирации растений оно является частью локального влаго- и водообмена. Наличие же постоянных местных наземных источников водных ресурсов при сохранении других благоприятных факторов (температуры, инсоляции) является одной из причин долговременных трендов увеличения фитомассы и, как следствие, вегетационных индексов.

В работах других авторов для похожих ландшафтных и климатических территорий изучался вопрос зависимости межгодовой и внутригодовой динамики условий вегетации от гидротермического фактора на основании анализа многолетних значений индексов вегетации.

Например, в [13] исследуемая территория (Казахский мелкосопочник, 49°с. ш. 73°в. д.) расположена в отдалении от океанов и морей, климат сухой и резко континентальный. Средняя температура января -14°C -18°C , лето сухое, жаркое, средняя температура июля $+20^{\circ}\text{C}$ $+24^{\circ}\text{C}$, максимальная – до $+42^{\circ}\text{C}$. Среднегодовое количество осадков 200–300 мм в южной части, 300–400 мм на севере. Авторами показана прямая корреляционная связь между индексом вегетации и годовым количеством осадков в отсутствии иных источников водообеспеченности. Для данного района характерна большая площадь, в основном лесной тип растительности и небольшое количество атмосферных осадков, которые ввиду особенностей климата и отсутствия наземных источников водообеспечения являются основным источником воды. Крупные реки питаются за счет весеннего снеготаяния, частично грунтовыми водами. В летние месяцы реки мелеют, превращаясь в плёсы и старицы, часто их русла пересыхают. Леса занимают 72 % территории.

В нашем исследовании, ввиду другого типа растительности – травянистого типа, с высокой транспирацией влаги (что хорошо согласуется с результатами работы [10] при положительном тренде температуры), наличием районов с наземными источниками водообеспеченности, однозначной связи между долговременными трендами индекса NDVI и трендами количества осадков не отмечено.

ВЫВОДЫ

Для каждой из 30 локаций (табл. 1) по данным MODIS получены ряды значений индекса NDVI за период 2003–2021 гг., вычислен ряд годовых интегральных характеристик I_n для индекса вегетации, годового хода температуры и годового хода суточного количества осадков по данным реанализа MERRA-2, построены тренды этих многолетних рядов.

При детальном картографическом изучении описанных выше локаций выяснено, что значимыми положительными трендами характеризуются локации, в которых имеются наземные источники воды помимо атмосферных осадков (водоемы, реки или действующая система мелиорации, оросительные каналы и другие мелиоративные сооружения или объекты).

Тренды со значимым отрицательным уклоном индекса вегетации приходятся на локации, в которых присутствует степной или аридный ландшафт и отсутствуют неатмосферные источники водообеспечения, а также на невозделываемые и неорошаемые участки.

Из 30 локаций 18 имеют отрицательный знак уклона индекса вегетации, 11 локаций имеют также отрицательный знак трендов интегральной характеристики количества осадков (61 % совпадений). Однако для исследованного района в текущих климатических условиях наблюдается однозначное соответствие между наличием наземного источника водообеспечения локации и положительным знаком тренда вегетационного индекса (5 локаций, 100 %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование находящихся в открытом доступе спутниковых данных о метеорологических, климатических и экологических параметрах в совокупности с современными программными средствами статистической обработки и анализа предоставляет эффективный инструмент оценки экологических рисков для исследуемой территории, что рассматривается на примере лесостепных районов, сопряженных с предгорьями Главного Кавказского хребта.

Существенный объем многолетних сведений позволяет с достаточной точностью и небольшой затратой ресурсов прогнозировать текущее состояние и перспективы хозяйственной деятельности данных ландшафтов с точки зрения многолетних тенденций изменения температуры, количества осадков, объема имеющейся фитомассы как характеристики потенциальной продуктивности, а также влияние водообеспеченности в локальном районе. Примененные при этом источники климатических данных и модели реанализа верифицированы на достаточном количестве кейсов для разнообразных локаций на территории России и Северного Кавказа.

Указанные оценки могут быть применены для относительно большого района и использованы при проработке вопросов долгосрочного планирования сельскохозяйственной деятельности мелиоративных мероприятий уровня территориального субъекта, климатического районирования, определения индекса сухости (в соответствии с законом Григорьева-Будыко), могут быть практически учтены при оценке перспектив деятельности достаточно малыми организациями в локальном районе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. – Москва: Росгидромет, 2022. С. 104.
2. Watson R., Gitay H., Suarez A., Dokken D. J., Leemans Rik. / *Climate Change and Biodiversity*. // *The Environmentalist*, January 2006. pp. 86
3. Кузьмина Ж.В. Анализ многолетних метеорологических трендов на юге России и Украины (от лесостепи до пустынь) // *Аридные экосистемы*, Т. 13, № 32. 2007. С. 47–61.
4. Елсаков В.В., Телятников М.Ю. Межгодовые изменения индекса NDVI на территории европейского северо-востока России и западной Сибири в условиях климатических флуктуаций последних десятилетий // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. Т. 10. № 3. 2013. С. 260–271.
5. Черепанов А. С., Дружинина Е. Г. Вегетационные индексы // *Геоматика* Т. № 2(11). 2011. С. 98–102.
6. Гопп Н.В., Смирнов В.В. Использование вегетационного индекса (NDVI) для оценки запасов надземной фитомассы тундровых сообществ растений // *Материалы конференции ИВТ СО РАН*, Т. 4. № 1. 2009. С. 187–191.
7. Мозговой Д.К., Кравец О.В. Использование многоспектральных снимков для классификации посевов сельскохозяйственных культур // *Экология и ноосфера*. 2009. № 1–2. С. 54–58.
8. Маргарян В.Г., Овчарук В.А., Гопций М.В., Боровская Г.А. Сравнительный анализ и оценка многолетних колебаний максимального стока рек горных территорий Армении и Украины в условиях глобальных изменений климата // *Устойчивое развитие горных территорий*. Т. 12, № 1(43). 2020. С. 61–75.
9. Коваленко С.Н. Выборочные статистические оценки многолетних месячных концентраций биогенного загрязнения малых рек Северо-Западной зоны РФ // *Мелиорация и водное хозяйство*. 2019. № 1. С. 9–13.
10. Курбанов З.М. Развитие мелиорации в Республике Дагестан // *Мелиорация и водное хозяйство*. 2018. Специальный выпуск, июнь. С. 49.
10. H. A. R. DE Bruin, J. N. M. Stricker. Evaporation of grass under non-restricted soil moisture conditions // *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, Т. 45(3). June, 2000. С. 391–406.
11. Лиджиева Н. Ц., Уланова С. С., Федорова Н. Л. Опыт применения индекса вегетации (NDVI) для определения биологической продуктивности фитоценозов аридной зоны на примере региона Черные земли // *Известия Саратовского университета*. Т. 12, № 2, 2012.
12. Голубева Е.И., Каширина Е.С., Новиков А.А., Глухова А.В. Использование индекса NDVI для геоэкологической оценки особо охраняемых природных территорий на примере города Севастополя // Т. 25, № 1, 2019. С. 320–331.
13. Пропастин П.А., Муратова Н.Р. Анализ многолетних рядов NOAA/AVHRR/NDVI и гидрометрических условий южной части Казахского мелкосопочника // *Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса*. Т. 3, № 2, 2006. С. 366–374.
14. Лысенко С.А. Климатообусловленные изменения биопроductивности наземных экосистем Беларуси // *Исследование земли из космоса*, Т. № 6, 2019. С. 66–77.
15. 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 // *Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа* *Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа*. Т. X (в 2-х частях). Часть 2. 2020. С. 730.
16. Каменецкий Е.С., Радионов А.А., Тимченко В.Ю. Анализ спутниковых измерений вегетационного индекса в предгорных и равнинных районах РСО-Алания // *Мелиорация и водное хозяйство*. № 4, 2021.
17. 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*. Т. 13. № 1(47), 2021.
18. Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышева Н.В. Климатология. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1989. С. 568.
19. Григорьев А.А., Будыко М. И. О периодическом законе географической зональности // *Докл. АН СССР*. Т. 110. № 1, 1956. С. 129–132.

REFERENCES

1. Doklad ob osobennostyax klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2021 god. – Moskva: Rosgidromet, 2022. S. 104.
2. Watson R., Gitay H., Suarez A., Dokken D. J., Leemans Rik. / *Climate Change and Biodiversity*. // *The Environmentalist*, January 2006. pp. 86
3. Kuz'mina Zh.V. Analiz mnogoletnix meteorologicheskix trendov na yuge Rossii i Ukrainy' (ot lesostepi do pusty'n') // *Aridny'e e' kosistemy*, Т. 13, № 32. 2007. С. 47–61.
4. Elsakov V.V., Telyatnikov M.Yu. Mezhdgovy'e izmeneniya indeksa NDVI na territorii evropejskogo severo-vostoka Rossii i zapadnoj Sibiri v usloviyax klimaticheskix fluktuacij poslednix desyatiletij // *Sovremennyy'e problemy' distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Т. 10. № 3. 2013. С. 260–271.
5. Cherepanov A. S., Druzhinina E. G. Vegetacionny'e indeksy' // *Geomatika* Т. № 2(11). 2011. С. 98–102.
6. Gopp N.V., Smirnov V.V. Ispol'zovanie vegetacionnogo indeksa (NDVI) dlya ocenki zapasov nadzemnoj fitomassy' tundrov'x soobshhestv rastenij // *Materialy' konferencii IVT SO RAN*, Т. 4. № 1. 2009. С. 187–191.
7. Mozgovoy D.K., Kravec O.V. Ispol'zovanie mnogospetral'ny'x snimkov dlya klassifikacii posevov sel'xozkul'tur // *E'kologiya i noosfera*. 2009. № 1–2. С. 54–58.
8. Margaryan V.G., Ovcharuk V.A., Gopciy M.V., Borovskaya G.A. Sravnitel'ny'j analiz i ocenka mnogoletnix kolebanij maksimal'nogo stoka rek gorn'x territorij Armenii i Ukrainy' v usloviyax global'ny'x izmenenij klimata // *Ustojchivoe razvitie gorn'x territorij*. Т. 12, № 1(43). 2020. С. 61–75.
9. Kovalenko S.N. Vy'borochnyy'e statisticheskie ocenki mnogoletnix mesyachny'x koncentracij biogennogo zagryazneniya mal'x rek Severo-Zapadnoj zony' RF // *Melioraciya i vodnoe xoz'yajstvo*. 2019. № 1. С. 9–13.
10. Kurbanov Z.M. Razvitie melioracii v Respublike Dagestan // *Melioraciya i vodnoe xoz'yajstvo*. 2018. Special'ny'j vy'pusk, iyun'. С. 49.
10. H. A. R. DE Bruin, J. N. M. Stricker. Evaporation of grass under non-restricted soil moisture conditions // *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, Т. 45(3). June № 2000. С. 391–406.
11. Lidzheva N. Cz., Ulanova S. S., Fedorova N. L. Opy't primeneniya indeksa vegetacii (NDVI) dlya opredeleniya biologicheskoy produktivnosti fitocenzov aridnoj zony' na primere regiona Chernyye zemli // *Izvestiya Saratovskogo universiteta*. Т. 12, № 2, 2012.
12. Golubeva E.I., Kashirina E.S., Novikov A.A., Gluxova A.V. Ispol'zovanie indeksa NDVI dlya geoe'kologicheskoy ocenki osobo oxranyaemy'x prirodny'x territorij na primere goroda Sevastopolya // Т. 25, № 1, 2019. С. 320–331.
13. Propastin P.A., Muratova N.P. Analiz mnogoletnix ryadov NOAA/AVHRR/NDVI i gidrometricheskix uslovij yuzhnoj chasti Kazaxskogo melkosopochnika // *Sovremennyy'e problemy' distancionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*. Т. 3, № 2, 2006. С. 366–374.
14. Ly'senko S.A. Klimatoobuslovlennyy'e izmeneniya bioproductivnosti nazemny'x e' kosistem Belarusi // *Issledovanie zemli iz kosmosa*, Т. № 6, 2019. С. 66–77.
15. Kameneczkij E.S., Radionov A.A., Timchenko V.Yu., Panae'tova O.S. Ob izmenchivosti vegetacionnogo indeksa NDVI v predgornyy'x rajonax Severnogo Kavkaza po dannym sputnikovy'x izmerenij // *Sovremennyy'e problemy' geologii, geofiziki i geoe'kologii Severnogo Kavkaza* *Sovremennyy'e problemy' geologii, geofiziki i geoe'kologii Severnogo Kavkaza*. Т. X (v 2-х chastyax). Chast' 2. 2020. С. 730.
16. Kameneczkij E.S., Radionov A.A., Timchenko V. Yu. Analiz sputnikovy'x izmerenij vegetacionnogo indeksa v predgornyy'x i ravninny'x rajonax RSO-Alaniya // *Melioraciya i vodnoe xoz'yajstvo*. № 4, 2021.
17. Kameneczkij E.S., Radionov A.A., Timchenko V.Yu., Panae'tova O.S. Ob izmenchivosti vegetacionnogo indeksa NDVI v predgornyy'x rajonax Severnogo Kavkaza po dannym sputnikovy'x izmerenij // *Ustojchivoe razvitie gorn'x territorij*. Т. 13. № 1(47), 2021.
18. Drozdov O.A., Vasil'ev V.A., Kobysheva N.V. Klimatologiya. – Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. С. 568.
19. Grigor'ev A.A., Budy'ko M. I. O periodicheskom zakone geograficheskoy zonal'nosti // *Dokl. AN SSSR*. Т. 110. № 1, 1956. С. 129–132.