

АНАЛИЗ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА В ПРЕДГОРНЫХ И РАВНИННЫХ РАЙОНАХ РСО-АЛАНИЯ

Каменецкий Е.С., Радионов А.А., Тимченко В.Ю.

Южный математический институт ВНЦ РАН, г. Владикавказ, РСО-Алания, Россия. e-mail: aar200772@mail.ru

Аннотация.

В работе для анализа сезонной и многолетней изменчивости нормализованного относительного вегетационного индекса NDVI используются данные многоканальных спектрорадиометров MODIS с разрешением 10x10 км за 20-ти летний период времени. Выбиралось пять географических локаций на территории РСО-Алания, в предгорных районах и на равнинах у границы Ставропольского края, отстоящих на разных расстояниях от Северных отрогов Кавказского хребта. Для каждой географической локации получены наборы из временных рядов 16-дневных композитов NDVI, временные ряды ежедневных значений температуры на высоте 2 м и количества осадков за период 20 лет с 01.01.2000 по 31.12.2019 гг. Для каждой локации по двухнедельным композитам путем вычисления интегральной характеристики за годовой промежуток времени получен ряд из 20 годовых значений. По полученному ряду строился 20-ти летний тренд и вычислялись параметры тренда методом наименьших квадратов с использованием полинома первого порядка.

Характерные изменения для тренда NDVI отмечены в локации Моздок-Русское, где при переходе от первого временного периода 2000–2009 к периоду 2010–2019 наклон тренда меняется с положительного на отрицательный. Похожие изменения трендов отмечаются и для других локаций. Это может быть связано с изменением во времени уровня увлажненности почв, учитывая в основном нисходящие тренды количества осадков. Отметим, что наклон тренда интегральной характеристики NDVI увеличивается на 5–15 % с увеличением удаленности от горного хребта. Тренды температуры для всех локаций восходящие, что указывает на некоторое среднее увеличение количества теплых дней из года в год. При этом максимальная температура в летний период времени заметно не увеличивается. Тренд интегральной характеристики для количества осадков в основном нисходящий. Однако его конкретные значения имеют довольно большой разброс, что означает значительное варьирование количества осадков от года к году. Кроме того, количество осадков уменьшается с удалением от горных хребтов.

Данные факторы следует принимать во внимание при выборе сельхозкультур для выращивания в равнинных и предгорных районах юга РФ и планировании дополнительных мелиорационных мероприятий.

Ключевые слова: горные и предгорные территории, растительный покров, климатические изменения, вегетационные индексы NDVI, спутниковые данные MODIS, статистический анализ, интегральная характеристика.

THE ANALYSIS OF SATELLITE MEASUREMENT OF THE VEGETATION INDEX IN THE FOOTHILL AND PLAIN AREAS OF THE RSO-ALANIA

Kamenetsky E. S., Radionov A. A. Timchenko V.Y.

Southern Mathematical Institute of the VSC RAS, Vladikavkaz, RNO-Alania, Russia. e-mail: aar200772@mail.ru

Annotation.

To analyze the seasonal and long-term variability of the normalized relative vegetation index NDVI, the multichannel MODIS spectroradiometer measurements with a 10x10 km resolution over a 20-year period of time are used. On the territory of the RNO-Alania in the foothill areas and on the plains near the border of the Stavropol Territory five geographical locations are selected, located at different distances from the Northern spurs of the Caucasian Ridge. For each geographical location the sets of time series are obtained for: 16-day NDVI composites, daily temperature at an altitude of 2 m and precipitation for the 20-years period from 01.01.2000 to 31.12.2019. By calculating the integral characteristic for an annual period of time for every location, the series of 20 annual values are obtained. According to the obtained series, three 20-year trends are built and the trend parameters of a first-order polynomial are calculated using the least squares method.

The NDVI trend slope switch is observed in the Mozdok-Russkoe location for transition from the time period 2000–2009 to the period 2010–2019, when the slope changes from positive to negative. Similar NDVI trend slope switches are observed for other locations. This may be due changing the level of soil moisture over time, taking into account mainly the downward trends in precipitation. The trend slope of the NDVI integral characteristic 5–15 % increases with the increasing of the distance from the mountain ridge. The temperature trends for all locations are ascending, that indicates an average increase of the number of warm days from year to year. At the same time, the maximum temperature during the summer period does not significantly increase. The trend of the integral characteristic for the amount of precipitation is mainly downward. However, its specific values have a fairly large spread, which means that the amount of

precipitation varies significantly from year to year. In addition, the amount of precipitation decreases with distance from mountain ridges.

These factors should be taken into account when choosing agricultural products for cultivation and planning additional land-reclamations in the flat and foothill areas on the south of the Russian Federation.

Keywords: Mountain and foothill territories, vegetation cover, climatic changes, vegetation indices NDVI, MODIS satellite data, statistical analysis, integral characteristic.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность развития мелиоративного комплекса для обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации, для устойчивого развития АПК в условиях импортозамещения и увеличения объемов экспорта сельскохозяйственной продукции сохраняется на высоком уровне и требует дальнейшего развития мелиорированных земель в России ввиду обострения экологических, демографических и социальных проблем [1, 2]. По прогнозу межправительственной группы экспертов (IPCC) и данным оценочных докладов Росгидромета [3], в XXI в. среднегодовая температура воздуха на Земле может повыситься на 1–2°C, температура холодного периода возрастет предположительно на 2.6–4.2°C, летняя – на 1–2°C.

В этих условиях все чаще возникают вопросы, связанные с разработкой и применением долговременных научно обоснованных подходов по установлению режима контроля за воздушным и водным обменом в орошаемых районах, количества и состояния фитомассы на ней и доведение состояния контролируемых сельхозугодий до необходимых нормативных и экологических показателей оптимальным выбором мелиоративных мероприятий [4].

Запасы фитомассы и такие характеристики как урожайность сельхозкультур (для земель сельскохозяйственного назначения) зависят от множества факторов: количества осадков, средней и максимальной температуры воздуха и почвы, загрязнения почв и воды, уровня инсоляции и других [5].

Приобретает актуальность планирование мероприятий, основанное на современных достижениях IT-технологий, внедрении геоинформационных систем [6–7], методов статистической обработки и прогноза [8]. Эти прогнозы учитываются при расчете экономической эффективности и отдачи мелиоративных мероприятий, обеспечивающих воспроизводство и повышение плодородия при возрастающих экологических рисках, прогнозах засушливости почв в различных регионах [9–10].

Для решения задач количественных оценок растительного покрова и фотосинтетически активной фитомассы широко используется нормализованный относительный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [11], обычно называемый вегетационным

индексом. NDVI может быть рассчитан на основе снимков высокого, среднего или низкого разрешения, полученных по данным дистанционного зондирования Земли с использованием бортовой аппаратуры пилотируемой и беспилотной авиации, космических аппаратов, имеющих спектральные каналы в красном (0.55–0.75 мкм) и инфракрасном диапазоне (0.75–1.0 мкм) [12].

Как показано в работах [13, 14], существует устойчивая корреляция между показателем NDVI и продуктивностью для различных типов экосистем. Временные ряды NDVI содержат важную и используемую на практике информацию о фенологическом цикле растительности, оценки сельскохозяйственных ресурсов региона, мониторинга посевов, оценки изменения запасов фитомассы, эффективности мелиорации, продуктивности пастбищ и др. [15].

Для количественных оценок статистических параметров изменения растительного покрова и фотосинтетически активной фитомассы в равнинных, предгорных и горных районах также использован нормализованный относительный вегетационный индекс NDVI [16]. Также в работе [17] описаны источники получения спутниковых данных, находящихся в открытом доступе и некоторые методики их обработки

Методика исследований.

Чтобы продемонстрировать эффективность использования многолетних измерений различных экологических и климатических параметров для анализа сезонной и многолетней изменчивости фитомассы в работе используются данные многоканальных спектрорадиометров MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, <http://modis.gsfc.nasa.gov>) ряда космических аппаратов NASA.

С сайта Американского космического агентства NASA Earth Observations (<https://neo.sci.gsfc.nasa.gov>) загружены снимки распределения индекса NDVI за период 18.02.2000 по 31.12.2019 в проекции Меркатора. Все изображения единого размера 3600x1800 пикселей скорректированы путем дополнения нескольких пропущенных снимков нулевыми значениями.

Угловой размер 1 пикселя на каждом снимке равен 0.1x0.1 градус (в надире), что соответствует пространственному разрешению 10x10 км. Хотя это довольно грубое разрешение, оно позволяет рассматривать общие для исследуемого района закономерности без учета микромасштабных вариаций, вызванных антропогенным влиянием, мелкими особенностями орографии, траектории самого ИСЗ или погодных условий на момент съемки.

Из каждого снимка по географическим координатам локации с использованием библиотеки PYTHON PIL (<https://python-pillow.org>) выбирался одиночный пиксель, соответствующий исследуемому региону. Яркость пикселя в диапазоне от 0 до 255 соответствует значению вегетационного индекса NDVI, усредненного за 16 дней. Такие данные

называются двухнедельным композитом (сайт NASA Earth Observations, <https://neo.sci.gsfc.nasa.gov>) и использовались в работе [17].

В результате обработки совокупности снимков, получаются временные ряды вегетационного индекса NDVI для выбранной локации за период с 01.01.2000 по 31.12.2019 гг. Общепринятое значение индекса NDVI от -1 до 1 . Получаемые от NASA значения NDVI в диапазоне $0 \div 255$ нормируются по формуле: $(NDVI - 127) / 128$.

Кроме ряда 16-дневных композитов NDVI за тот же 20-ти летний период времени выбирались ежедневные ряды данных по температуре воздуха на высоте 2 м и ряды данных по количеству осадков для тех же географических локаций. Эти ряды находятся на веб-портале NASA POWER Data Access Viewer (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>) и входят в климатическую модель Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications (MERRA-2, <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>), которая основывается на измерениях наземных метеостанций, спутниковых наблюдений и модельного интерполирования.

Для каждой географической локации получены наборы из временных рядов 16-дневных композитов NDVI, временные ряды ежедневных значений температуры на высоте 2 м и количества осадков за период 20 лет с 01.01.2000 по 31.12.2019 гг.

Чтобы охарактеризовать временную изменчивость и выявить временные тренды полученных рядов индекса NDVI, температуры и количества осадков, в данной работе использована описанная ранее [16, 17] интегральная характеристика I_n . Для каждой локации по двухнедельным композитам численным интегрированием методом Симпсона (использованы функции из библиотеки Scipy, <https://scipy.org>) вычислялась интегральная характеристика за годовой промежуток времени. Таким способом получен ряд из 20 среднегодовых значений I_n .

Далее по полученному ряду значений I_n строился тренд долговременных изменений (вычисляемый с использованием библиотеки статистического анализа Numpy, <https://numpy.org>). Изменчивость межгодового значения I_n (называемая трендом) указывает на климатические изменения данного ландшафтного региона, по которому можно провести оценку многолетней изменчивости индекса NDVI и оценить эффективность сельскохозяйственной деятельности, в сравнении с относительно близко расположенными районами.

Географические локации.

Для настоящей работы выбирались пять географических локаций на территории РСО-Алания, в предгорных районах и на равнинах у границы Ставропольского края, отстоящих на разных расстояниях от Северных отрогов Кавказского хребта. Этот выбор характеризует изменчивость климатических условий, происходящих под влиянием больших горных массивов.

1) Локация в районе н.п. Гизель и г. Владикавказ, РСО-Алания, расположена 43°00'00" с.ш., 44°30'00" в.д. (или 43°,0 с.ш., 44°5 в.д.) менее 10 км от Главного Кавказского хребта вблизи Дарьяльского ущелья. Высота 600 ÷ 800 метров над уровнем моря растительность - смешанный хвойный и широколиственный лес.

2) Локация в районе г. Чикола, РСО-Алания, 43°10'00" с.ш., 44°00'00" в.д. (или 43°,2 с.ш., 44°0 в.д.), расположена на расстоянии 50 км от Главного Кавказского хребта в зоне Дигорского ущелья. Средняя высота территории составляет 650–1100 метров над уровнем моря, растительность – смешанные хвойные и широколиственные леса и сельхозугодья травянистых культур, удаленность от горных хребтов менее 10 км.

3) Локация на равнинной части РСО-Алания вблизи г. Беслан, координаты 43°10'00" с.ш., 44°40'00" в.д. (или 43°,2 с.ш., 43°7 в.д.). Г. Беслан находится в лесостепной зоне РСО-Алания на 30 км к северу от основного горного массива Главного Кавказского Хребта. Местность частично с холмистым и равнинным лесостепным ландшафтом, сельхозугодьями травянистых культур. Высоте над уровнем моря около 500 метров.

4) Локация западнее г. Моздок расположена 43°50'00" с.ш., 44°20'00" в.д. (или 43°,8 с.ш., 44°,4 в.д) на равнинной территории Моздокского района РСО-Алания на границе Ставропольского края в районе с. Русское. Рельеф местности степной, высота над уровнем моря около 160 метров. Расстояние на юг до Главного Кавказского Хребта около 130 км.

5) Локация на равнинной части РСО-Алания южнее г. Моздок и с. Виноградное расположена 43°40'00" с.ш., 44°40'00" в.д. (или 43°,7 с.ш., 44°,7 в.д). Рельеф местности степной, высота над уровнем моря около 160 метров. Расстояние до горного хребта около 130 км.

Локации 4 и 5 характеризуют удаленные от хребта территории РСО-Алания, которые находятся в лесостепной зоне.

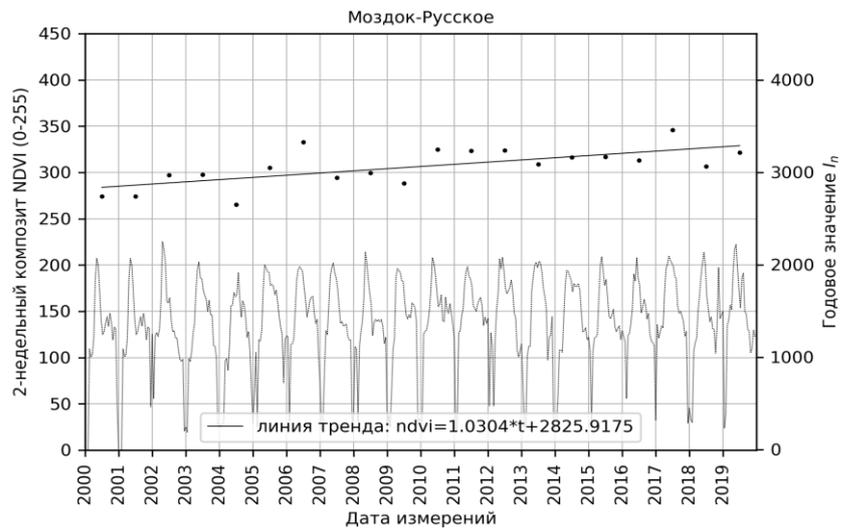
Результаты исследований.

Проверялась статистическая модель линейной регрессии между значениями I_n и временем, другими словами, вычислялись параметры временного тренда методом наименьших квадратов с использованием полинома первого порядка (использована библиотека Scipy). Для каждой локации получены характеристики тренда: y -пересечение (определяющее начальное значение) и наклон (определяющий тенденции изменения).

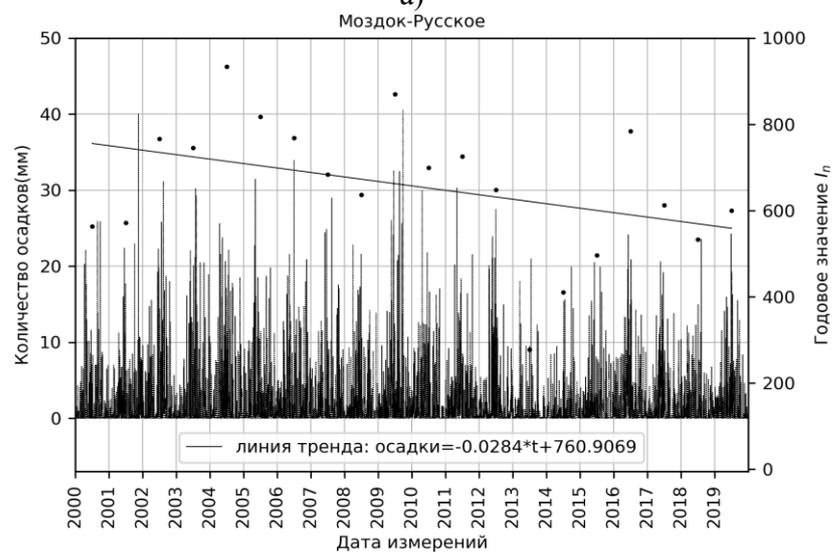
Тренд интегральной характеристики I_n вычислялся за 20-ть лет, проверялась гипотеза линейной зависимости изменения I_n от времени

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

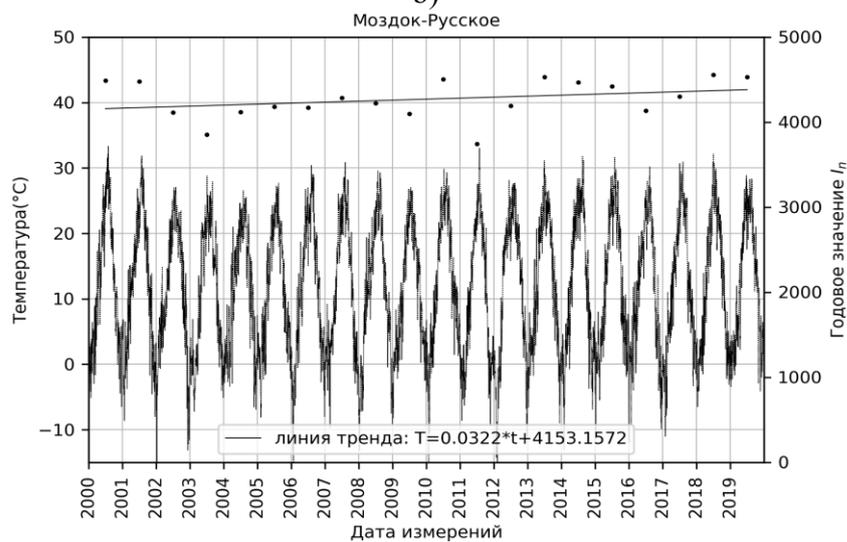
где a – наклон линии тренда, b – y -пересечение линии (значение I_n в начале периода времени), t – время, в годах, начиная с 2000. Гипотеза (1) проверялась для каждого из трех рядов данных: индекс NDVI, температура на высоте 2 м, количество осадков.



а)



б)



с)

Рис. 1. Изменения интегральных характеристик I_n (правая шкала) для разных рядов данных за период 2000 – 2019 гг для локации №4 Моздок-Русское: а) – NDVI; б) – количество осадков; с) – температура на высоте 2 м.

Выполненные расчеты для локации №4 Моздок-Русское иллюстрирует рис. 1. На рис 1.а пунктирной кривой показаны значения годового хода значений NDVI (левая шкала), здесь же показаны значения интегральных характеристик I_n NDVI, вычисленных за период 1 год кружками (правая шкала), а также сплошной линией представлен тренд изменения I_n , построенный по (1) за весь выбранный период. Параметры линии тренда NDVI составили: наклон $a = +0.9719$, у-пересечение $b = 3200$, корреляция 0.6193, стандартная ошибка 0.2903. Рис. 1.b иллюстрирует пример проверки гипотезы (1) для ряда ежедневных значений количества осадков для этой же локации. На рис. 1.c показан пример проверки гипотезы (1) для ряда ежедневных значений температуры на высоте 2 м для локации №4. Вычисления для всех локаций сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Параметры интегральных характеристик за период 2000–2019 гг.

Локация	a - наклон линии регресси и	y - пересечен ие линии регрессии	Коэффици ент корреляци и Пирсона -г	p - значение вероятно сти	Стандарт ная ошибка
Интегральная характеристика NDVI					
Владикавказ	0.4083	478.45	0.8220	8.730e-06	0.0667
г. Чикола	0.9801	3415.54	0.7408	0.0001	0.2094
с. Беслан	1.1269	3679.32	0.8388	3.8273e-06	0.1724
Моздок-Русское	1.0303	2825.91	0.6761	0.0010	0.2645
Моздок-Виноградное	0.9719	3200.68	0.6193	0.0035	0.2903
Интегральная характеристика температуры на высоте 2 м					
Владикавказ	0.0445	3495.61	0.3844	0.0942	0.0252
г. Чикола	0.0550	3165.72	0.4436	0.0500	0.0262
с. Беслан	0.0445	3495.61	0.3844	0.0942	0.0252
Моздок-Русское	0.0322	4153.15	0.3034	0.1933	0.0238
Моздок-Виноградное	0.0250	4329.39	0.2503	0.2871	0.0228
Интегральная характеристика количества осадков					
Владикавказ	-0.0294	832.95	-0.4014	0.0793	0.0158
г. Чикола	-0.0309	878.93	-0.4040	0.0772	0.0165
с. Беслан	-0.0294	832.95	-0.4014	0.0793	0.0158
Моздок-Русское	-0.0283	760.90	-0.3888	0.0901	0.0158
Моздок-Виноградное	-0.0276	724.63	-0.3970	0.0830	0.0150

Обсуждение.

Значения I_n индекса NDVI для предгорных районов (локация №2) больше, чем для локации №4 Моздок-Русское на 21%, и на 7% больше, чем для локации №5 Моздок-Виноградное, что указывает на разную текстуру ландшафта и структуру фитоценоза в этих районах. Это видно из таблицы 1, где указано значение u -пересечения тренда.

Положительное значение линии наклона (рис. 1.а) свидетельствует о возрастании значений вегетационного индекса NDVI в рассматриваемый период, т.е. имеется положительный восходящий тренд интегральной годовой характеристики индекса. Длительность сохранения значимых величин NDVI, соответствующих объемам фитомассы, может указывать на увеличение общей продолжительности благоприятного для вегетации периода в результате климатических изменений для рассмотренных локаций, как описано в работе [17].

Для выявления зависимости тренда от периода рассмотрения, дополнительно вычислялись статистические параметры и строились тренды изменений за периоды по 10 лет: 2000–2009 и 2010–2019 гг. Наиболее характерные изменения для тренда NDVI отмечены в локации № 4 Моздок-Русское, где при переходе от первого временного периода 2000–2009 к периоду 2010–2019 наклон тренда меняется с положительного (с наклоном $a = 1.1539$), на отрицательный (с наклоном $a = -0.0581$). Похожие изменения трендов отмечаются и для других локаций. Это может быть связано с изменением во времени уровня увлажненности почв, учитывая в основном нисходящие тренды количества осадков (Рис. 1.с).

Таблица 1 показывает, что наклон тренда интегральной характеристики NDVI увеличивается на 5–15 % с увеличением удаленности от горного хребта. Это свидетельствует о разном типе растительности в районах, расположенных рядом с горными склонами в локациях 1, 2, и в равнинных лесостепных районах локаций 3, 5, преобладании в равнинных локациях травяного покрова, подверженного высушению при уменьшении осадков и увеличении температуры, наличию сельхозугодий с явной сезонной обработкой, меньшим количеством территории, покрытой лесом, удерживающим влагу.

Тренды температуры восходящие, что указывает на некоторое среднее увеличение количества теплых дней из года в год. При этом максимальная температура в летний период времени заметно не увеличивается. Эти тренды ещё более выражены для высокогорных локаций РСО-Алания, что показано в [17]. Такое изменение температуры может быть связано с общепланетарными климатическими изменениями, связанными с уменьшением продолжительности холодного времени в году. С увеличением расстояния от горных массивов, чем дальше от хребта, тем температура выше, а наклон тренда I_n меньше.

Тренд интегральной характеристики для количества осадков в основном нисходящий, наклон линии тренда отрицательный. При удалении от горных хребтов к равнинным локациям у-пересечение уменьшается примерно на 15–25%. Отрицательные значения линии наклона тренда (табл. 1) свидетельствуют об уменьшении количества осадков в течение рассмотренного периода. Однако конкретные значения I_n имеют довольно большой разброс, что означает значительное варьирование количества осадков от года к году.

Найденные статистические закономерности имеют простой физический смысл: с удалением от горных хребтов количество осадков уменьшается (у-пересечение тренда), и показывает долговременную тенденцию к уменьшению (угол наклона отрицательный).

Также, для всех рассмотренных локаций отмечается долговременная тенденция на уменьшение количества выпадающих осадков как в предгорных, сравнительно обеспеченных атмосферной влагой районах, так и в удаленных от горных массивов лесостепных зонах, уже испытывающих недостаток осадков. Можно предположить, что именно этим обуславливается уменьшение годовых значений вегетационных индексов, происходящее в последние десять лет (рис. 1.а), а также изменение знака тренда NDVI для локации № 4, происходящее приблизительно с 2010 г.

Другими словами, сельскохозяйственные угодья, не требующие на текущий момент времени дополнительной мелиорации, через несколько лет могут оказаться остро нуждающимися в мелиоративных мероприятиях для получения стабильных урожаев из-за изменения внешних условий.

Учитывая общие тренды увеличения температуры и уменьшения количества осадков на юге России, необходимо учитывать возможное изменение продуктивности сельскохозяйственных земель при планировании капитальных вложений в создании новой и поддержании существующей инфраструктуры агропромышленного комплекса.

Заключение.

Вегетационный индекс NDVI является количественной характеристикой запасов фитомассы рассматриваемого ландшафта и используется для классификации подстилающей поверхности [12]. На основе десяти и двадцатилетних рядов данных спутниковых измерений двухнедельного композита NDVI, температуры на высоте 2 м и количества осадков для предгорных и равнинных территорий РСО-Алания показаны тренды интегральных характеристик этих величин и определены их статистические параметры.

Поведение тренда индекса NDVI свидетельствует о тенденции увеличения общего количества благоприятного для вегетации фитомассы времени, что указывает на долговременное изменение климатических условий для вегетации растений для предгорных районов РСО-Алания [16].

При этом для равнинных районов увеличения значений интегральной характеристики на протяжении последних 10 лет не отмечается.

Количество осадков уменьшается с удалением от горных хребтов и имеет отрицательный долговременный тренд.

Данные факторы следует принимать во внимание при выборе сельскохозяйственных культур для выращивания в равнинных и предгорных районах юга РФ, которые способны к более раннему цветению и плодоношению, более скороспелых культур и засухоустойчивых культур, учитывая тренд на более раннее наступление максимума вегетации.

Тренд на уменьшение количества осадков в совокупности с отрицательным трендом вегетационного индекса может давать основание для планирования дополнительных мелиорационных мероприятий.

Библиографический список

1. Колганов А. В., Сухой Н. В., Шкура В. Н., Щедрин В. Н. Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения в России (под редакцией академика РАН, доктора технических наук, профессора В. Н. Щедрина) // Новочеркасск РосНИИПМ 2016
2. Щедрин В. Н., Балакай Г. Т., Куприянова С. В. Экспортный потенциал мелиорированных земель России. // Мелиорация и водное хозяйство № 2 2019
3. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год // Росгидромет, Москва, 2021. С. 104. https://www.meteorf.ru/upload/pdf_download/doklad_klimat2020.pdf
4. Кирейчева Л. В. Стратегия развития комплексных мелиораций в России // Мелиорация и водное хозяйство: проблемы и пути решения: Материалы Международной научно-практической конференции. М.: ВНИИГиМ, 2016. – С. 4-9.
5. Буховец А. Г., Семин Е. А., Костенко Е. И., Яблоновская С. И. Моделирование динамики вегетационного индекса NDVI озимой пшеницы в условиях ЦФО // Вестник Воронежского Государственного Аграрного Университета, № 2. 2018. С. 186-199, doi: 10.17238/issn2071-2243.2018.2.186.
6. Юрченко И. Ф. Совершенствование цифровых технологий формирования мелиоративного режима агроэкосистем // Мелиорация и водное хозяйство №6 2020г. С. 8-12
7. Петрушин А. Ф., Митрофанов Е. П., Митрофанова О. А. Перспективы создания единой системы хранения и обработки данных дистанционного зондирования для мониторинга состояния мелиорируемых земель // Мелиорация и водное хозяйство №5 2020г. С. 29-31
8. Коваленко С. Н. Выборочные статистические оценки многолетних месячных концентраций биогенного загрязнения малых рек Северо-Западной зоны РФ // Мелиорация и водное хозяйство №1 2019г. С. 9-13

9. Дезфули Э. Д., Зохраби Н., Розбахани М. М. Влияние изменения климата на температуру в провинции Хузестан // Мелиорация и водное хозяйство №2 2020г. С. 33-37
10. Курбанов З.М. Развитие мелиорации в Республике Дагестан // Мелиорация и водное хозяйство Специальный выпуск, июнь 2018, с.49
11. Черепанов А. С., Дружинина Е. Г. Вегетационные индексы // Журнал Геоматика №2(11), 2011. С. 98-102.
12. Мозговой Д. К., Кравец О. В. Использование многоспектральных снимков для классификации посевов сельхозкультур // Экология и ноосфера. № 1-2. 2009. С. 54-58.
13. Гопп Н. В., Смирнов В. В. Использование вегетационного индекса (ndvi) для оценки запасов надземной фитомассы тундровых сообществ растений // ИПА СО РАН, Материалы конференции ИВТ СО РАН, Новосибирск, 2009 Т. 4, N1. С. 187-191.
14. Кислов А. В., Евстигнеев В. М., Малхазова С. М., Соколихина Н. Н., Суркова Г. В., Торопов П. А., Чернышев А. В., Чумаченко А. Н. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века // Москва, МАКС Пресс, 2008. С. 292.
15. Катаев М. Ю., Бекеров А. А., Шалда П. В. Анализ трендов временных рядов вегетационного индекса NDVI // Доклады ТУСУРа, Т. 20, № 1, 2017. С. 81-84, doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-1-81-84.
16. 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. No1(47), 2021 г.
17. Каменецкий Е. С., Радионов А. А., Тимченко В. Ю., Панаэтова О. С. Об изменчивости аэрозольной оптической толщины в горных, предгорных и степных районах Северного Кавказа по данным спутниковых измерений MODIS // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том X (в 2-х частях). Часть 2 / Научные редакторы: академик РАН А.О. Глико, д.ф.-м.н., профессор И.А. Керимов. М.: ИИЕТ РАН, 2020. 730 с.