

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-2-142-157>

УДК 551.577.38:551.501.86

Оценка возможности использования спутниковой информации для мониторинга засух на территории южных регионов России

А.Д. Клещенко, О.В. Савицкая

*Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной
метеорологии, г. Обнинск, Россия
cxm-dir@obninsk.ru*

Приводится краткое описание разработанной и функционирующей в ЦМЗ ФГБУ «ВНИИСХМ» автоматизированной оперативной системы подекадного мониторинга засух, созданной на основе использования метеорологической информации с сети метеостанций. Для получения более детальной информации о распределении засух по территории предлагается наряду с наземной использовать спутниковую информацию (сканер VIIRS спутника SUOMI NPP). С этой целью предлагается калибровать спутниковую информацию (индекс VCI) по наземным данным (индекс ГТК) с использованием тестовых участков, расположенных вблизи метеорологических станций. Приведены расчёты оценки засушливости для территории рассматриваемых федеральных округов с использованием предложенного метода. Отмечена удовлетворительная сходимость с данными, полученными по наземной информации. Планируется доработать предложенную процедуру до оперативного применения.

Ключевые слова: засуха, спутниковая информация, NDVI, VCI, гидротермический коэффициент Селянинова, калибровочные кривые

Assessment of the possibility of using satellite information for monitoring droughts in the southern regions of Russia

A.D. Kleshchenko, O.V. Savitskaya

*All-Russian Research Institute of Agricultural Meteorology, Obninsk, Russia
cxm-dir@obninsk.ru*

A brief description of the automated operational system for 10-day monitoring of droughts developed and operating at the Drought Monitoring Center of the All-Russian Research Institute of Agricultural Meteorology is provided. The system uses meteorological information from the network of weather stations. To obtain more detailed information on the spatial distribution of droughts, it is proposed to use satellite information (VIIRS scanner of the SUOMI NPP satellite) along with ground-based data. For this purpose, it is proposed to calibrate satellite information (VCI index) based on ground information (HTC index) using test sites located near weather stations. Calculations of the aridity assessment for the territory of the considered federal districts using the proposed method are presented. Satisfactory convergence with the data obtained from ground information is observed. It is planned to refine the proposed procedure to operational application.

Keywords: drought, satellite information, NDVI, VCI, Selyaninov hydrothermal coefficient, calibration curves

Введение

Зерновое производство Российской Федерации, в силу географического положения ее территории, подвержено воздействию различных гидрометеорологических опасных явлений. Среди них засуха – одно из главных неблагоприятных явлений, повсеместно проявляющееся на территории России. Особенно страдают от этого явления южные и центральные регионы – Южный и Северо-Кавказский федеральные округа, юг Центрального, Приволжского, Уральского и юго-запад Сибирского федеральных округов. Однако следует признать, что в последние годы ареал распространения засух существенно продвинулся к северу.

Учитывая катастрофические последствия воздействия засух, большое значение приобретают методы ранней диагностики и мониторинга этого явления. Этим вопросам уделяется большое внимание как у нас в стране, так и во многих странах мира, подверженных воздействию этого опасного явления [2, 3, 5, 10, 11]. Для оценки появления засухи, ее интенсивности и ареала распространения, как правило, используется гидрометеорологическая информация, полученная на сети наземных станций и постов. В последние годы для этих целей используется спутниковая информация, полученная радиометрами в различных участках спектра.

Несмотря на большое количество исследований, направленных на оценку возможности использования спутниковой информации для мониторинга засух, методов практического применения не так много. Целью статьи является представить краткое описание функционирующей в Центре мониторинга засух (ЦМЗ) ФГБУ «ВНИИСХМ» автоматизированной оперативной системы оценки засух (АОСОЗ) по наземной метеорологической информации, а также показать возможность оценки атмосферной засухи на основе комплексирования наземной и спутниковой информации. Исследования проводились для территорий Южного и Северо-Кавказского федеральных округов.

1. Наземная автоматизированная оперативная система оценки засух

В научной литературе известны десятки показателей (индексов) для оценки засух. Достаточно полно они представлены в справочнике по показателям и индексам засушливости ВМО [6]. В нем также указано, что по использованию вида информации индексы могут быть разделены на следующие категории: метеорологические; индексы, характеризующие почвенную влагу и состояние растительности; гидрологические и спутниковые.

Для характеристики атмосферной засухи, о которой идет речь в этой статье, в основном используются метеорологические индексы и индексы дистанционного зондирования. Метеорологические индексы рассчитываются с использованием в основном количества осадков, дефицита влажности воздуха, температуры воздуха и испаряемости и др.

Несмотря на большое количество индексов, все они близки по своей физической сути, заключающейся в оценке соотношения между приходом и расходом влаги.

Спутниковые вегетационные индексы представляют собой линейные или дробно линейные комбинации значений сигналов в разных диапазонах спектра, большинство из них используют соотношение значений в красном и ближнем инфракрасном диапазонах. Это обусловлено тем, что зеленая растительность поглощает электромагнитные волны в видимом красном диапазоне и отражает их в ближнем инфракрасном. Значения коэффициентов спектральной яркости, получаемые в этих участках спектра, и особенно различные их соотношения (сочетания), оказались весьма информативны при оценке различных характеристик растительности (биомасса, площадь листовой поверхности, фаза развития и др.). Эта информация оказалась весьма полезной также при оценке засушливости.

Во ВНИИСХМ, Гидрометцентре России и других научных учреждениях проведены исследования по разработке методов оценки атмосферной и почвенной засух, их ранней диагностики и влияния на состояние посевов сельскохозяйственных культур [2, 3, 7]. Проведенные исследования послужили основой для создания во ВНИИСХМ АОСОЗ с использованием наземной метеорологической информации [2]. Наземная метеорологическая информация получена по данным наблюдений на гидрометеорологических станциях Росгидромета. Эта информация поступает во ВНИИСХМ из программного комплекса обработки гидрометеорологической информации для оперативно-прогностических учреждений Росгидромета PROMETEI.

В АОСОЗ в качестве индикаторов засухи на первом этапе использовались следующие показатели: гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК); показатель увлажнения Шашко; показатель влагообеспеченности Процорова; число дней с относительной влажностью воздуха $\leq 30\%$; число дней с максимальной температурой воздуха $> 30^\circ\text{C}$; запасы продуктивной влаги в слое почвы 0–20, 0–50 и 0–100 см под озимыми, ранними яровыми и поздними яровыми культурами.

На основе результатов исследований и опыта работ по оценке засух во ВНИИСХМ было предложено для мониторинга атмосферной засухи использовать ГТК и показатель увлажнения Шашко [2]. ГТК и показатель увлажнения Шашко (Md) рассчитываются по следующим формулам:

$$ГТК_i = \frac{\sum R_{[i+(i-1)+(i-2)]}}{0,1 \sum T_{>10^\circ C [i+(i-1)+(i-2)]}}, \quad (1)$$

где i – номер оцениваемой декады; $i-1$ – номер декады, предшествующей на одну декаду оцениваемой; $i-2$ – номер декады, предшествующей на две декады оцениваемой; $\sum R$ – сумма осадков, мм; $\sum T_{>10^\circ\text{C}}$ – сумма температур воздуха 10°C и выше.

$$Md_i = \frac{\sum R_{[i+(i-1)+(i-2)]}}{\sum d_{[i+(i-1)+(i-2)]}}, \quad (2)$$

где $\sum d$ – сумма значений парциального давления водяного пара в воздухе, гПа.

С целью проведения ежедекадного оперативного мониторинга засух на территории России и некоторых стран СНГ, в 2002 г. Росгидрометом на основе решения Межгосударственного Совета по гидрометеорологии СНГ при ВНИИСХМ был создан Центр мониторинга засух. С 2008 г. в ЦМЗ ведется регулярный ежедекадный мониторинг атмосферных и почвенных засух с помощью АОСОЗ с мая по сентябрь. Мы не будем останавливаться на подробном описании алгоритма работы системы, с ним можно ознакомиться в [2], рассмотрим выходную продукцию, которая формируется в результате работы системы.

Ежедекадно с мая по сентябрь формируется бюллетень, включающий следующие материалы: таблицы с характеристиками и показателями засух, оценками интенсивности и продолжительности засух, обзоры особенностей распределения засушливых явлений и засух по территории Российской Федерации и отдельных стран СНГ, картосхемы распределения засушливых явлений и засух по территории Российской Федерации и отдельных стран СНГ. Для примера оценки динамики на рис. 1 показаны карты районов, охваченных атмосферной засухой по территории России, за третью декаду мая, третью декаду июня, третью декаду июля и третью декаду августа 2023 года.

Полученные материалы представляются в МСХ и МЧС России, Росгидромет, Гидрометцентр России, в ряд управлений по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета и страховые фирмы.

2. Метод мониторинга засух на основе комплексирования наземной и спутниковой информации

Следует отметить, что представленные выше результаты мониторинга получены на основе наземной метеорологической информации. Как известно, в отдельных регионах плотность сети метеорологических станций недостаточна для получения более детальной информации. Как было сказано выше, в этом случае представляется целесообразным при проведении мониторинга засух подключать спутниковую информацию. Ее основными преимуществами являются большая частота наблюдений, высокая обзорность. Современные спутники позволяют получать единовременную съемку на огромных площадях.

Возможность использования спутниковой информации для мониторинга засух основана на связях состояния растительности с ее спектральной отражательной способностью.

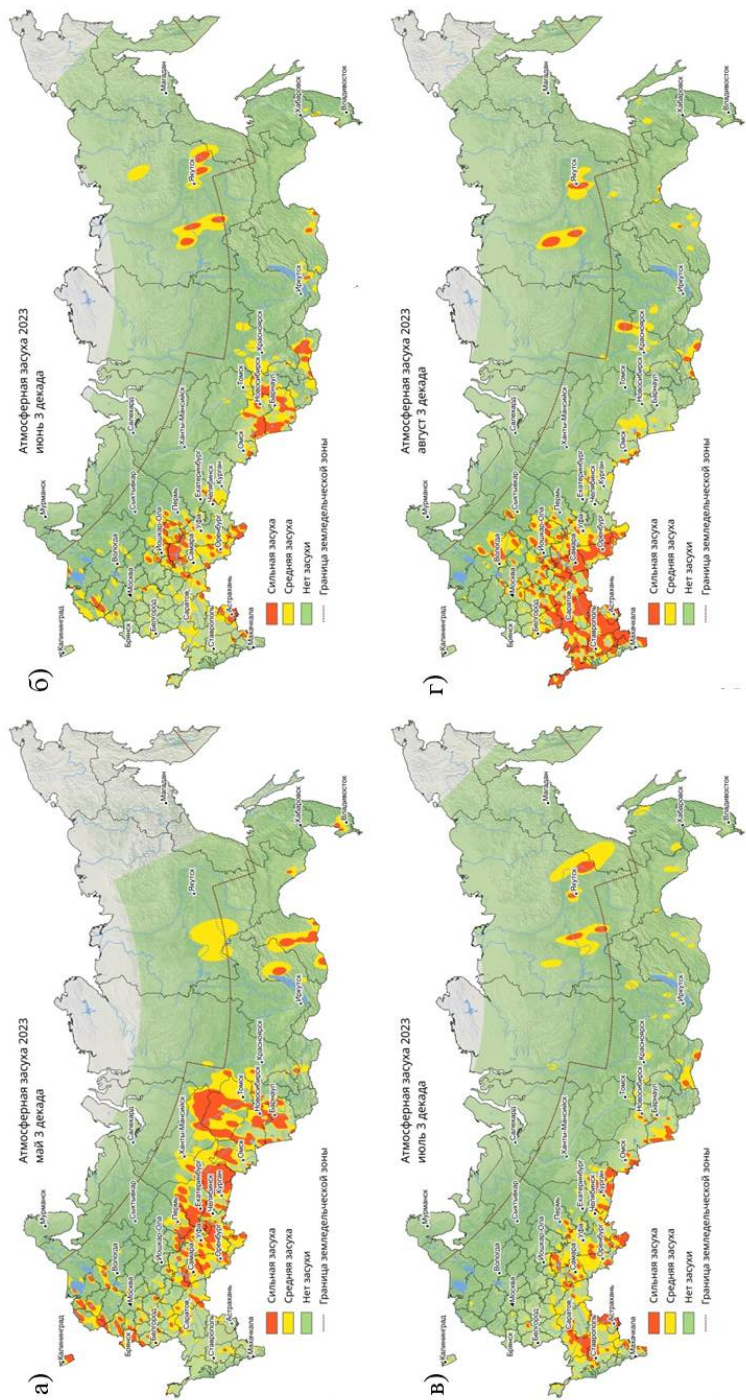


Рис. 1. Атмосферная засуха на территории России за третью декаду мая (а), третью декаду июня (б), третью декаду июля (в) и третью декаду августа (г) 2023 г.
Fig. 1. Atmospheric drought in Russia for the third decade of May (а), the third decade of June (б), the third decade of July (в) and the third decade of August (г) 2023.

По спутниковым снимкам в различных спектральных диапазонах рассчитываются вегетационные индексы, характеризующие состояние растительности. Как было сказано выше, расчет большинства из этих индексов основан на соотношении значений в двух спектральных участках: красном и ближнем инфракрасном. В красной зоне спектра приходится максимум поглощения солнечной радиации, в ближней инфракрасной зоне отмечается максимальное ее отражение. Получая карту распределения вегетационных индексов по территории, используя методы интерпретации (перехода, перевода, калибровочных кривых), можно получить определенную оценку состояния растительности или условий роста и развития растительности (например, засушливость) в этот период. Поэтому процедура перевода вегетационных индексов играет большую роль при интерпретации спутниковой информации.

2.1. Процедура построения калибровочных зависимостей между вегетационным индексом и наземным показателем

Подход, рассматриваемый в этой статье, заключается в применении процедуры построения калибровочных зависимостей между вегетационными индексами и наземным показателем, достаточно хорошо характеризующим условия засушливости, с использованием тестовых участков, расположенных вблизи метеорологических станций.

В качестве наземного показателя использовался ГТК [4]. ГТК является индикатором температурно-влажностного режима и условно показывает баланс между приходом влаги (выпадением осадков) и ее расходом – испарением, характеризующимся тепловыми условиями (температура воздуха). ГТК хорошо себя зарекомендовал в агрометеорологической практике при мониторинге засух.

В качестве спутникового индекса использовался индекс состояния растительности VCI (Vegetation Condition Index – индекс условий вегетации), предложенный Ф. Коганом [9]. VCI является производным от индекса NDVI (Normalized difference vegetation index – нормализованный относительный индекс растительности). NDVI определяется как разница между измеренными значениями интенсивности отраженного излучения в красном и ближнем инфракрасном диапазонах спектра, нормализованная на сумму этих значений. VCI рассчитывается по следующей формуле:

$$VCI_j = \frac{NDVI_j - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $NDVI_j$ – значение NDVI для даты j ; $NDVI_{\max}$ – значение максимальных NDVI внутри всего набора данных; $NDVI_{\min}$ – значение минимальных NDVI внутри всего набора данных; j – дата.

Для хранения и обработки метеорологической и спутниковой информации на основе СУБД SQLite была создана база данных. Она содержит

оперативные ежедневные метеорологические, агрометеорологические данные и ежедневные спутниковые индексы NDVI, VCI.

VCI оказался востребованным как для оценки состояния растительности, так и для мониторинга засух [8]. Значения VCI варьируют от 0 до 100 %, отражая изменения погодных условий вегетации от сухих до влажных.

В работе для расчета VCI использовались безоблачные композитные изображения, подготавливаемые в ФГБУ «НИЦ «Планета» на основе данных сканера VIIRS спутника SUOMI NPP и представляемые во ВНИИСХМ. Безоблачные композиты составлены из фрагментов снимков с пространственным разрешением 375 м за десятидневный период и представляют собой цифровые массивы информации, полученной по четырем спектральным каналам (в красном, ближнем инфракрасном, среднем инфракрасном и длинноволновом инфракрасном).

По информации в красном и ближнем инфракрасном каналах рассчитывается вегетационный индекс NDVI. Расчет спутниковых индексов NDVI и VCI осуществляется только для тех пикселей изображения, которые относятся к пахотным землям. Для выявления пашни использовалась маска классификации подстилающей поверхности, полученная по данным радиометра MODIS в Международном координационном комитете по глобальному картографированию (International Steering Committee for Global Mapping) [<http://globalmaps.github.io>]. В этом исследовании подстилающая поверхность была разбита на 20 классов. В соответствии с этой маской VCI рассчитывается для классов «пахотные угодья», «рисовые поля», «пашня или мозаика прочей растительности». Период расчета составлял 7 лет с 2017 по 2023 год. Расчеты проводились с первой декады мая по третью декаду сентября.

Для увеличения объема выборки и наиболее точного определения минимального и максимального значений NDVI, данные субъектов в пределах федерального округа объединялись в общий массив. Эта процедура особенно актуальна в начале (май) и в конце (сентябрь) исследуемого периода. В эти месяцы вероятность развития засухи в большинстве регионах меньше, чем летом. Если определять минимальное значение NDVI за 7-летний период для пикселя, то высока вероятность, что на этом участке засухи могло и не быть, поэтому минимальное значение будет завышено и не будет соответствовать засушливым условиям. Из-за некорректного выбора минимального значения NDVI расчет индекса VCI также будет не точным. Объединение субъектов в общий массив позволяет минимизировать вероятность такой ошибки.

После попиксельного расчета VCI проводился сравнительный анализ между индексами VCI и ГТК. Поскольку значения ГТК доступны только для территорий, на которых расположены метеостанции, для проведения

сравнительного анализа необходимо было получить значения VCI вблизи этих территорий. Для этого были выбраны тестовые участки, характеризующие близлежащую территорию около этих метеостанций, и производилось осреднение спутниковых индексов VCI на участках различных размеров, соответствующих 11×11, 31×31, 51×51, 75×75, 101×101 пикселей. В ходе тестирования программы был выбран участок с размером 11×11 пикселей, показавший наилучший результат соответствия с наземными данными. Следует отметить, что подобный подход достаточно успешно был использован на территории Казахстана для оценки состояния растительности и засушливости в отсутствии наземных данных [5].

2.2. Анализ результатов расчетов

После расчета VCI для каждой метеостанции проводился анализ сравнительной динамики интегральных индексов ГТК и VCI за период с 2017 по 2023 год. Для получения интегрального индекса VCI, для каждого года и для каждой станции проведено подекадное суммирование значений VCI за период с первой декады мая по третью декаду сентября. Аналогичный расчет выполнен для ГТК. Для примера на рис. 2 показана сравнительная динамика интегральных значений ГТК и VCI для метеостанций, расположенных на территории Южного федерального округа: Фролово, Городовиковск, Миллерово, Отрадная. Аналогичные графики построены для всех исследуемых метеорологических станций.

Как видно из графиков, наблюдается достаточно хорошее совпадение хода рассматриваемых интегральных индексов. Это свидетельствует о возможности использования VCI как индикатора при мониторинге засух. С этой целью было необходимо найти количественную зависимость между VCI и ГТК. Для этого проводилось построение калибровочных кривых между VCI и ГТК, на основе которых возможно определить диапазоны значений VCI и соотнести их с тремя градациями засух: сильная засуха, средняя засуха и нет засухи. Для каждой декады и набора субъектов в пределах федерального округа строилась своя калибровочная кривая, что позволило учесть изменчивость засухи как во времени, так и в пространстве.

Для учета агроклиматических условий и увеличения выборки данные с метеостанций в пределах федерального округа объединялись в общий массив. Также проводился анализ по идентификации и фильтрации статистических выбросов в наборе данных. Точки, которые значительно отличались от других наблюдений и их стандартизированные остатки выходили за пределы диапазона от -2 до 2, классифицировались как выбросы. Для примера, на рис. 3 показан график зависимости между VCI и ГТК для метеостанций, расположенных на территории Южного федерального округа для третьей декады июня и Северо-Кавказского федерального округа для первой декады июля с 2017 по 2023 год.

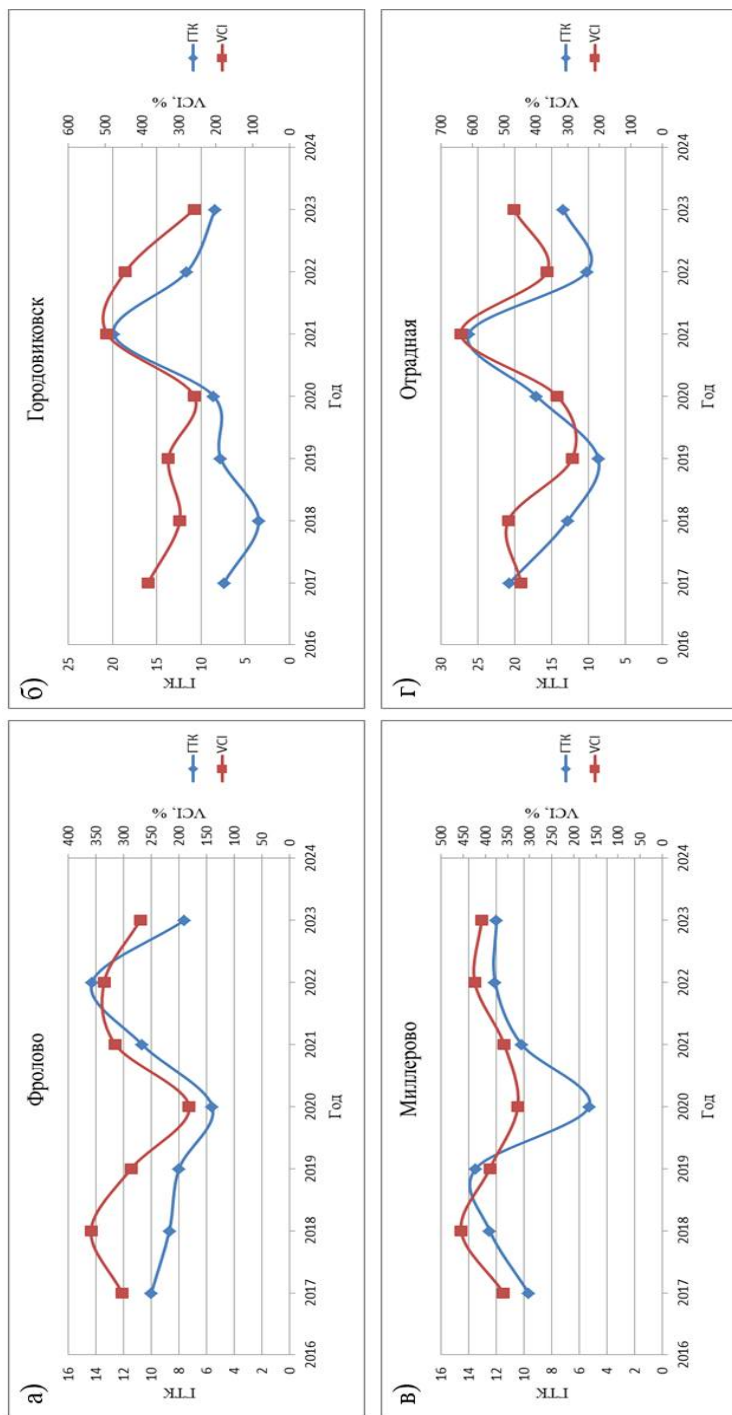


Рис. 2. Сравнительная динамика интегральных ГТК и VCI для метеостанций Фролово (а), Городовиовск (б), Миллерово (в), Отрадная (г) за период с 2017 по 2023 г.

Fig. 2. Comparative dynamics of integral HTC and VCI for the meteorological stations Frolovo (a), Gorodovikovsk (б), Millerovo (в), Otradnaya (г) for the period from 2017 to 2023.

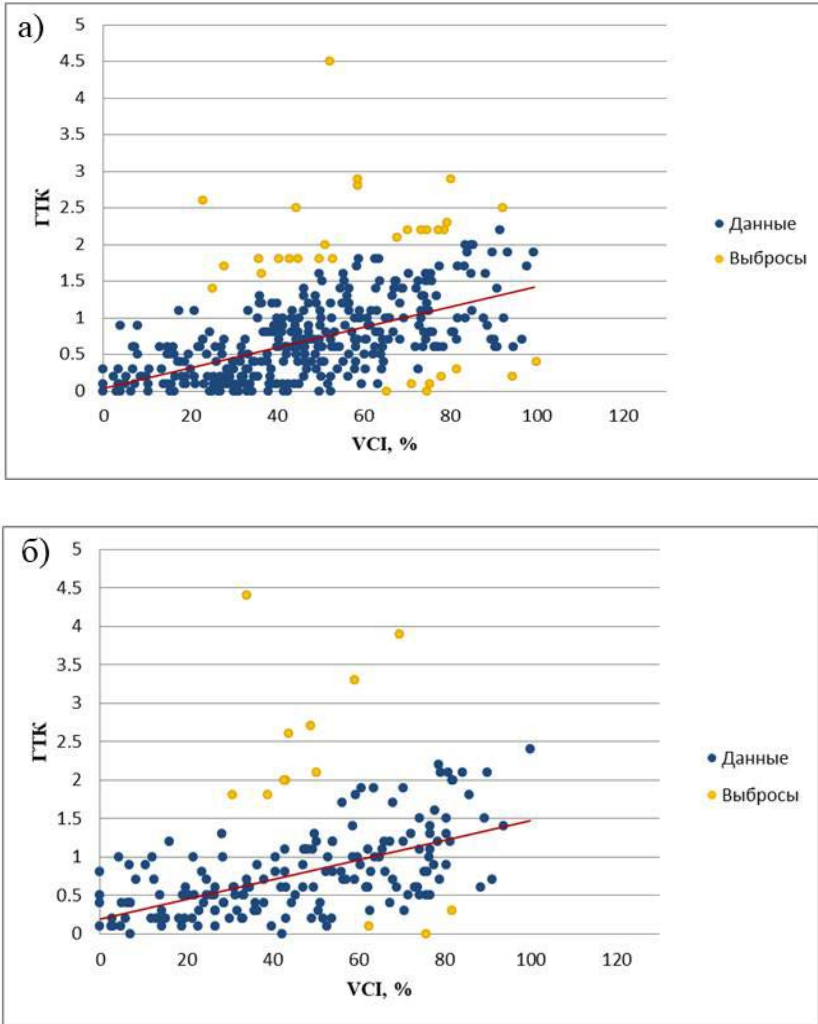


Рис. 3. График зависимости между VCI и ГТК для метеостанций, расположенных на территории Южного федерального округа, для третьей декады июня (а) и Северо-Кавказского федерального округа для первой декады июля (б) с 2017 по 2023 г.

Fig. 3. Graph of the relationship between VCI and HTC for meteorological stations located on the territory of the Southern Federal District for the third decade of June (a) and the North Caucasus Federal District for the first decade of July (б) from 2017 to 2023.

Из графиков видно, что данные выстраиваются в линейную зависимость, при этом коэффициент корреляции составляет 0,64 и 0,62 соответственно.

Аналогичные графики построены для всех исследуемых декад и рассматриваемых федеральных округов. В результате анализа графиков было выявлено, что наилучшим образом описывает зависимость между ГТК и VCI уравнение регрессии без свободного члена, проходящее через начало координат, поскольку нулевое значение VCI соответствует стрессовому состоянию растительности, которое наступает при крайней степени засухи, что соответствует значению ГТК, равному нулю.

Анализ калибровочных кривых, полученных за вегетационный период, показал, что в большинстве случаев наиболее точные калибровочные зависимости были получены в летний период. Таким образом, на основе калибровочных кривых для каждого пикселя спутникового изображения был выполнен переход от значений VCI к значениям ГТК.

Для значений ГТК известны апробированные категории засух по интенсивности [1, 3]. Классу сильной засухи соответствуют значения ГТК менее 0.39, средней засухе – от 0.40 до 0.70 и отсутствию засухи соответствует диапазон от 0.71 до 5. При этом граница соответствия значений VCI и ГТК варьирует в зависимости от декады и регионов. Для примера в таблице показаны диапазоны изменений значений VCI, полученные на основе калибровочных кривых в разрезе категорий интенсивности засух для Южного и Северо-Кавказского федеральных округов.

Таблица. Диапазоны изменений значений VCI, полученные на основе калибровочных кривых в разрезе категорий интенсивности засух для Южного и Северо-Кавказского федеральных округов

Table. Ranges of changes in VCI values obtained based on calibration curves by drought intensity categories for the Southern and North Caucasus Federal Districts

Месяц	Декада	Категория засухи		
		Сильная	Средняя	Нет засухи
Южный федеральный округ				
Май	1 декада	0–19.0	19.1–33.0	33.1–100
	2 декада	0–26.0	26.1–46.0	46.1–100
	3 декада	0–24.0	24.1–42.0	42.1–100
Июнь	1 декада	0–27.0	27.1–48.0	48.1–100
	2 декада	0–26.0	26.1–45.0	45.1–100
	3 декада	0–27.0	27.1–48.0	48.1–100
Июль	1 декада	0–33.0	33.1–58.0	58.1–100
	2 декада	0–36.0	36.1–63.0	63.1–100
	3 декада	0–32.0	32.1–56.0	56.1–100
Август	1 декада	0–30.0	30.1–53.0	53.1–100
	2 декада	0–38.0	38.1–67.0	67.1–100
	3 декада	0–41.0	41.1–72.0	72.1–100

Сентябрь	1 декада	0–45.0	45.1–79.0	79.1–100
	2 декада	0–43.0	43.1–75.0	75.1–100
	3 декада	0–28.0	28.1–49.0	49.1–100
Северо-Кавказский федеральный округ				
Май	1 декада	0–26.0	26.1–46.0	46.1–100
	2 декада	0–25.0	25.1–44.0	44.1–100
	3 декада	0–20.0	20.1–34.0	34.1–100
Июнь	1 декада	0–23.0	23.1–40.0	40.1–100
	2 декада	0–21.0	21.1–37.0	37.1–100
	3 декада	0–21.0	21.1–37.0	37.1–100
Июль	1 декада	0–25.0	25.1–44.0	44.1–100
	2 декада	0–34.0	34.1–59.0	59.1–100
	3 декада	0–34.0	34.1–60.0	60.1–100
Август	1 декада	0–34.0	34.1–60.0	60.1–100
	2 декада	0–30.0	30.1–53.0	53.1–100
	3 декада	0–41.0	41.1–72.0	72.1–100
Сентябрь	1 декада	0–45.0	45.1–79.0	79.1–100
	2 декада	0–45.0	45.1–78.0	78.1–100
	3 декада	0–27.0	27.1–47.0	47.1–100

Из таблицы можно наблюдать, что значения границ перехода от VCI к ГТК достаточно широко варьируют в зависимости от рассматриваемых периодов и территории. Таким образом, калибровочные кривые позволяют достаточно гибко настраивать переход от VCI к ГТК, учитывая климатические особенности территории и сезонность.

2.3. Результаты мониторинга засух

В соответствии с этими градациями засух были получены карты оценки засушливых условий по спутниковому изображению VIIRS. На рис. 4 и 5 для примера показаны карты, полученные по спутниковым данным VIIRS в сравнении с картами, полученными по наземным данным с помощью АОСОЗ по территории Северо-Кавказского и Южного федеральных округов за первую и третью декады августа 2023 года.

На территории Южного и Северо-Кавказского федеральных округов в начале августа атмосферная засуха средней и сильной интенсивности начала охватывать все большие площади, и к концу месяца преимущественно сильной интенсивности распространилась на преобладающую территорию округа. Из карт можно наблюдать, что как по наземным, так и по спутниковым данным эта тенденция хорошо улавливается.

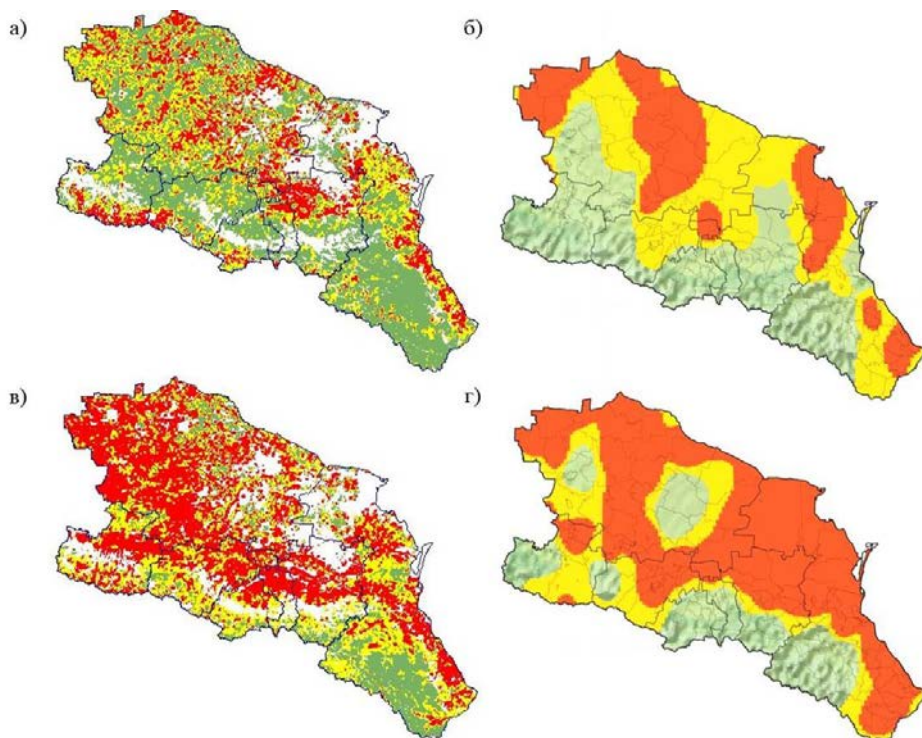


Рис. 4. Оценка засухи по спутниковым (а, в) и наземным (б, г) данным за первую декаду августа (а, б) и третью декаду августа (в, г) 2023 г. по территории Северо-Кавказского федерального округа.

Fig. 4. Drought assessment based on satellite (a, в) and ground-based (б, г) data for the first decade of August (а, б) and the third decade of August (в, г) 2023 for the territory of the North Caucasus Federal District.

В результате исследований был создан программный комплекс, с помощью которого возможно проводить оценку засушливых условий по спутниковой и наземной метеорологической информации для территорий Южного и Северо-Кавказского федеральных округов. Программный комплекс включает в себя базу данных, модуль оценки засух, интерфейс пользователя и модуль визуализации данных. Программный модуль оценки засух, интерфейс пользователя и модуль визуализации данных разработаны на языке Delphi.

Для удобного взаимодействия пользователя с программой в интерфейсе пользователя реализованы удобные элементы графического управления для импорта, анализа, обработки, сохранения и визуализации данных. В модуле визуализации реализовано построение карт засушливых условий, полученных по калибровочным кривым между VCI и ГТК, а также для отображения разработаны карты классификации земель и пространственного распределения NDVI и VCI.

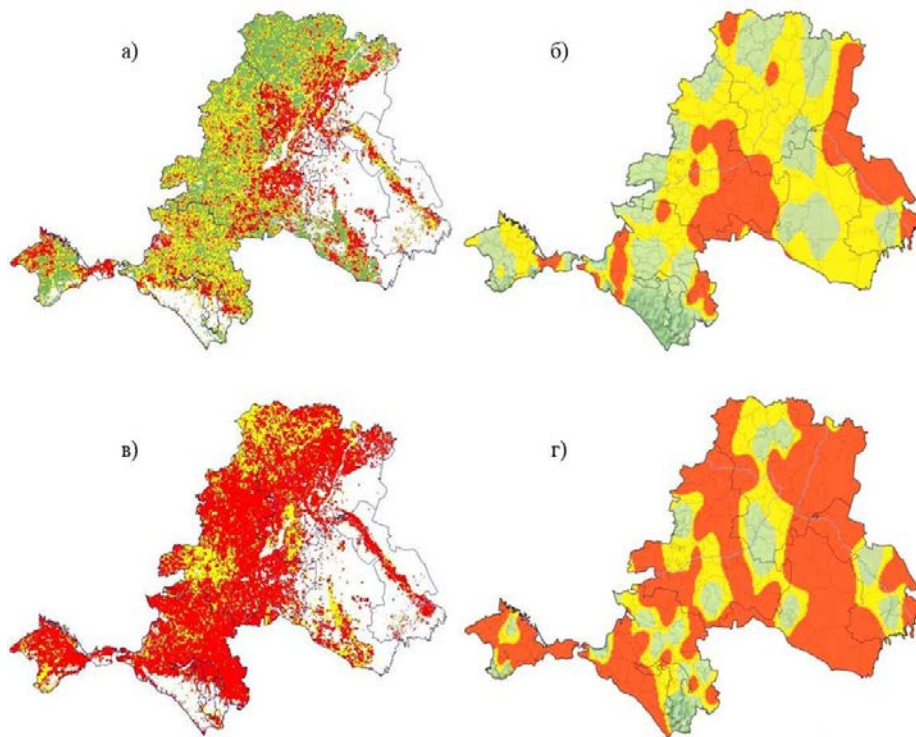


Рис. 5. Оценка засухи по спутниковым (а, в) и наземным (б, г) данным за первую декаду августа (а, б) и третью декаду августа (в, г) 2023 г. по территории Южного федерального округа

Fig. 5. Drought assessment based on satellite (a, в) and ground-based (б, г) data for the first decade of August (а, б) and the third decade of August (в, г) 2023 for the territory of the Southern Federal District

Заключение

Разработана процедура комплексирования наземной и спутниковой информации для мониторинга засух, основанная на использовании тестовых участков в районе расположения метеорологических станций Росгидромета с целью построения калибровочных зависимостей между спутниковым вегетационным индексом (VCI) и наземным индексом засухи (ГТК). Интегральные (суммированные за определенный период) вегетационные индексы, обладая достаточно высокой теснотой связи с ГТК, могут являться спутниковыми аналогами этого индекса, что позволяет использовать их при выявлении засух и оценке их интенсивности. Проведенные расчеты по оценке засушливости для территории рассматриваемых федеральных округов с использованием полученных зависимостей показали неплохую сходимость с данными, полученными по наземной информации. Хотя такое сравнение является достаточно условным, учитывая характеристику (в первую очередь пространственное разрешение) используемой

информации в методах расчета. В дальнейшем предполагается провести апробацию рассматриваемого подхода для других территорий Российской Федерации и разработать оперативную технологию мониторинга засух на основе комплексирования наземной и спутниковой информации.

Список литературы

1. Клещенко А.Д., Асмус В.В., Страшная А. И, Кровотынцев В.А., Вирченко О.В., Савицкая О.В., Береза О.В., Василенко Е.В., Сухарева В.В., Моргунов Ю.А., Косякин С.А. Мониторинг засух на основе наземной и спутниковой информации // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 11. С. 95-108.

2. Клещенко А.Д., Страшная А.И., Вирченко О.В., Чуб О.В., Хомякова Т.В., Задорнова О.И. Мониторинг засух на основе наземной и спутниковой информации // *Труды ВНИИСХМ*. 2013. Вып. 38. С. 87-108.

3. Проблемы мониторинга засух / под ред. Гингоф И.Г., Клещенко А.Д., Жуков В.А. СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. 244 с.

4. Селянинов Г.Т. О сельскохозяйственной оценке климата // *Труды по сельскохозяйственной метеорологии*. 1928. Вып. 20. С. 165-177.

5. Спивак Л.Ф., Батырбаева М.Ж., Витковская И.С., Муратова Н. Р., Бердыгулов Н.И., Момбекова Д.К., Жаксыбекова К.А., Капатай Ж.Т. Возможность использования спутниковых данных при оценке засушливости на территории Казахстана // *Гидрометеорология и экология*. 2016. № 3. С. 26-36.

6. Справочник по показателям и индексам засушливости // *ВМО-№1173*. 2016. 60 с.

7. Страшная А.И., Пурина И.Э., Чуб О.В., Задорнова О.И., Чекулаева Т.С. Автоматизированная технология мониторинга и расчета количества декад с почвенной и атмосферно-почвенной засухой под зерновыми культурами // *Труды Гидрометцентра России*. 2013. Вып. 349. С. 161-175.

8. Щербенко Е.В. Дистанционные методы выявления сельскохозяйственной засухи // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2007. Вып. 4. Том 2. С. 408-419.

9. Kogan F. N. NOAA / AVHRR Satellite Data-Based Indices for Monitoring Agricultural Droughts // *Monitoring and Predicting Agricultural Drought*. Oxford: University Press, 2005. P. 79-89.

10. *Monitoring and Predicting Agricultural Drought* / Ed. by Vijendra K. Boken, Arthur P. Cracknell, Ronald L. Heathcote. Oxford, 2005. 472 p.

11. *Remote Sensing of Agriculture and Land Cover/ Land Use Changes in South and Southeast Asian Countries* / Ed. by Krishna Prasad Vadrevu, Thuy Le Toan, Shibendu Shankar Ray, Chris Justice. Springer, 2022. 617 p.

References

1. Kleshchenko A.D., Asmus V.V., Strashnaya A. I, Krovotyntsev V.A., Virchenko O.V., Sa-vitskaya O.V., Bereza O.V., Vasilenko E.V., Sukhareva V.V., Morgunov Yu.A., Kosyakin S.A. Drought monitoring based on ground and satellite data. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2019, vol. 44, no. 11, pp. 772-781 [in Russ.].

2. Kleshchenko A.D., Strashnaya A.I., Virchenko O.V., Chub O.V., Khomyakova T.V., Zadornova O.I. Monitoring zasukh na osnove nazemnoi i sputnikovoi informatsii [Drought monitoring based on ground-based and satellite information]. *Trudy*

VNIISKHM [Proceedings of All-Russian Research Institute of Agricultural Meteorology], 2013, no. 38, pp. 87-108 [in Russ.].

3. Problemy monitoringa zasukh [Problems of drought monitoring]. Ed. by Gingof I.G., Kleshchenko A.D., Zhukov V.A. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat publ., 2000, 244 p. [in Russ.].

4. Selyaninov G.T. O sel'skokhozyaistvennoi otsenke klimata [About agricultural climate assessment]. *Trudy po sel'skokhozyaistvennoi meteorologii*. [Proceedings on Agricultural Meteorology], 1928, no. 20, pp. 165-177 [in Russ.].

5. Spivak L.F., Bатырбаева M.Zh., Vitkovskaya I.S., Muratova N. R., Berdygulov N.I., Mombekova D.K., Zhaksybekova K.A., Kapatai Zh.T. Vozmozhnost' ispol'zovaniya sputnikovykh dannykh pri otsenke zasushlivosti na territorii Kazakhstana [Possibility of using satellite data in assessing aridity in Kazakhstan]. *Gidrometeorologiya i ekologiya* [Hydrometeorology and Ecology], 2016, no. 3, pp. 26-36 [in Russ.].

6. Spravochnik po pokazatelyam i indeksam zasushlivosti [Handbook of indicators and indices of aridity]. World Meteorological Organization, 2016, no. 1173, 60 p. [in Russ.].

7. Strashnaya A.I., Purina I.E., Chub O.V., Zadornova O.I., Chekulaeva T.S. Automated technology for monitoring and calculating the number of decades with soil and atmospheric-soil drought under grain crops. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2013, no 349, pp. 161-175 [in Russ.].

8. Shcherbenko E.V. Distantionnye metody vyavleniya sel'skokhozyaistvennoi zasukhi [Remote methods for detecting agricultural drought]. *Sovremennye problemy distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2007, no. 4, vol. 2, pp. 408-419 [in Russ.].

9. Kogan F. N. NOAA / AVHRR Satellite Data-Based Indices for Monitoring Agricultural Droughts. Monitoring and Predicting Agricultural Drought. Oxford: University Press, 2005, pp. 79-89.

10. Monitoring and Predicting Agricultural Drought. Ed. by Vijendra K. Boken, Arthur P. Cracknell, Ronald L. Heathcote. Oxford, 2005, 472 p.

11. Remote Sensing of Agriculture and Land Cover/ Land Use Changes in South and Southeast Asian Countries. Ed. by Krishna Prasad Vadrevu, Thuy Le Toan, Shibendu Shankar Ray, Chris Justice. Springer, 2022, 617 p.

*Поступила 25.06.2024; одобрена после рецензирования 24.09.2024;
принята в печать 15.10.2024.*

*Submitted 25.06.2024; approved after reviewing 24.09.2024;
accepted for publication 15.10.2024.*