

УДК 528.85

DOI 10.52575/2712-7443-2024-48-1-91-105

Корреляция урожайности зерновых культур и вегетационного индекса SAVI на территории Республики Татарстан

¹Сабирзянов А.М., ¹Панасюк М.В., ²Аширбеков Ш.У.

¹ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»
Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18

²ФГБОУ ВО Московский государственный университет геодезии и картографии,
Россия, 105064, г. Москва, Гороховский пер., 4

E-mail: sabiralmaz@mail.ru, mp3719@yandex.ru, shasirbekov@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрены возможности применения данных дистанционного зондирования Земли и геоинформационных технологий для анализа и прогнозирования урожайности зерновых сельскохозяйственных культур, выращиваемых в различных почвенных зонах Республики Татарстан. Выявлены ключевые факторы, влияющие на рост и развитие растений в почвенно-климатических условиях региона. Приводятся результаты обработки геоданных со спутниковых снимков Landsat-8 с помощью методов спектрального анализа, позволившие рассчитать значения вегетационных индексов для зерновых культур. Результаты корреляционно-регрессионного анализа данных 2021 года привели к выявлению высокой степени тесноты корреляционной связи ($r = 0,8$) между индексом SAVI и средней урожайностью зерновых культур для заданной выборки муниципальных районов, представляющих все почвенные зоны региона. Данная зависимость отражает нелинейные соотношения между показателями. Дается характеристика динамики значений индекса SAVI в период фазы вегетации растительности на основе анализа тренда временного ряда. Показано, что высокие для региона среднесуточные температуры, способствующие торможению роста и развития растений, достоверно отражаются невысокими значениями индекса SAVI. Приводится вывод об обратной связи индекса растительности SAVI и показателя водного индекса на полях зерновых культур региона.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, фотограмметрия, геоинформационные технологии, мультиспектральный анализ, вегетационный индекс, корреляционно-регрессионный анализ, урожайность зерновых культур

Для цитирования: Сабирзянов А.М., Панасюк М.В., Аширбеков Ш.У. 2024. Корреляция урожайности зерновых культур и вегетационного индекса SAVI на территории Республики Татарстан. Региональные геосистемы, 48(1): 91–105. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-1-91-105

Correlation of Grain Crop Yield and Vegetation Index SAVI on Territory of the Republic of Tatarstan

¹Almaz M. Sabirzyanov, ¹Mikhail V. Panasyuk, ²Shynbolat U. Ashirbekov

¹Kazan (Volga Region) Federal University,
18 Kremlevskaya St, Kazan 420008, Russia

²Moscow State University of Geodesy and Cartography,
4 Gorohovskiy St, Moscow 105064, Russia

E-mail: sabiralmaz@mail.ru, mp3719@yandex.ru, shasirbekov@gmail.com

Abstract. The article considers the possibilities of using Earth remote sensing data and geoinformation technologies to analyze and predict the yield of grain crops grown in different soil zones of the Republic of Tatarstan. The key factors influencing the growth and development of plants in soil and climatic



conditions of the region are identified. The results of geodata processing from Landsat-8 satellite images using spectral analysis methods, which allowed to calculate the values of vegetation indices for grain crops, are presented. The results of correlation-regression analysis of 2021 data led to the detection of a high degree of correlation closeness ($r = 0.8$) between SAVI index and average grain yield for a given sample of municipal districts representing all soil zones of the region. This dependence reflects non-linear relations between the indicators. The dynamics of SAVI index values during vegetation phase is characterized on the basis of time series trend analysis. It is shown that high average daily temperatures, contributing to the inhibition of plant growth and development, are reliably reflected by low values of the SAVI index for the region. The conclusion about the inverse relationship between vegetation index SAVI and water index in grain crops fields of the region is given.

Key words: Earth remote sensing, photogrammetry, geoinformation technologies, multispectral analysis, vegetation index, correlation and regression analysis, grain crop yield

For citation: Sabirzyanov A.M., Panasyuk M.V., Ashirbekov Sh.U. 2024. Correlation of Grain Crop Yield and Vegetation Index SAVI on Territory of the Republic of Tatarstan. Regional Geosystems, 48(1): 91–105 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-1-91-105

Введение

Объективная и актуальная информация о состоянии сельскохозяйственных угодий является основой поиска решений по устойчивому развитию сельскохозяйственной отрасли как отдельно региона, так и страны в целом.

Несмотря на относительно небольшие размеры, территория Республики Татарстан является достаточно неоднородной в плане почвенных и климатических условий ведения сельскохозяйственного производства. Смена природных зон в регионе происходит при преимущественном движении в меридиональном направлении, что обуславливает характер изменения как почвенных, так и климатических условий. Изменение климатических условий проявляется преимущественно в определенной территориальной дифференциации среднегодовых температур, гидротермического коэффициента, режима температуры и осадков, являющихся одними из главных факторов урожайности сельскохозяйственных культур региона.

Объектом проведенного исследования послужили агроландшафты зернового клина обрабатываемых пахотных угодий территорий десяти муниципальных районов Республики Татарстан, образующих репрезентативную в плане учета дифференциации почвенно-климатических условий выборку.

Предмет исследования – мониторинг урожайности основных зерновых культур, выращиваемых на территории региона, осуществляемый на основе применения технологий дистанционного зондирования и методов геоинформационного анализа.

Целью данной работы является исследование связи между значениями показателей средней урожайности зерновых культур в муниципальных районах Республики Татарстан и сезонными пиковыми значениями вегетационного индекса *SAVI* для территорий данных районов.

Объекты и методы исследования

Территория Республики Татарстан делится на три почвенные зоны, где различаются почвенные показатели, где типы, подтипы и плодородность почв сгруппированы в массивах нескольких муниципальных районов [География Татарстана, 1994]. Территориальное зонирование по этим показателям включает Предкамье (северная часть республики), Предволжье (западная часть) и Закамье (восточная, юго-восточная часть республики) (рис. 1а).

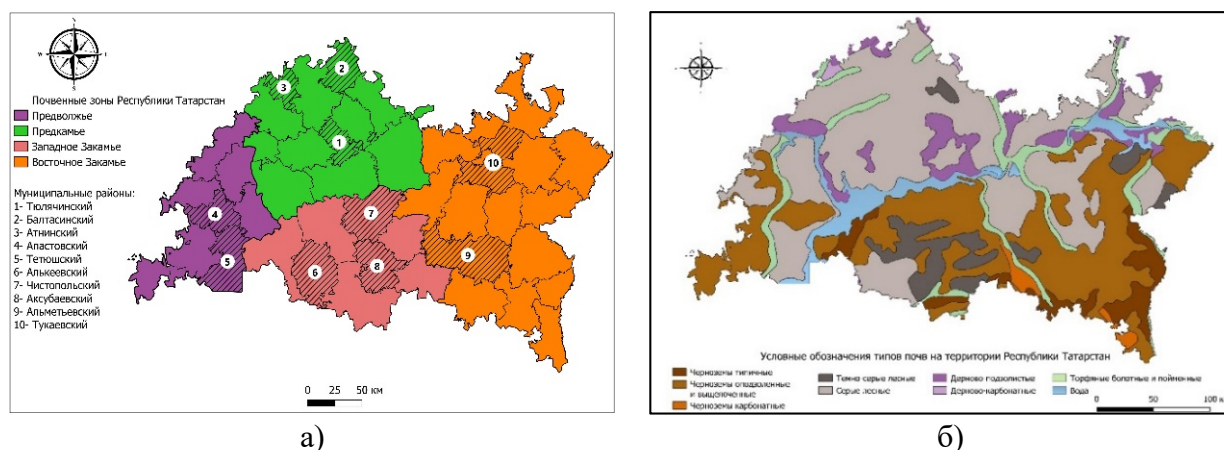


Рис. 1а. Почвенно-географические зоны Республики Татарстан с исследуемыми территориями муниципальных районов; 1б. Почвенная карта Республики Татарстан

Fig. 1a. Soil-geographical zones of the Republic of Tatarstan with the studied territories of municipal districts; 1b. Soil map of the Republic of Tatarstan

В почвах Предкамья, где расположены 12 муниципальных районов республики и территория городского округа Казань, преобладают светло-серые лесные (29 %) и дерново-подзолистые почвы (21 %). 18,3 % занимают серые и тёмно-серые лесные почвы. На возвышенностях и холмах встречаются дерновые почвы. 22,5 % занимают смытые почвы, пойменные – 6–7 %, болотные – около 2 %. Для ряда муниципальных районов (Балтасинский, Кукморский, Мамадышский) характерна эрозия почв, которой подвержено до 40 % территории.

Территория Предволжской зоны включает в себя шесть муниципальных районов республики. В северной части Предволжья большинство территории занимают лесостепные почвы, которые составляют 51,7 % из всех земель, в том числе серые и тёмно-серые. Площадь оподзоленных и выщелоченных чернозёмов в данной зоне – более 24 %.

Самую большую по размерам территорию занимает почвенная зона Закамья, которая включает 25 муниципальных районов и городской округ Набережные Челны.

Ввиду вытянутости территории Закамья в широтном направлении, для нее характерна неоднородность климатических условий и почвенного покрова, что приводит к выделению в его составе двух зон (подзон) – Западного и Восточного Закамья.

В Западном Закамье на долю выщелоченных чернозёмов приходится 52,2 % всех почв, а серых и темно-серых – 28,3% и обыкновенных чернозёмов – чуть более 13 % всех почв данной зоны.

Восточное Закамье характеризуется наличием карбонатных чернозёмов (около 3 %) и меньшей площадью выщелоченных и обыкновенных чернозёмов – 39,4 % и 6,4 % соответственно [Сулейманова, 2014]. На юго-восточной части Закамья доминируют чернозёмы различных подтипов (87,3 %), а доля лесостепных почв составляет лишь 4,9 % всех почв данной территории (см. рис. 1б, 2).

Материалами исследования являлись космические снимки территории Республики Татарстан, выполненные спутником *Landsat-8*.

В условиях изучаемого региона все зерновые культуры достигают максимального значения вегетационной массы в фазах роста и развития растений: выход в трубку – молочная спелость, которые отмечаются обычно в первой половине июля. При этом интенсивный рост зерновых культур наблюдается с начала июня до середины июля. Поэтому были использованы космические снимки, полученные в период с 3 июня по 16 июля 2021 года с разрешением на местности 30 метров на пиксель. Исследуемые муниципальные районы разных почвенных зон республики выбирались с учетом перекрытия двух соседних витков съемки со спутника *Landsat-8*, чтобы достичь частоты съемки раз в восемь дней.

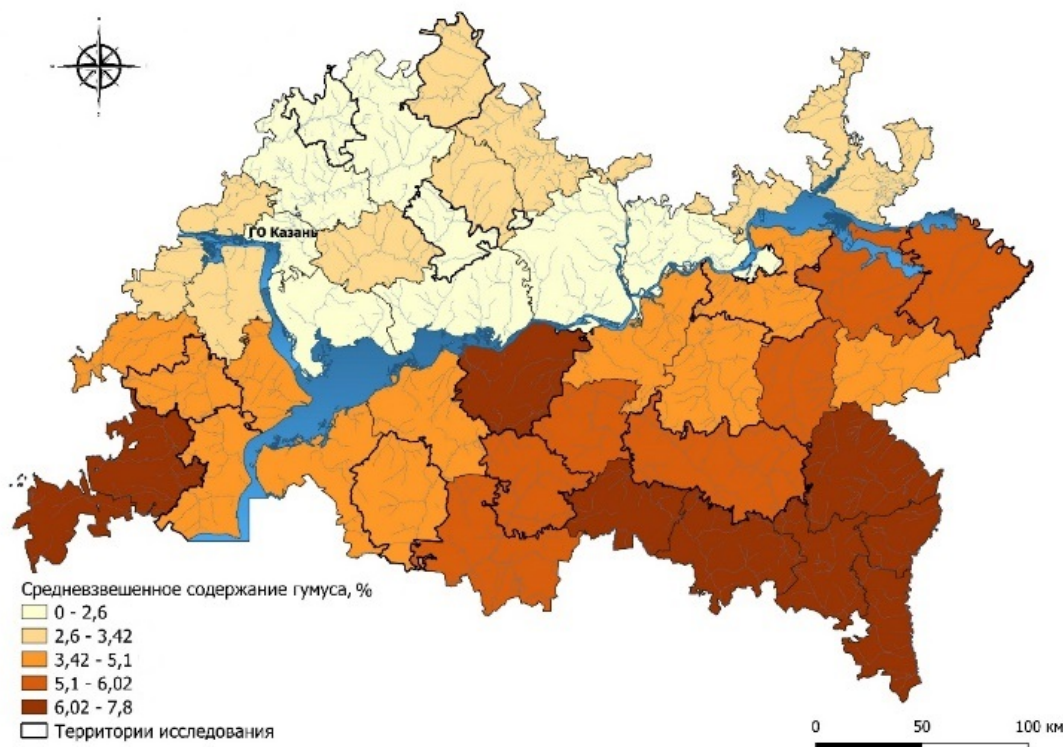


Рис. 2. Средневзвешенное содержание гумуса в пахотных почвах Республики Татарстан
Fig. 2. Weighted average humus content in arable soils of the Republic of Tatarstan

Исходными данными для анализа являлись космические снимки с портала USGS (United States Geological Survey) [Earth Explorer..., 2023] (рис.3).

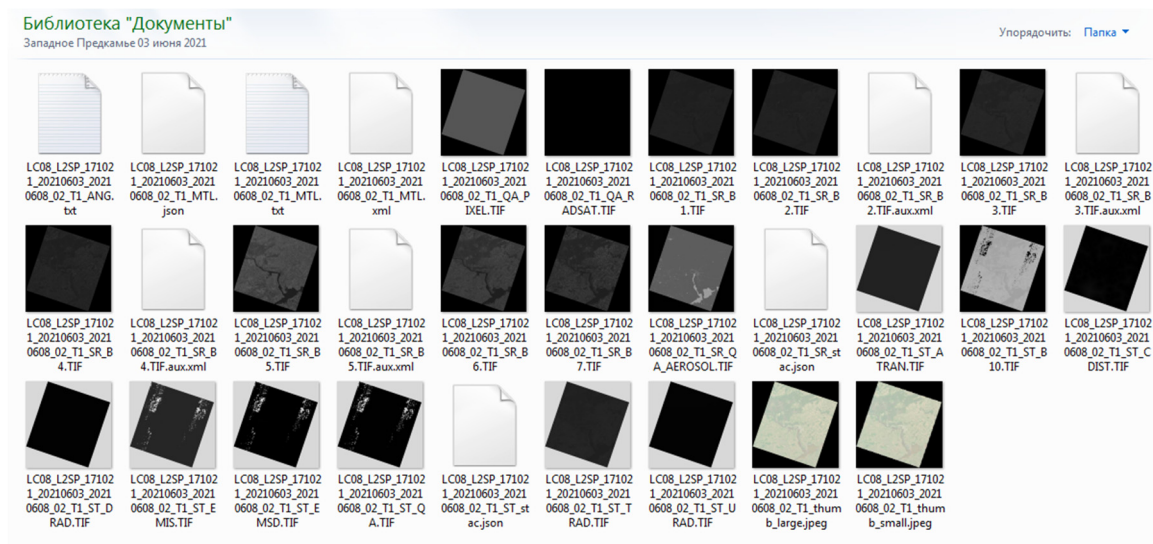


Рис. 3. Космические снимки Landsat-8 среднего пространственного разрешения, используемые для исследования
Fig. 3. Landsat-8 satellite images of medium spatial resolution used for research

После выбора снимка интересующей территории его можно скачать как архив файлов со всеми спектральными каналами, так и отдельные снимки. Космические снимки имеют формат «GeoTIFF», который представляет собой растровые данные в формате «TIFF» с географической привязкой.

Для работы создан векторный слой с границами полей всех изучаемых территорий муниципальных районов и выгружены поля, занятые в 2021 году зерновыми культурами. С помощью инструмента «Конструктор запросов» в пределах территорий исследуемых муниципальных районов были выделены области пашни, отвечающие запросу «Зерно», и удалены объекты, не отвечающие данному условию. Все исследовательские работы проводились в геоинформационной системе *Quantum GIS (QGIS)* версии 3.28 [Учебное пособие по QGIS, 2023].

Весь комплекс работ по исследованию зерновых сельскохозяйственных угодий на территории Республики Татарстан проводился в геоинформационной системе *Quantum GIS (QGIS)* версии 3.28.6.

При помощи алгоритмов расчета индексов вегетации и функции «Калькулятор растров» был создан растр, в котором выполнен расчет вегетационного индекса *SAVI*. Созданные растры включались в рабочие слои и добавлялись к рабочей панели *QGIS*, после чего проводилась обрезка растровых изображений по «маске» для получения значений вегетационных индексов в пределах территорий полей каждого изучаемого муниципального района.

Для анализа и мониторинга сельскохозяйственных земель используются различные вегетационные индексы [Ерошенко, 2017; Белоусова, 2019; Раджабова и др., 2020; Долина, 2023]. Разработан веб-сервис (<http://www.indexdatabase.de>), где хранится информационная база, в которой представлены сведения о содержании и возможностях использования индексов. Среди вегетационных индексов, имеющих в базе, можно выделить: *NDVI (Normalized Difference VI)* – нормализованный разностный индекс растительности [Index: Transformed NDVI, 2023]; *SAVI (Soil Adjusted VI)* – почвенный индекс растительности; *ARVI (Atmospherically Resistant VI)* – индекс растительности, устойчивый к влиянию атмосферы; *NDWI (Normalized Difference Water Index)* – нормализованный разностный водный индекс; *CIGreen (Green Chlorophyll Index)* – относительный индекс хлорофилла и др. Они позволяют оценивать значения ряда показателей растительности при особенностях своего применения. Выбор индекса зависит от задач, поставленных в исследованиях. Важно учитывать, что один и тот же индекс может по-разному применяться для различных природных зон, так как вегетационная биомасса их территорий различается объемом и качеством. Для достижения поставленной цели все индексы были рассчитаны так, чтобы определить наиболее подходящий из них.

Статистический анализ данных проводился с использованием пакетов R, Python *statsmodels*. Данные пакеты статистических программ широко используются для выполнения статистических расчетов, в том числе для геоаналитики и цифрового моделирования геообъектов.

Результаты и их обсуждение

В работе был использован векторный слой с границами пашни – «Виды сельскохозяйственных культур 2021 г. Республики Татарстан», который разработан отделом геоинформационных систем акционерного общества «Республиканский информационно-вычислительный центр» Республики Татарстан (АО «РИВЦ») для производственных задач. Столбцы с данными включают: наименование муниципального района, площадь пашни и наименование возделываемой сельскохозяйственной культуры (рис. 4).

Для целей исследования слой с границами угодий был отредактирован. С помощью инструмента «Конструктор запросов» в пределах территорий исследуемых муниципальных районов были выделены области пашни, отвечающие запросу «Зерно», и удалены объекты, не отвечающие данному условию (рис. 5).

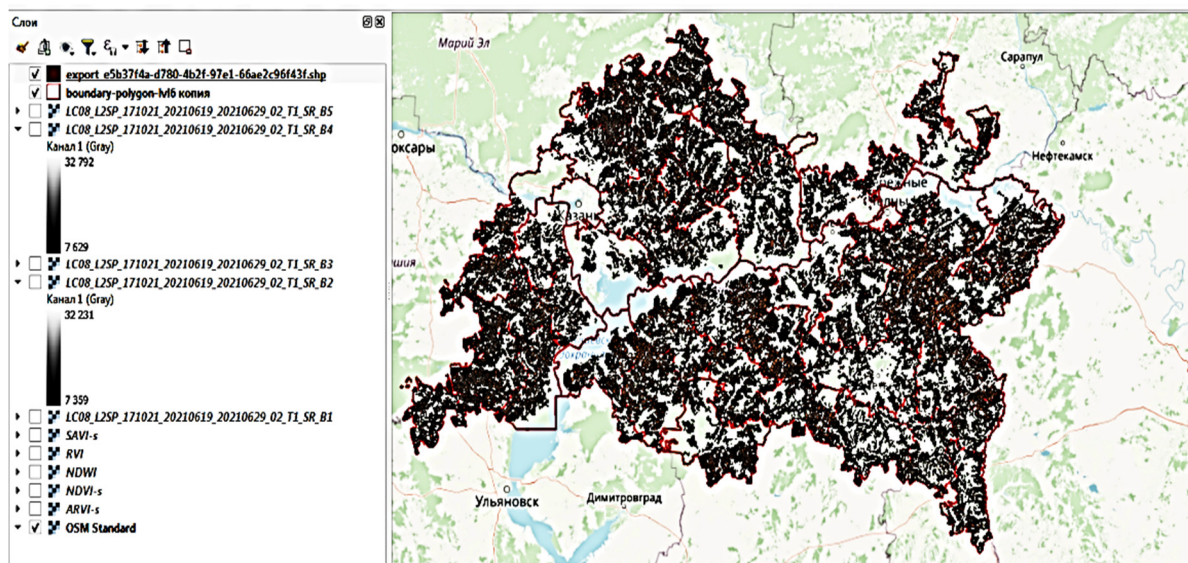


Рис. 4. Векторный слой «Виды сельскохозяйственных культур Республики Татарстан в 2021 году»
Fig. 4. Vector layer “Types of agricultural crops of the Republic of Tatarstan in 2021”

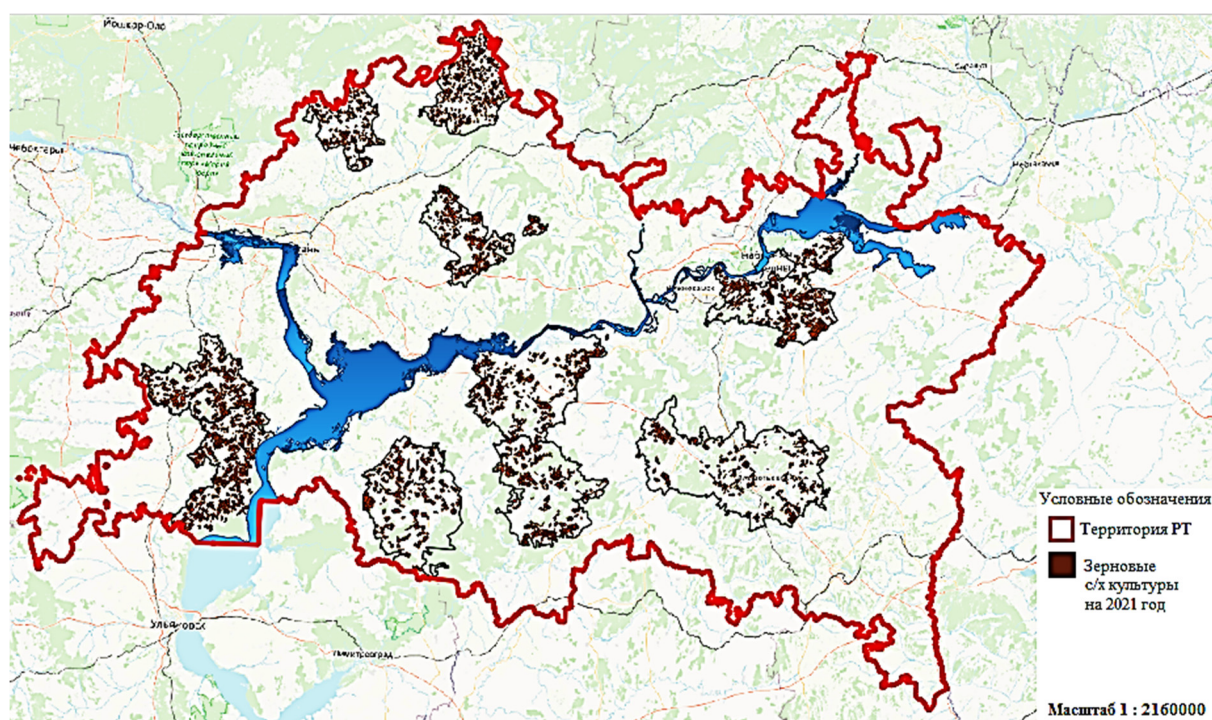


Рис. 5. Векторный слой с границами зерновых угодий на территории исследуемых районов по состоянию на 2021 год
Fig. 5. Vector layer with boundaries of grain lands on the territory of the studied areas as of 2021

Вегетационные индексы позволяют отслеживать динамику роста растений, определять фазы их развития, а также оценивать воздействие различных факторов, таких как климатические условия территории, доступность воды, почвенное питание и применение удобрений. В данном направлении уже долгое время ведутся зарубежные исследования. Отсутствие или невозможность получения высококачественных космических снимков земель сельскохозяйственного назначения до сих пор тормозит развитие данного направления в России.

В мире в настоящее время есть возможности получать и анализировать свыше 160 различных индексов на основе данных дистанционного зондирования Земли.

Для анализа состояния растительности на земной поверхности используются вегетационные индексы, получаемые с мультиспектральных каналов диапазонов волн, – красный (*RED*) или ближний инфракрасный (*NIR*). (*RED*) [Bannari et al., 1996; Henrich et al., 2009; Сабирзянов, 2015].

Изучение возможностей применения каждого из индексов для мониторинга сельскохозяйственных земель Татарстана привело к выводам, что лучшим с точки зрения цели исследования является индекс *SAVI*, поскольку он в большей степени учитывает влияние почвенного разнообразия на растительный покров.

Индекс *SAVI* был разработан в 1988 году [Huete, 1988] для количественного определения растительности на основе измерения разницы между ближним инфракрасным диапазоном и красным диапазоном при подавлении влияния пикселей почвы. Он является относительным индексом, который показывает точку пересечения изолиний при отражении в каналах красного диапазона (*Red*) и инфракрасного диапазона (*NIR*). Особенности коэффициента *SAVI* обуславливают предпочтительность его применения в регионах, отличающихся наличием нескольких почвенных зон [Коротков, Астапов, 2020]. Также по этому индексу можно выделить и изреженную растительность как на светлых, так и темных почвах из-за возможности эмпирического уточнения влияния фактора почвенного покрова.

Формула расчета индекса *SAVI*:

$$SAVI = ((NIR - Red) / (NIR + Red + L)) \times (1 + L),$$

где *NIR* = значения пикселей из ближнего инфракрасного канала; *Red* = значения пикселей из ближнего красного канала; *L* = значение покрытия зеленой растительности.

Для расчета индекса *SAVI* использовался показатель значения покрытия зеленой растительности *L*, равный 0,7.

В качестве объектов исследования роста и развития зерновых сельскохозяйственных культур были выбраны территории десяти муниципальных районов Республики Татарстан (РТ). Они относятся к четырем почвенным зонам региона, отражая разнообразие их почвенно-климатических условий и являясь своеобразными образцами, которые позволяют охарактеризовать условия зоны в целом. Распределение районов по почвенным зонам относительно равномерно. Так, Предкамье и Западное Закамье представлено в исследовании тремя районами, а Предволжье и Восточное Закамье – двумя. При выборе объектов также учитывалось место муниципального района в общем рейтинге урожайности зерновых культур [Министерство сельского хозяйства ..., 2023].

При помощи инструмента «Зональная статистика» геоинформационной системы *QGIS* по геоданным космических снимков были получены средние значения индекса *SAVI* для выбранных территорий муниципальных районов Республики Татарстан для различных дат вегетационного периода, когда наблюдаются максимальные значения индекса. Полученные значения индекса *SAVI* представлены на рис. 6 по почвенно-климатическим зонам республики. В скобках приведены рейтинги районов по производству сельскохозяйственной зерновой продукции в 2021 году. Период исследования охватывает 3 июня – 16 июля 2021 года.

По полученным данным изменения индекса *SAVI* провели анализ, который показал, что самый интенсивный рост и развитие зерновых культур в 2021 году происходил во второй декаде июля.

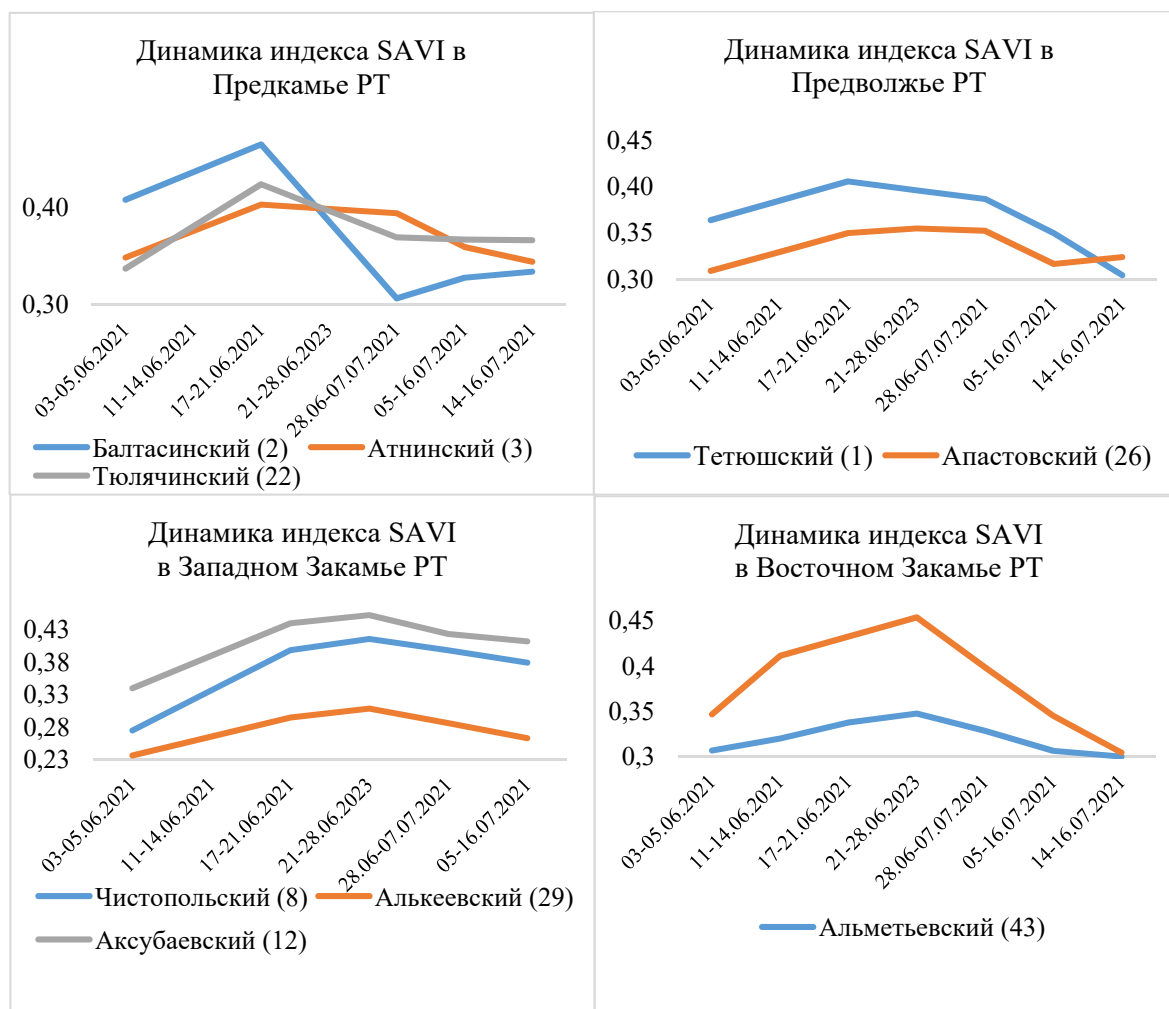


Рис. 6. Значения индекса SAVI для территорий муниципальных районов по почвенно-климатическим зонам Республики Татарстан в 2021 году
Fig. 6. SAVI index values for the territories of municipal districts by soil and climatic zones of the Republic of Tatarstan in 2021

Наибольший индекс *SAVI* был достигнут к 19 июня в условиях Балтасинского и Тетюшского муниципальных районов (0,4653), где были более благоприятные условия для роста и развития зерновых культур. При этом данные районы являются лидерами по сбору урожая зерновых в республике (занимают второе и первое места соответственно). Также это объясняется внесением достаточного количества минеральных и органических удобрений в этих районах. Исследования по внесенным удобрениям также имеют важное значение в нашей работе. Проведенные аналитические расчеты зависимости роста и развития зерновых культур (в том числе и анализ данных ДЗЗ) во всех исследуемых районах от почвенных и агрохимических факторов, которые выделены отдельным разделом наших исследований и которые также будут в скором времени опубликованы.

В 2021 году в западной части Татарстана максимальные показатели индекса *SAVI* в зонах Предкамья и Предволжья наблюдались в период 19–23 июня, а в восточной части республики в Западном Закамье пик индекса приходился на 28 июня, на Восточном Закамье – на 21 июня.

Результаты исследований подтверждают сильную взаимосвязь между вегетативным индексом *SAVI* и количеством накопленного хлорофилла в растениях, который отражается через индекс *CI_{Green}*. Таким образом, *SAVI* может рассматриваться как показатель фотосинтетической биомассы [Коротков, Астапов, 2020]. Кроме того, чем выше значение вегетационного индекса *CI_{Green}*, тем выше значение индекса растительности – *SAVI* (рис. 7).

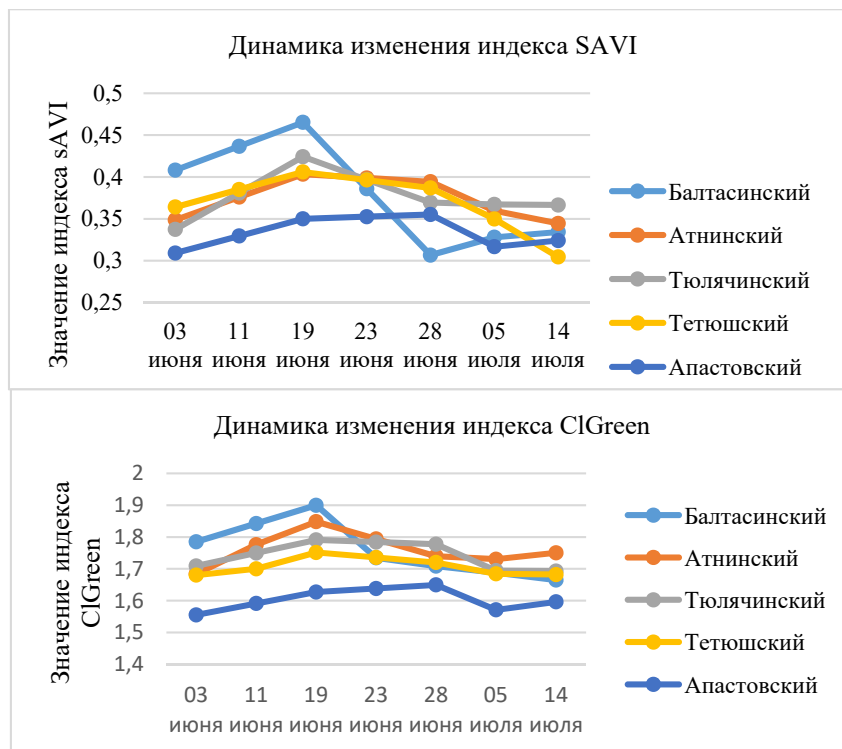


Рис. 7. Динамика изменения индексов *SAVI* и *CIGreen*
в почвенных зонах Предкамья и Предволжья Республики Татарстан
Fig. 7. Dynamics of changes in the *SAVI* and *CIGreen* indices in the soil zones
of the Pre-Kama and Pre-Volga regions of the Republic of Tatarstan

Корреляционно-регрессионный анализ на основе данных 2021 года (табл.) позволил выявить взаимосвязь между значениями индекса *SAVI* и показателем урожайности зерновых культур.

Индексы *SAVI* и средняя урожайность зерновых культур
для муниципальных районов Республики Татарстан в 2021 году
SAVI indices and average grain yield for municipal districts of the Republic of Tatarstan in 2021

Значения	Предкамье			Предволжье		Западное Закамье			Восточное Закамье	
	Балтасинский	Атнинский	Тюлячинский	Тетюшский	Апастовский	Чистопольский	Алькеевский	Аксубаевский	Альметьевский	Тукаевский
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x_i	0,4653	0,4034	0,4243	0,4061	0,3501	0,419	0,3051	0,4505	0,3478	0,4539
y_i	23,0	22,5	14,8	24,0	14,7	18,7	13,5	18,0	6,8	17,5

Приведенные в табл. значения: i – номер муниципального района исследования; x_i – значение индекса *SAVI*; y_i – средняя урожайность зерновых культур по официальным данным министерства сельского хозяйства и продовольствия РТ, ц/га.

Проведенный статистический анализ позволил сделать вывод о нелинейном характере зависимости между значениями индекса и урожайностью. Наибольшая теснота связи при значении коэффициента нелинейной парной корреляции, равном 0,9042, характерна для модели полиномиальной регрессии, где степень полинома равна 4. Уравнение регрессии имеет вид:

$$y = 1 \times 10^6 x^4 - 210^6 x^3 + 941474 x^2 - 239040 x + 22574$$

Значение коэффициента ранговой корреляции Спирмена, равное 0,8 ($p < 0,05$), показывает высокую тесноту связи между показателями индекса *SAVI* и урожайности. Сравнение линейной и различных нелинейных моделей зависимости показывает, что наибольшее значение коэффициента детерминации (R^2), равное 0,8176, т. е. наиболее высокая доля дисперсии зависимой переменной, объясняемая моделью, характерна для модели полиномиальной регрессии при степени полинома, равной 4. Это позволяет сделать вывод о в целом нелинейном характере зависимости между данными показателями. График уравнения регрессии представлен на рис. 4.

Таким образом, можно утверждать, что вегетационный индекс *SAVI* может применяться для анализа зависимости прогноза урожайности зерновых культур от значений данного индекса. График регрессионной модели зависимости пиковых значений данного индекса и средней урожайности зерновых культур региона, полученных в период начала фазы колошения и урожайности, представлен на рис. 8.

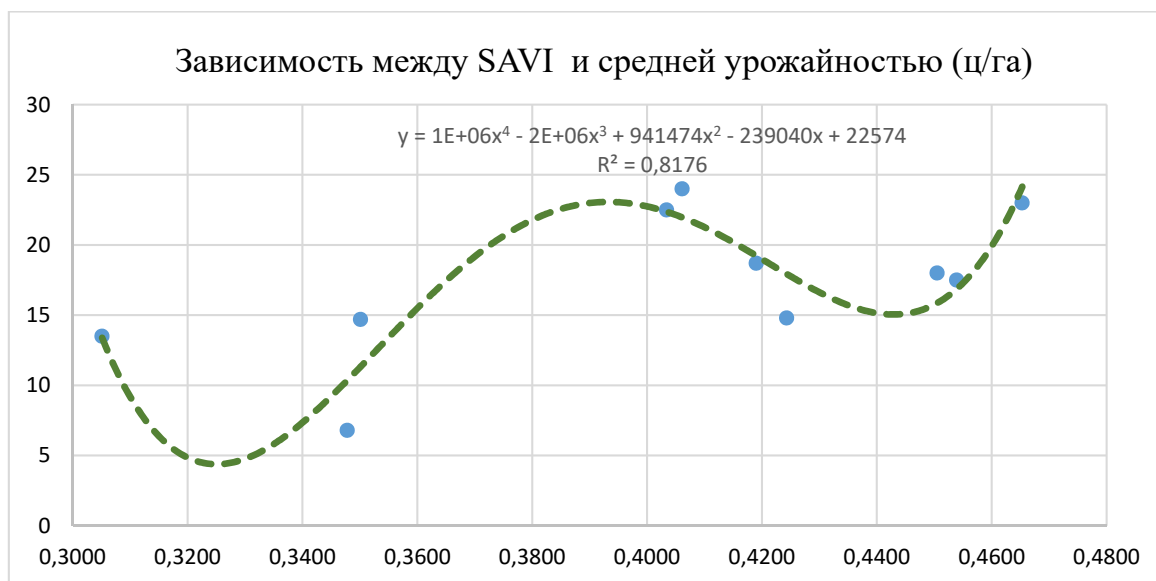


Рис. 8. График уравнения регрессионной модели зависимости между индексом *SAVI* и показателем средней урожайности

Fig. 8. Graph of the regression equation of relationship between the *SAVI* index and the average yield indicator

Для более точного прогнозирования достижения показателей урожайности изучаемых сельскохозяйственных культур необходимо также учитывать погодные условия и состояние плодородности почв, которые различаются в почвенных зонах региона [Сабирзянов, 2008; Береза и др., 2015; Белоусова, 2019].

С целью анализа влияния динамики погодных условий в каждой из исследуемых почвенных зон были проанализированы изменения средних дневных температур в активный период вегетации за июнь 2021 года (рис. 9).

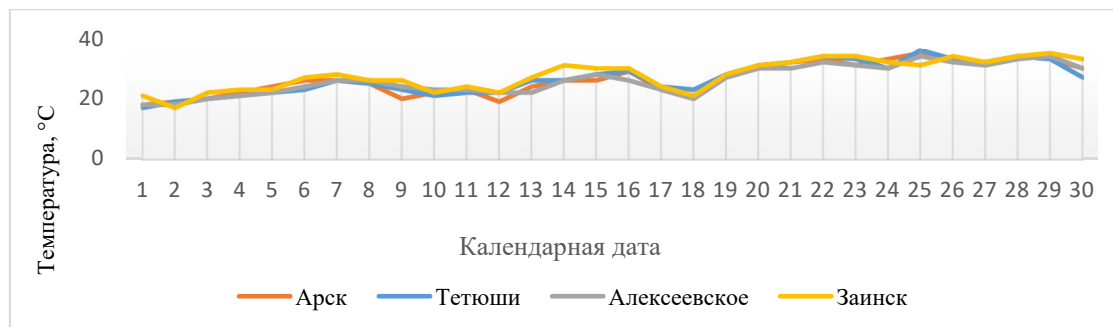


Рис. 9. Изменения средней дневной температуры воздуха в июне 2021 года
Fig. 9. Changes in the average daily air temperature in June 2021

Для исследования влияния температур на рост и развитие зерновых культур в почвенных зонах Республики Татарстан использовались данные метеорологических станций региона и литературные источники [Трошко и др., 2021]. Для муниципальных районов зоны Предкамья использовались данные метеостанции, расположенной в г. Арске, в Предволжье – данные метеостанции г. Тетюши. Температурные данные зоны Западного Закамья были получены с метеорологической станции пгт Алексеевское, Восточного Закамья – г. Заинска [Архив погоды Татарстан, 2023].

Проанализировав соответствие динамики значений индекса *SAVI* и динамики дневных температур в заданном периоде начала вегетации растений, можно сделать вывод о том, что достаточно высокие среднесуточные температуры, способствующие торможению роста и развития растений (для зерновых культур в первой половине июня 2021 года от 22,6 °C в Предкамье до 24,6 °C в Закамье), достоверно отражаются невысокими значениями индекса *SAVI*.

При температуре выше 24 °C фотосинтез замедляется, а с дальнейшим повышением температуры полностью прекращается [Кусова, 2017]. Это прямо отражается в данных, полученных с помощью космических снимков инфракрасного и красного диапазонов при подавлении влияния пикселей почвы.

Результаты исследования также позволили сделать вывод о том, что муниципальные районы Республики Татарстан, имеющие большее значение показателя индекса растительности *SAVI*, имеют меньшее значение показателя водного индекса на полях зерновых культур и, таким образом, меньшую достаточность увлажнения этих угодий.

Закключение

Данные мониторинга сельскохозяйственных угодий, проводимого на основе методов и технических средств дистанционного зондирования Земли, позволяют выявить и оценить связь между значениями вегетационных индексов и урожайностью зерновых культур в заданных почвенно-климатических условиях исследуемых территорий. Выводы могут быть получены на основе анализа серий космических снимков, полученных с мультиспектральных каналов – комбинаций каналов вегетационных индексов.

Почвенные условия территории Республики Татарстан отличаются разнообразием, что проявляется в наличии трех больших почвенных зон, характеризующихся неоднородностью почвенных показателей. Результаты исследования связи между значениями вегетационных индексов и урожайностью зерновых культур, полученные для различных почвенно-климатических условий территорий Республики Татарстан, показывают, что для всех почвенных зон наилучшие результаты в плане выявления связи с показателями урожайности результаты дает вегетационный индекс *SAVI*.

Существует прямая связь между данным индексом и количеством накопленного хлорофилла в растениях, находящихся в процессе роста. Увеличение данного индекса приводит и к увеличению значений вегетационного индекса *CIGreen*.

Достижение пиковых значений вегетационного индекса *SAVI* зависит от почвенных показателей, метеорологических условий, в том числе количества выпавших осадков и температуры воздуха. Среднемесячные индексы *SAVI*, полученные на основе данных дистанционного зондирования, с высокой степенью адекватности отражают состояние почвенных и погодных условий ведения сельскохозяйственной деятельности, в том числе количества выпавших осадков и температуры воздуха.

Проведенный статистический анализ позволил сделать вывод о высокой тесноте связи (коэффициент ранговой корреляции Спирмена, равный 0,8, при $p < 0,05$) между индексом *SAVI* и показателем средней урожайности зерновых культур для выборки территорий муниципальных районов, представляющих все почвенные зоны региона. Результаты регрессионного анализа зависимости позволили сделать выводы о нелинейной (полиномиальной) зависимости между значениями индекса *SAVI* и урожайностью.

Полученные результаты анализа зависимости между *SAVI* и средней урожайностью зерновых (в частности, значение $R^2 = 0,8176$ функции регрессии) подтверждают возможность прогноза урожайности зерновых культур на территориях муниципальных районов Республики Татарстан на основе данных о пиковых значениях вегетационного индекса *SAVI*. Проведенные исследования, в частности, показали, что почвенные зоны Предкамья и Предволжья, территории которых отличаются наиболее благоприятными почвенно-климатическими условиями для роста и развития зерновых культур, характеризуются относительно высокими значениями индекса *SAVI* и более высокой средней урожайностью зерновых культур по сравнению с территорией зоны Закамья.

Изучение соответствия динамики значений индекса *SAVI* и динамики дневных температур в период начала вегетации растений говорит о том, что относительно высокие (для зерновых культур в первой половине июня 2021 года от 22,6 °С в Предкамье, до 24,6 °С в Закамье) среднесуточные температуры вегетационного периода, способствующие торможению роста и развития растений, приводят к относительно невысоким значениям индекса *SAVI*.

Результаты исследования позволили сделать вывод о том, что территории муниципальных районов Республики Татарстан, имеющие большее значение показателя индекса растительности *SAVI*, имеют меньшее значение показателя водного индекса для полей зерновых культур и, таким образом, меньшую достаточность их увлажнения.

Мониторинг урожайности зерновых культур, проводимый на основе ГИС-технологий и технологий дистанционного зондирования Земли, позволяет на основе полученных геоданных, включающих почвенные и погодные условия территорий, состояние роста и развития посевов зерновых культур, провести развернутый анализ спектра вегетационных индексов в плане их возможностей для выявления закономерностей роста и развития сельскохозяйственных культур в различных почвенно-климатических условиях территорий региона. Это создает предпосылки для решения задач оперативного прогнозирования урожайности зерновых культур, способствуя повышению качества результатов прогнозирования и эффективности зернового хозяйства региона.

В исследовании использовались предоставленные отделом геоинформационных систем акционерного общества «Республиканский информационно-вычислительный центр» Республики Татарстан (АО «РИВЦ») слои и материалы, которые упростили работу по выборке полей с зерновыми культурами, а также аналитические материалы Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Татарстан. Коллектив авторов выражает работникам этих организаций благодарность за сотрудничество. Желаем вам успехов и новых достижений в развитии цифровизации агропромышленного комплекса республики.

Список источников

- Архив погоды: Татарстан. Погода и климат. Электронный ресурс. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php?id=ru®ion=16> (дата обращения 07.04.2023).
- География Татарстана. 1994. Казань, Магариф, 142 с.
- Кусова Н.В. 2017. Развитие зернового хозяйства. Орел, Орловская областная научная универсальная публичная библиотека им. И.А. Бунина, 36 с.
- Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Татарстан. Правительство РТ. Электронный ресурс. URL: <https://agro.tatarstan.ru/> (дата обращения 17.02.2023).
- Сулейманова Г.В. 2014. География Республики Татарстан. Казань, Казанский национальный исследовательский технологический университет, 322 с.
- Учебное пособие QGIS. QGIS documentation. Электронный ресурс. URL: https://docs.qgis.org/3.28/ru/docs/training_manual (дата обращения 12.04.2023).
- Earth Explorer. USGS. Electronic resource. URL: <http://earthexplorer.com/> (date of the application 08.04.2023).
- Index: Transformed NDVI. Electronic resource. URL: <https://www.indexdatabase.de/db/i-single.php?id=202> (date of the application 20.10.2023).

Список литературы

- Белоусова А.П. 2019. Применение вегетационных индексов при анализе использования пахотных угодий (на примере Уинского района Пермского края). Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий, 24(4): 208–218. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2019-24-4-208-218>.
- Бережа О.В., Страшная А.И., Лупян Е.А. 2015. О возможности прогнозирования урожайности озимой пшеницы в Среднем Поволжье на основе комплексирования наземных и спутниковых данных. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 12(1): 18–30.
- Долина К.В. 2023. Применение геоинформационных технологий и данных дистанционного зондирования Земли для выявления особенностей роста и развития сельскохозяйственных культур в различных почвенно-климатических условиях на территории Республики Татарстан. Магистерская диссертация по направлению 05.04.03 «Картография и геоинформатика. Казань, КФУ, 97 с.
- Ерошенко Ф.В. 2017. Оценка качества зерна озимой пшеницы в Ставропольском крае по данным дистанционного зондирования Земли. Бюллетень Ставропольского научно-исследовательского института сельского хозяйства, 9: 118–128.
- Коротков А.А., Астапов А.Ю. 2020. Вегетационный индекс NDVI для мониторинга растительности. Наука и образование, 3(3): 131–140.
- Раджабова Р.Т., Алексеенко Н.А., Курамагомедов Б.М., Тажудинова З.Ш., Султанов З.М. 2020. Использование индексных изображений при дешифрировании растительного покрова Внутригорного Дагестана. Юг России: экология, развитие, 15(4(57)): 126–136. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2020-4-126-136>.
- Сабирзянов А.М. 2008. Формирование урожая яровой пшеницы в зависимости от использования факторов химизации в условиях Предкамья Республики Татарстан. Автореф. дис. ... канд. сельскохозяйств. наук. Казань, 20 с.
- Сабирзянов А.М. 2015. Применение дистанционного зондирования для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур (на примере Нурлатского муниципального района Республики Татарстан). Землеустройство, кадастр и мониторинг земель, 4(124): 36–39.
- Трошко К.А., Денисов П.В., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А. 2021. Особенности состояния зерновых культур в регионах европейской части России и Сибири в июне 2021 г. по данным дистанционного мониторинга. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 18(3): 325–331. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-325-331>.
- Bannari A., Morin D., Bonn F., Huete A.R. 1996. A Review of Vegetation Indices. Remote Sensing Reviews, 13(1–2): 90–120. <https://doi.org/10.1080/02757259509532298>.



- Henrich V., Götze E., Jung A., Sandow C., Thürkow D., Gläßer C. 2009. Development of an Online Indices Database: Motivation, Concept and Implementation. In: Proceedings of the 6th EARSeL Imaging Spectroscopy Sig Workshop Innovative Tool for Scientific and Commercial Environment Applications. Israel, Tel Aviv: 16–18.
- Huete A.R. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 25(3): 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).

References

- Belousova A.P. 2019. Application of Vegetation Indexes in the Analysis of Arable Land Use (on the Example of Uinsky District of Perm Krai). Bulletin of Siberian State University of Geosystems and Technologies, 24(4): 208–218 (in Russian). <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2019-24-4-208-218>.
- Bereza O.V., Strashnaya A.I., Lupyan E.A. 2015. On the Possibility to Predict the Yield of Winter Wheat in the Middle Volga Region on the Basis of Integration of Land and Satellite Data. Current Problems in Remote Sensing of the Earth From Space, 12(1): 18–30 (in Russian).
- Dolina K.V. 2023. Primeneniye geoinformatsionnykh tekhnologiy i dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli dlya vyavleniya osobennostey rosta i razvitiya selskokhozyaystvennykh kultur v razlichnykh pochvenno-klimaticheskikh usloviyakh na territorii Respubliki Tatarstan [Application of Geoinformation Technologies and Earth Remote Sensing Data to Identify the Characteristics of the Growth and Development of Agricultural Crops in Various Soil and Climatic Conditions on the Territory of the Republic of Tatarstan]. Master's thesis in the direction 05.04.03 "Cartography and geoinformatics". Kazan, Publ. KFU, 97 p.
- Eroshenko F.V. 2017. Ocenka kachestva zerna ozimoy pshenicy v Stavropol'skom krae po dannym distancionnogo zondirovaniya Zemli [Assessment of Winter Wheat Grain Quality in the Stavropol Territory Based on Earth Remote Sensing Data]. Byulleten' Stavropol'skogo nauchno-issledovatel'skogo instituta sel'skogo khozyajstva, 9: 118–128.
- Korotkov A.A., Astapov A.Yu. 2020. Vegetation Index NDVI for Vegetation Monitoring. The Education and Science Journal. 3(3): 131–140 (in Russian).
- Radzhabova R.T., Alekseenko N.A., Kuramagomedov B.M., Tazhudinova Z.Sh., Sultanov Z.M. 2020. The Use of Index Images for Decoding the Vegetation Cover of Inner Mountain Dagestan, Russia. South of Russia: ecology, development, 15(4(57)): 126–136 (in Russian). <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2020-4-126-136>.
- Sabirzyanov A.M. 2008. Formirovaniye urozhaya yarovoy pshenitsy v zavisimosti ot ispolzovaniya faktorov khimizatsii v usloviyakh Predkamia Respubliki Tatarstan [Formation of Spring Wheat Harvest Depending on the Use of Chemicalization Factors in the Conditions of the Cis-Kama Region of the Republic of Tatarstan]. Abstract dis. ... cand. agric. sciences. Kazan, 20 p.
- Sabirzyanov A.M. 2015. Application of Remote Sensing for Forecasting Crop Yields (on the Example of the Nurlatsky Municipal District of the Republic of Tatarstan). Land management, cadastre and land monitoring, 4(124): 36–39 (in Russian).
- Troshko K.A., Denisov P.V., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Tolpin V.A. 2021. The State of Grain Crops in the European Part of Russia and Siberia in June 2021 Based on Remote Sensing Data. Current Problems in Remote Sensing of the Earth From Space, 18(3): 325–331. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-325-331>
- Bannari A., Morin D., Bonn F., Huete A.R. 1996. A Review of Vegetation Indices. Remote Sensing Reviews, 13(1–2): 90–120. <https://doi.org/10.1080/02757259509532298>.
- Henrich V., Götze E., Jung A., Sandow C., Thürkow D., Gläßer C. 2009. Development of an Online Indices Database: Motivation, Concept and Implementation. In: Proceedings of the 6th EARSeL Imaging Spectroscopy Sig Workshop Innovative Tool for Scientific and Commercial Environment Applications. Israel, Tel Aviv: 16–18.
- Huete A.R. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 25(3): 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).

*Поступила в редакцию 07.11.2023;
поступила после рецензирования 22.12.2023;
принята к публикации 27.01.2024*

*Received November 07, 2023;
Revised December 22, 2023;
Accepted January 27, 2024*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сабирзянов Алмаз Мансурович, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры географии и картографии, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань, Россия

Панасюк Михаил Валентинович, доктор географических наук, профессор кафедры географии и картографии, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань, Россия

Аширбеков Шынболат Уланович, аспирант кафедры географии, ФГБОУ ВО Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Almaz M. Sabirzyanov, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Geography and Cartography, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

Mikhail V. Panasyuk, Doctor of Geographical Sciences, Professor of the Department of Geography and Cartography, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

Shynbolat U. Ashirbekov, Postgraduate student of the Department of Geography, Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia