

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ОПЕРАТИВНОМ АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ

А.Д. Клещенко¹, О.В. Савицкая¹

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии, Обнинск, sxm-dir@obninsk.ru*

Аннотация: дано описание технологий мониторинга оценки состояния, и продуктивности посевов зерновых культур, а также мониторинга засух на основе интеграции наземной метеорологической и спутниковой информации, разработанных в ФГБУ «ВНИИСХМ». Показана возможность использования спутниковой информации в оперативном режиме для решения задач агрометеорологического мониторинга.

Ключевые слова: вегетационные индексы, метеорологическая информация, урожайность, мониторинг, засуха.

Актуальность. Одной из важных задач агрометеорологии является оперативная оценка состояния и условий формирования урожайности посевов сельскохозяйственных культур. С этой целью проводится регулярный мониторинг состояния посевов сельскохозяйственных культур на основе агрометеорологической информации наземных наблюдательных учреждений. В последние десятилетия для этих целей стала широко использоваться спутниковая информация, которая позволяет получать более детализированную информацию по рассматриваемой территории. Появилось большое количество публикаций в этой области. В данной статье не ставится задача проведения обзора публикаций, можно для примера отметить одну из публикаций, в которой приводится достаточно хороший обзор [1]. Задачей данной статьи является информация о состоянии разработок в этой области, проводимых во ВНИИСХМ Росгидромета за последние годы.

В статье приводятся краткие результаты исследований по следующим направлениям: оценка состояния посевов и продуктивности зерновых культур на основе комплексирования наземной и спутниковой информации и мониторинг засух на основе наземной и спутниковой информации.

Обсуждение результатов. В начале девяностых годов в ФГБУ «ВНИИСХМ» была разработана и введена в эксплуатацию оперативная система мониторинга состояния посевов по спутниковой информации AVHRR

(NOAA) [2, 3]. В связи с прекращением функционирования радиометров AVHRR для территории России, в институте в 2021 г. была создана новая система мониторинга с использованием спутниковых измерений более современного сканера VIIRS спутника SUOMI NPP, обеспечивающего увеличение пространственного разрешения в 2,9 раза по сравнению с AVHRR. Пространственное разрешение радиометра AVHRR составляет 1100 м, пространственное разрешение VIIRS – 375 м. Разработанная система включает в себя следующие процедуры: формирование и передачу спутниковых композитов, расчет вегетационных индексов, многомерную кластеризацию на основе минимизации внутриклассовой дисперсии, калибровку спутниковых данных по результатам наземных агрометеорологических наблюдений и статистических данных, привязку выходной информации к картографической основе.

Спутниковая информация VIIRS поступает в ФГБУ «ВНИИСХМ» из ФГБУ «НИЦ «Планета» в виде безоблачных композитов, составленных из фрагментов снимков за десятидневный период. Композиты представляют собой цифровые массивы информации, полученной по четырём спектральным каналам (в красном, ближнем инфракрасном, среднем инфракрасном и длинноволновом инфракрасном). По информации в красном и ближнем инфракрасном каналах рассчитывается вегетационный индекс NDVI. NDVI представляет собой разность между значениями коэффициентов отражения в красном и ближнем инфракрасном участках спектра к их сумме. Значения в четырех спектральных каналах и NDVI используются в неконтролируемой многомерной классификации с минимизацией внутриклассовой дисперсии. Эта процедура позволяет идентифицировать сельскохозяйственный объект как целое благодаря объединению в одно спектральное пространство исходных сигналов и NDVI. В результате классификации, формируются 19 кластеров, которые достаточно хорошо совпадают с реальными объектами на поверхности Земли. Такое количество кластеров достаточно полно удовлетворяют следующим условиям: объекты внутри кластера достаточно однородны, объемы кластеров не отличаются на порядок, разные кластеры соответствуют различным объектам. После этого рассчитываются средние значения NDVI по каждому кластеру и сами кластеры упорядочиваются по возрастанию вегетационного индекса. После завершения работы процедуры, пользователь имеет возможность изменить распределение кластеров по выделенным градациям. Многочисленные исследования по оценке зависимости спектрально-отражательных характеристик посевов сельскохозяйственных культур от густоты стояния, площади листовой поверхности и урожайности в

различные периоды вегетации позволили определить критерии для NDVI, которые определяют посевы с плохим, удовлетворительным и хорошим состоянием [2, 4]. Таким образом, выходным продуктом системы являются карто-схемы оценки состояния посевов по трем градациям: хорошее, удовлетворительное и плохое состояние. На карто-схемах выделены также участки с водой, лесом и прочими землями. Так же в программе реализована возможность сравнения результатов спутникового мониторинга с наземными данными.

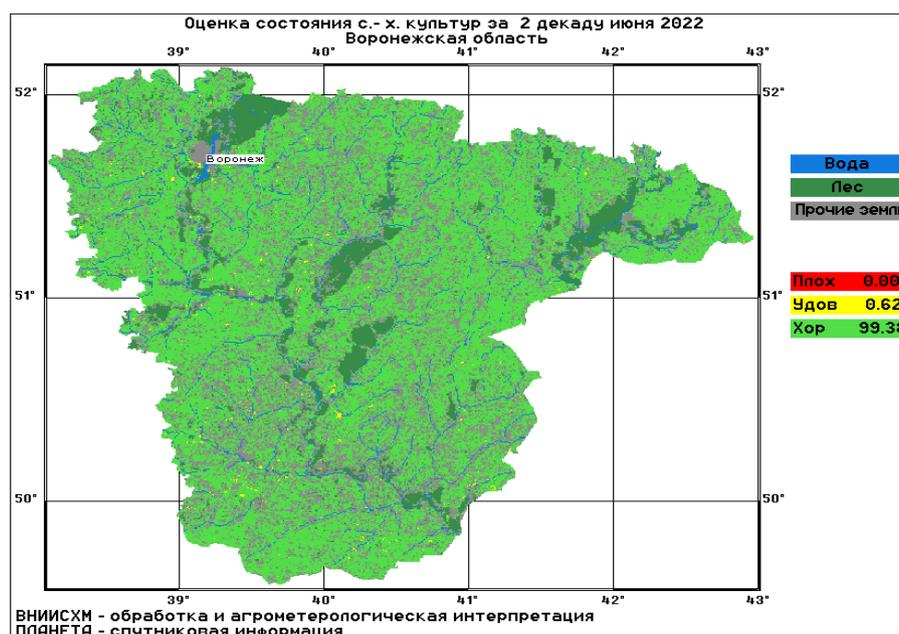


Рис. 1. Оценка состояния посевов по Воронежской области на конец второй декады июня 2023 года

Для этого в программе предусмотрена возможность отображать информацию по агрометеорологическим станциям соответствующего региона за указанный период по следующим характеристикам: культура, фазы развития, визуальная оценка на последний день декады, высота посева на последний день декады, густота посева, запасы продуктивной влаги в слоях почвы 0-20 см, 0-50 см и 0-100 см. Эта информация позволяет провести анализ по соответствию наземного и спутникового мониторинга. Для примера на рисунке 1 показана карто-схема оценки состояния посевов по Воронежской области на конец второй декады июня 2023 года.

Аналогичные карты строятся ежедекадно для субъектов, федеральных округов и России в целом и передаются в Гидрометцентр России и оперативные подразделения УГМС для агрометеорологического обеспечения сельскохозяйственных организаций.

Другой решаемой задачей в этом направлении во ВНИИСХМ является разработка технологии оценки, ожидаемой средней районной урожайности зерновых культур на основе интеграции наземной и спутниковой информации [5, 6].

При решении этой задачи в качестве спутниковой информации используются данные со спектрорадиометра MODIS спутника Terra с пространственным разрешением 250 м, которые доступны на сервисе Vega-PRO (<http://pro-vega.ru>, ИКИ РАН). С помощью этого сервиса были получены следующие спутниковые индексы: NDVI, VCI. Описание NDVI приведено выше. Индекс условий вегетации VCI учитывает изменение значений NDVI в течение вегетационного периода с учётом их минимальных и максимальных значений за рассматриваемый период. Этот индекс одним из первых предложил Ф. Коган [7], он рассчитывается по следующей формуле:

$$VCI_j = \frac{NDVI_j - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} * 100\% , \quad (1)$$

где VCI_j – значение индекса условий роста растительности для даты j ; $NDVI_j$ – значение NDVI для даты j ; $NDVI_{\max}$ – значения максимальных NDVI внутри всего набора данных; $NDVI_{\min}$ – значение минимальных NDVI внутри всего набора данных.

VCI_j – это процентное отношение значений NDVI за время j по отношению к максимальной амплитуде изменений значений NDVI за рассматриваемый период времени.

Наземная метеорологическая информация была получена по данным наблюдений на гидрометеорологических станциях Росгидромета. В качестве наземных данных в исследовании использовались следующие параметры: средняя температура воздуха, сумма осадков за декаду, дефицит влажности воздуха, гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК).

В качестве статистической информации использованы данные о средней районной урожайности основных зерновых культур, начиная с 2012 года, доступные на сайте Федеральной службы государственной статистики [8].

В качестве методов исследования использовались метод корреляционно-регрессионного анализа и метод главных компонент. В таблице 1 в качестве примера представлены коэффициенты корреляции между исходными параметрами и средней районной урожайностью озимой пшеницы для двух групп районов Ростовской области за период с 2012–2021 гг.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между исходными параметрами и средней районной урожайностью озимой пшеницы для двух групп Ростовской области за период с 2012–2021 гг.

Группа	Длина ряда	Месяц	Декада	Метеорологические параметры							Спутниковые индексы	
				T	P	D	T3	P3	D3	GTK	NDVI	VCI
1	160	май	1	-0,35	0,28	-0,32	-0,59	0,45	-0,58	0,46	0,60	0,58
		май	2	-0,68	0,38	-0,78	-0,72	0,63	-0,71	0,64	0,86	0,87
		май	3	-0,60	0,12	-0,49	-0,73	0,43	-0,73	0,48	0,85	0,86
		июнь	1	-0,30	0,01	-0,17	-0,67	0,25	-0,61	0,34	0,75	0,79
2	150	май	1	-0,49	0,27	-0,48	-0,56	0,52	-0,63	0,54	0,53	0,52
		май	2	-0,62	0,41	-0,65	-0,68	0,61	-0,68	0,64	0,72	0,70
		май	3	-0,29	-0,27	-0,23	-0,63	0,27	-0,65	0,34	0,79	0,78
		июнь	1	-0,26	0,25	-0,14	-0,52	0,24	-0,44	0,30	0,70	0,67

Примечание: NDVI – среднее за декаду значение вегетационного индекса; VCI – среднее за декаду значение индекса условий роста растительности; T – средняя декадная температура воздуха; T3 – средняя температура воздуха за 3 декады; P – сумма осадков за декаду; P3 – сумма осадков за 3 декады; D – средний за декаду дефицит влажности воздуха; D3 – средний дефицит влажности воздуха за 3 декады; GTK – значение GTK за месяц

Представленные данные в таблице 1 позволяют судить о связях между факторами и средней районной урожайностью озимой пшеницы. Со спутниковыми индексами на протяжении всех декад и для всех групп наблюдаются достаточно высокие коэффициенты корреляции. С метеорологическими параметрами в большинстве случаев также наблюдаются устойчивые связи, хотя в отдельные декады связь недостаточно высокая. На следующем этапе осуществлялось построение регрессионных моделей. Для этого применялся пошаговый алгоритм регрессионного анализа с включением переменных, который заключается в следующем: на каждом шаге в уравнение регрессии включается переменная, имеющая максимальное значение коэффициента парной корреляции с урожайностью, при этом выполняется проверка коэффициента множественной корреляции, значимости уравнения регрессии по критерию Фишера и значимости коэффициентов уравнения по критерию Стьюдента. Таким образом, были построены регрессионные модели для районов Северо-Кавказского УГМС. Разработанные модели позволяют выполнять расчёты ожидаемой урожайности озимой пшеницы и строить карты распределения ожидаемой урожайности. Для примера на рисунке 2 показан пример карты распределения ожидаемой урожайности озимой пшеницы по районам Ростовской области за 1 декаду июня 2023 г.

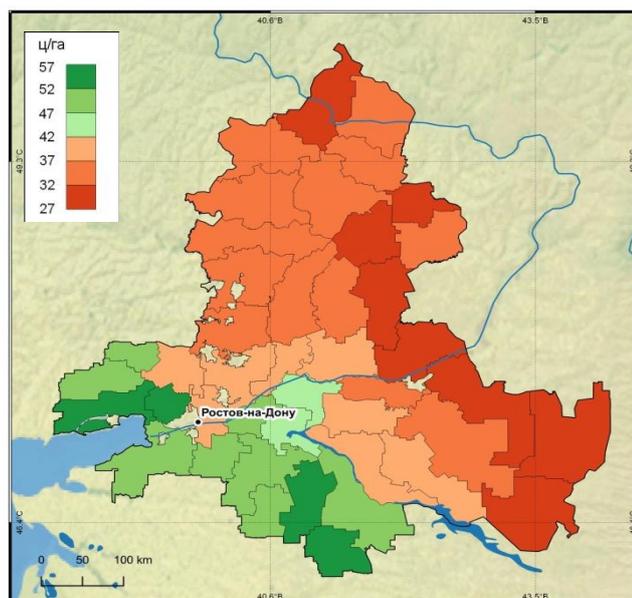


Рис. 2. Ожидаемая урожайность озимой пшеницы (ц/га) по состоянию посевов на конец 1 декады июня 2023 г. для Ростовской области

Как видно из рисунка 2 наблюдается значительная вариабельность ожидаемой урожайности озимой пшеницы по районам Ростовской области. Наиболее высокая урожайность в 2023 г. ожидалась в южных и юго-западных районах области.

Таким образом, были получены регрессионные модели за период с 2012 по 2022 гг., по которым можно рассчитывать ожидаемую среднюю районную урожайность озимой пшеницы в оперативном режиме. В качестве предикторов, как правило, в уравнения входили по одному спутниковому и метеорологическому параметру, от остальных параметров пришлось отказаться в силу их взаимозависимости, хотя корреляция с урожайностью у этих параметров достаточно высокая. Кроме того, с агрометеорологической точки зрения бывает достаточно сложно отдать предпочтение какому-то определенному параметру, поскольку каждый фактор имеет свое специфическое влияние на рост и развитие растений. В этой связи необходимо было найти метод, который бы позволил расширить список входных параметров, имеющих достаточно высокую корреляцию с урожайностью, что может уменьшить ошибку расчётов при их учёте. В качестве такого метода был использован метод главных компонент, который успешно используется в гидрометеорологических исследованиях [9]. Суть метода главных компонент заключается в преобразовании данных из исходного многомерного пространства в новое пространство, оси (главные компоненты) которого

некоррелированы. Далее осуществляется построение регрессии на главные компоненты. Новые регрессионные уравнения позволили включить большее количество входных переменных, при этом коэффициент множественной корреляции повышается по сравнению с уравнениями, полученными на исходных данных, а ошибка расчётов уменьшается.

В ФГБУ «ВНИИСХМ» для изучения феномена засух, их мониторинга и оценки их влияния на продуктивность посевов зерновых культур в 2002 г. по решению Межгосударственного Совета по гидрометеорологии СНГ был создан Центр мониторинга засух (ЦМЗ) [10]. В ЦМЗ была разработана автоматизированная оперативная система оценки засух (АОСОЗ) с помощью которой проводится ежелектрадный оперативный мониторинг засух. Система использует наземные метеорологические данные и позволяет регулярно отслеживать появление и развитие засух по пунктам наблюдений с шагом в одну декаду в течение всего вегетационного периода. Однако в связи с недостаточной плотностью сети метеорологических станций в отдельных регионах бывает затруднительно получить информацию с достаточным пространственным разрешением. Спутниковая информация позволяет решить эту проблему. В ЦМЗ реализован подход оценки засухи на основе индекса состояния растительности VCI, о котором говорилось выше. Значения VCI изменяются от 0 до 100 %, в соответствии с погодными условиями от сухих до влажных. Ф. Коган предложил использовать три градации индекса для мониторинга засухи. Значения индекса, превышающие 70 %, соответствуют влажным и благоприятным условиям. Изменения значений VCI от 30 до 70 % отражают нормальные условия увлажнения. Значения индекса менее 30 % определяют стрессовое состояние растительности. VCI рассчитывается только для пахотных угодий, с учётом маски сельскохозяйственных земель. Следует отметить, что при расчёте VCI данные субъектов в пределах федерального округа объединялись в общий массив, что позволило увеличить объём выборки и наиболее точно определить минимальное и максимальное значение NDVI. Для примера на рисунке 3 показаны карты распределения индекса VCI для Ростовской, Волгоградской областей, Краснодарского края и Крыма для первой декады мая и первой декады августа 2023 гг.

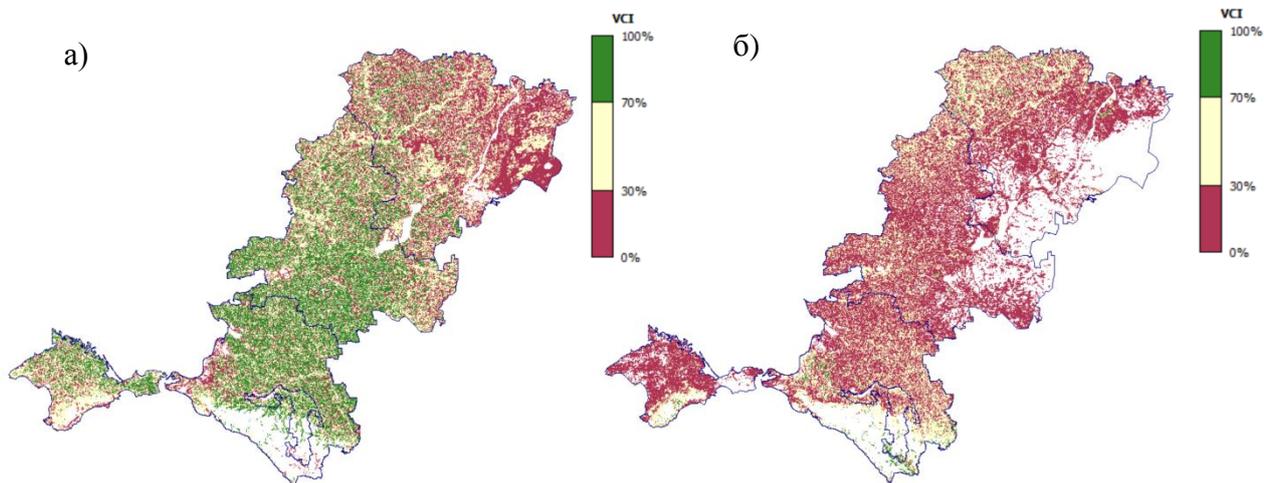


Рис. 3. Карта распределения индекса VCI для Ростовской, Волгоградской областей, Краснодарского края и Крыма для первой декады мая 2023 г. (а) первой декады августа 2023 г. (б)

Как видно из рисунка 3 наиболее благоприятные условия увлажнения наблюдаются в начале мая 2023 г., а в августе 2023 г. по индексу VCI наблюдается средняя и сильная засуха, что достаточно близко к оценкам, полученным по наземной системе. В настоящее время в институте ведётся разработка соответствующей технологии мониторинга засух, основанного на использовании спутникового индекса VCI.

Заключение. Проведенные исследования показали эффективность использования спутниковой информации в комплексе с наземными данными для оценки состояния посевов, засух и ожидаемой урожайности зерновых культур. Разработанные технологии позволяют оперативно получать более детализированную информацию о состоянии посевов и условиях формирования продуктивности зерновых культур, а также выявлять районы с аномальными (засушливыми) условиями роста и развития посевов. Это позволит своевременно применять необходимые агротехнические приёмы (процедуры) для минимизации отрицательных последствий воздействия аномальных условий.

Библиографический список

1. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Издательство А и Б, 2003. 296 с.
2. Клещенко А.Д., Вирченко О.В. Технология оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур и мониторинга засух по спутниковой информации // Труды ВНИИСХМ. 2006. Вып. 35. С. 3–33.
3. Kleschenko A.D., Virchenko O.V., Martinenko O.V. Contemporary satellite-based systems for agro-meteorological monitoring // Use of Satellite and In-

Situ Data to Improve Sustainability. Springer. Published with NATO Diplomacy Division. 2011. P. 61–69.

4. Клещенко А. Д. Оценка состояния зерновых культур с применением дистанционных методов. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. 190 с.

5. Клещенко А.Д., Савицкая О.В. Оценка пространственно-временного распределения урожайности зерновых культур и стандартизированного индекса осадков (SPI) по спутниковой и наземной информации // Труды ГГО. 2014 г. Вып. 571. С. 147–161.

6. Клещенко А. Д., Савицкая О. В. Оценка урожайности озимой пшеницы с использованием метода главных компонент на основе комплексирования спутниковой и наземной информации // Метеорология и Гидрология. 2021. № 12. С. 127–136. doi: 10.52002/0130-2906-2021-12-127-136.

7. Kogan F.N. Remote sensing of weather impact on vegetation in non-homogeneous areas // International Journal of Remote Sensing. 1990. No. 8. P. 1405–1419.

8. База данных показателей муниципальных образований // Федеральной службы государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gks.ru/dbscripts/munst> (дата обращения: 05.10.2023).

9. Мещерская А. В., Руховец Л. В., Юдин М. И., Яковлева Н. И. Естественные составляющие метеорологических полей. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. 199 с.

10. 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.

THE USE OF SATELLITE INFORMATION IN OPERATIONAL AGROMETEOROLOGICAL MONITORING

A.D. Kleshchenko, O.V. Savitskaya

National Research Institute of Agricultural Meteorology, Obninsk, Russia,

cxm-dir@obninsk.ru

Summary: A description of monitoring technologies for assessing the condition, and productivity of grain crops, and also drought monitoring based on the integration of ground-based meteorological and satellite information developed at the NRIAM is given. The possibility of using satellite information in real time to solve problems of agrometeorological monitoring is shown.

Keywords: vegetation indices, meteorological information, yield, monitoring, drought.