

DOI 10.33952/2542-0720-2019-4-20-28-45

УДК 631.152+519.6

Дунаева Е. А.¹, Плотников Д. Е.², Хвостиков С. А.², Ёлкина Е. С.²,
Барботкина Е. С.¹, Вечерков В. В.¹, Баргалева С. А.²

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ НАСТУПЛЕНИЯ ЗАСУШЛИВЫХ УСЛОВИЙ

¹ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»;

²ФГБУН «Институт космических исследований Российской академии наук»

Реферат. Оценка вероятности наступления засушливых условий и разработка методологических основ и принципов мониторинга неблагоприятных для посевов ситуаций важна как на локальном, так и на региональном уровне. Совместный проект ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма» и ФГБУН «Институт космических исследований Российской академии наук» «Научное обоснование использования данных дистанционного зондирования для оценки вероятности наступления засушливых условий» направлен на исследование возможностей и поиск эффективных методов дистанционной оценки состояния посевов в условиях крымского региона. В работе проведен ретроспективный анализ метеорологических данных с расчетом обеспеченности года осадками и урожайности культур для определения характерных особенностей при наступлении засух; исследованы возможности идентификации посевов озимых с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и предложены подходы к оценке их состояния. Для определения наступления засушливых условий в качестве показателей отклика растений на водообеспеченность использованы спектральные вегетационные индексы (NDVI, NDDI, RDVI, VCI). В качестве базы сравнения для выявления посевов в неудовлетворительном состоянии использовали данные о списанных в 2018 г. посевах. Анализ состояния посевов в 2018–2019 гг. проведен с использованием возможностей сервиса Vega-Science и QGIS 2.18 с построением карт озимых культур, идентификацией угнетенной растительности вследствие засушливых условий и определением площадей посевов, находящихся в неудовлетворительном состоянии. Сравнение нескольких индексов ДЗЗ позволяет минимизировать ошибку при идентификации влияния засухи на развитие сельскохозяйственных культур и уровень биомассы. Предложен метод выявления аномалий в развитии сельскохозяйственных растений по данным ДЗЗ, основанный на определении отклонений от «эталона» развития сельскохозяйственных культур в терминах перцентилей. Временные ряды наблюдаемых и эталонных значений NDVI приводят к единой шкале накопленных температур воздуха, что позволяет сравнивать сопоставимые фенологические фазы развития посевов культуры и оценивать состояние растительности на поле относительно эталонных ретроспективных значений индекса в заданный период. При этом состояние посевов признают аномальным в случае выхода значений показателя за определенный порог (перцентиль). Причины аномалий (засушливые условия) могут быть установлены при дополнительном анализе метеоданных, в том числе доступных в сервисе Vega-science. Валидация метода проведена на основании данных о состоянии посевов озимой пшеницы урожая 2018 г. в Красногвардейском и Белогорском районах Республики Крым. Показано достоверное выявление аномалий в развитии посевов.

Ключевые слова: анализ, урожайность, Vega-science, геоинформационная технология, засуха, дистанционное зондирование Земли.

Введение

Засухи оказывают влияние на экосистемы, ускоряя деградацию земель и развитие опустынивания, основная причина которого – чрезмерные антропогенные нагрузки, усиливающиеся в условиях длительных и суровых засух [1–5]. Для территории степной зоны России количество засух на столетие достигает 30 и более [6] и увеличивается в связи с глобальными изменениями климата.

Немаловажным является тот факт, что в истории Крыма за последние два столетия зарегистрированы три значительные засухи (1833; 1880; 1920 гг.), имевшие колоссальные последствия для жителей полуострова. Первое упоминание в литературе о наступлении засушливых условий на территории крымского полуострова встречается в 1821 г. В летний период 1821 г. не выпали осадки, также отмечено не случавшееся ранее нашествие саранчи и неурожай сельскохозяйственных культур. Сильная засуха имела место на крымских землях в 1833–1834 гг., когда после малоснежной зимы отмечена катастрофическая весенне-летняя засуха и, как следствие, неурожай [6]. Засухи были в Крыму также в 1872; 1873; 1877; 1889 гг. [7]. В 1891 г. из-за аномальных погодных условий (малоснежная ранняя зима – минусовые температуры зафиксированы в конце октября; ранняя весна, практически без осадков с положительными температурами в конце февраля и морозами в середине марта) сформировалась неблагоприятная обстановка для развития озимых зерновых культур, которые занимали около половины от общей площади посевов в Крыму. Отсутствие продуктивных осадков с апреля по август и высокие температуры привели к значительному недобору урожая озимых и яровых культур (средняя урожайность – 4,5 ц/га, что ниже среднего значения за десятилетие на 26 %) [8]. В 1911 г. сформировались неблагоприятные погодные условия вследствие высоких летних температур и способствовали наступлению засушливых условий на территории Европы и потере $\frac{2}{3}$ урожая зерновых против среднего на территории полуострова [9]. В период с 1920 по 1922 гг. на территории полуострова произошли климатические катаклизмы, в числе которых – сильнейшая засуха 1921 г., последовавшее за ней нашествие саранчи и затяжные проливные дожди [10]. В 1972 г. в течение двух месяцев подряд установился мощный антициклон, обусловивший аномально высокие температуры воздуха и крайний дефицит осадков, чему предшествовали маловодные зима и весна. Весенне-летняя засуха прерывалась ливневыми дождями только в мае и июле. Экстремально засушливыми были апрель, июнь и август, среднемесячные температуры воздуха превышали среднемноголетнюю норму на 4 °С (апрель). В результате, на стадии налива зерно подверглось воздействию высоких температур и продолжительных суховеев, чем нанесен значительный ущерб сельскому хозяйству. По данным Статистического управления Крымской области урожайность зерновых культур составила 18,8 ц/га. В 1975 г. засухе предшествовал существенный осенне-зимний дефицит осадков. В Крыму годовая сумма осадков составила всего 250 мм; по свидетельству специалистов, посевы зерновых культур в следствие высоких температур «горели на корню» и не образовывали колоса [11]. По данным Статистического управления Крымской области урожайность зерновых культур составила 24,1 ц/га. Из-за засухи 1993 и 1994 г. в Крыму наблюдали минимальные расходы рек и приток в водохранилища в течение 14 месяцев, степные районы Крыма периодически объявляли районами бедствия (собрано $\frac{1}{2}$ урожая). По данным Статистического управления Крымской области урожайность зерновых культур составила 21,8 ц/га, по Красногвардейскому району – 24,5 ц/га.

В 2012 г. в результате засухи в период созревания урожая повреждены посевы озимой пшеницы в Красногвардейском районе Республики Крым. В 2013 г.

на полуострове списана значительная часть посевов озимых, урожайность составила 13–14 ц/га, собрано 764,8 тыс. т зерна и 109 тыс. т подсолнечника [12].

В 2018 г. отмечена гибель посевов озимых культур в нескольких районах Крыма вследствие отсутствия с марта по май включительно хозяйственно полезных атмосферных осадков и продуктивной влаги в метровом слое почвы, высоких температур и сильного ветра. В целом подобная погода для степного Крыма типична, но в этом году ситуация усугубилась отсутствием осадков [13]. По данным Министерства сельского хозяйства Крыма, из-за засухи было потеряно более 500 тыс. т. зерна. Пострадало более 70 сельхозпредприятий в шести районах Крыма (Красногвардейском, Нижнегорском, Первомайском, Советском, Ленинском и Джанкойском). Засушливые условия на полуострове привели к полной гибели сельскохозяйственных культур на площади 23,5 тыс. га [14]. Засуха, установившаяся в 2019 г. в Крыму, является аномальной, подобные погодные условия наблюдали в 1994 и в 2012 гг., а 10 ноября 2019 зафиксирован температурный рекорд для этой даты за всю историю метеонаблюдений – 27,1 °С.

Изучение факторов, определяющих наступление засушливых условий, их идентификация с использованием косвенных методов, в том числе данных дистанционного зондирования Земли, является актуальной задачей, так как позволяет разработать методы дистанционной диагностики агроценозов.

Существующие методы обработки данных дистанционного зондирования Земли позволяют получать косвенные критеритальные оценки засушливости территории, анализировать состояние сельскохозяйственных посевов в динамике. Однако для определения наступления засушливых условий необходимо определить граничные значения индексов и обеспечить возможность получения характеристик состояния отдельных посевов в зависимости от различных факторов среды. Этого можно достичь благодаря развитию комплексной методологии попарного расчета индексов засушливости территории в комплексе с многофакторным анализом полевых данных, что позволит оценить интегральные (агрегированные на уровне полей) и структурные (описывающие неоднородность продуктивности внутри полей) индексы состояния культур.

Цель исследований – определение возможностей и поиск эффективных методов обработки данных дистанционного зондирования Земли для получения информативных характеристик состояния культур, удовлетворяющих требованиям сельскохозяйственного производства на региональном и локальном уровнях; определение и заблаговременное обнаружение засушливых территорий путем создания алгоритма расчета косвенных индикаторов наступления засухи.

Показатели и индексы гидрометеорологических характеристик засухи, которых в настоящее время насчитывается более ста [15, 16], определяют в результате климатического мониторинга с использованием современных наземных и космических технологий. Традиционно для выявления засухи и характеристики её параметров используют такие метеорологические данные, как количество осадков, температура поверхности почвы и воздуха, влажность почвы и воздуха и др. [17]. При этом наиболее часто используются следующие индексы.

Индекс интенсивности засухи Палмера (PDSI), разработан Уэйном Палмером [18] в 1960-х гг. для измерения степени засухи на основе данных по осадкам и температуре. Индекс широко используют государственные учреждения США для определения интенсивности засухи. В дальнейшем М. Хейс [19] использовал индекс Палмера при разработке программ смягчения последствий засухи, а Е. Кук – при анализе долгосрочных тенденций засухи [20]; в течение

длительного периода PDSI был единственным индексом засухи, используемым в оперативной практике [21–23].

Гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) разработан Г. Т. Селяниновым с учетом условий местного климата [24, 25]; характеризует соотношение тепла и влаги. При этом интерпретация градаций засух основана на предлагаемых эмпирических оценках с возможностью последующей их корректировки с учетом агроклиматической зоны.

Индекс вегетационной засухи (Vegetation Drought Response Index, VegDRI) разработан группой ученых из Центра научных исследований и наблюдений за природными ресурсами Земли и ряда других служб США [26]. Это гибридный инструмент мониторинга и картирования засухи, объединяющий спутниковые данные об уровне развития растительности и климатические данные с информацией о землепользовании, характеристике почв и другими факторами [27].

Одним из наиболее распространенных косвенных индексов оценки условий засушливости по спутниковым данным в сезон вегетации является вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), который разработан Дж. Д. Тарпли, Ф. Н. Коганом и другими авторами из Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) в США [28–30]. Методология его расчета базируется на соотношении разницы отражения двух спектральных каналов, имеющих максимальную вариацию в поглощении и отражении радиации зеленой биомассой растительности, к их сумме. Для засушливых территорий значения NDVI достаточно хорошо отражают уровень водообеспеченности (с коэффициентами корреляции в диапазоне 0,7–0,9). Ряд более современных индексов (VegDRI, NDDI) включают NDVI в качестве одного из входных параметров для расчета. Для оценки состояния растительности в условиях засух, влияющих на сельское хозяйство, Коган Ф. Н. разработал индекс условий роста растительности (Vegetation Condition Index, VCI) [31, 32], который используют совместно с индексом NDVI. Усовершенствованный вегетационный индекс (EVI), впервые был предложен в работе А. Уэте и группы специалистов из Бразилии и Университета штата Аризона, США. Он основан на использовании спектрорадиометра MODIS для оценки вегетационных условий [33, 34]. EVI разработан для усиления сигнала вегетирующей растительности в районах с высоким уровнем растительной биомассы и улучшения возможностей мониторинга.

Нормализованный разностный индекс засухи (Normalized Difference Drought Index) (NDDI) [35, 36], разработанный Университетом Небраски, также основан на использовании спутниковых данных MODIS при оценке засухи. Его рассчитывают с учетом нормализованных разностных вегетационного (NDVI) и водного (NDWI) индексов.

Индекс NDDI более отзывчив и имеет широкий диапазон значений в период засухи. RDVI (ренормализованный разностный вегетационный индекс) не чувствителен к влиянию почвенного покрова и положения солнца, однако имеет ограничения по применению для территорий с изреженной растительностью или для засушливых районов. В индексе используют разницу между длинами волн, близкими к инфракрасному и красному диапазонам, и наряду с NDVI его применяют для выделения здоровой растительности [37].

VCI (индекс состояния вегетации) позволяет оценить временную и пространственную изменчивость состояния растительности. Индекс VCI выражается в % и показывает текущее значение оценки между крайними граничными значениями (минимальным и максимальным) за предыдущие годы. Более низкие и высокие значения соответственно указывают на плохое и хорошее состояние растительности [38].

Материалы и методы исследований

В задаче мониторинга озимых культур можно выделить три основных этапа: инвентаризация полей и посевов; оценка состояния посевов; анализ условий произрастания посевов и анализ причин выявленных аномалий в их развитии. В рамках проекта с целью создания региональной системы мониторинга озимых культур проведено исследование возможностей усовершенствования алгоритмов картографирования озимых культур на территории крымского полуострова и разработка методов оценки состояния озимых культур для их мониторинга.

В качестве предварительных этапов разработки методики идентификации состояния посевов выполнена оценка карт среднего разрешения территории Крыма. Проведен анализ их применимости в качестве опорных данных для обучения классификатора при выявлении различного состояния однотипных посевов с применением спутниковых изображений высокого пространственного разрешения. Для усовершенствования метода классификации проведен анализ особенностей региональной и межсезонной изменчивости фенологических и спектрально-отражательных характеристик сельскохозяйственных культур.

Проведен сбор репрезентативной с точки зрения территориального охвата и тематической детальности выборки о расположении, состоянии сельскохозяйственных культур за 2018 и 2019 гг. методом наземных обследований, а также экспертного дешифрирования. Выполнен экспертный анализ изображений высокого пространственного разрешения (совместно с наземной информацией) с использованием данных региональной статистики о площадях погибших и списанных посевов. Собранные данные позволили провести валидацию получаемых карт озимых, а также методов оценки состояния посевов.

Предлагаемые подходы к оценке состояния посевов основаны на анализе временных рядов спектральных вегетационных индексов, отражающих динамику их состояния в течение сезона вегетации, и направлены на выявление аномалий в развитии растений. Во-первых, проведено исследование возможностей косвенной оценки наступления засушливых условий как отклика растительности на нехватку водных ресурсов для формирования урожая. В работе использовали серии обработанных спутниковых изображений Landsat 8 OLI/TIRS за вегетационные периоды 2018 и 2019 гг. и выполнен расчет индексов NDVI, NDDI, EVI, RDVI, VCI, и др. Парный расчет косвенных индикаторов позволит усовершенствовать алгоритм выявления территорий и выделить порог перехода условий в засушливые. Во-вторых, предложено использование подхода оценки состояния посевов на основе сравнения текущей динамики NDVI с эталоном культуры. Под эталоном культуры понимают ряды средних или медианных значений вегетационного индекса, а также стандартного отклонения. Для корректного сравнения ряды спутниковых индексов (наблюдаемые и эталонные) приводят к единой шкале накопленных эффективных температур воздуха. Для каждого значения накопленных температур выполняется построение перцентилей, показывающих, какой процент полей в исторических данных характеризовался худшей динамикой развития, чем исследуемое поле.

Также в рамках работы проведен ретроспективный анализ метеорологических данных совместно с динамикой урожайности озимых культур за период 1988–2019 гг.

Результаты и их обсуждение

Проведен ретроспективный анализ метеорологических данных с расчетом обеспеченности года по осадкам и урожайности культур для определения характерных особенностей при наступлении засух. Источник данных по площадям

и урожайности культур – Статистическое управление Крыма, метеорологических данных – ФГБУ «Крымское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» (метеостанция Клепинино).

Таблица 1 – Варьирование вегетационных периодов по обеспеченности осадками (метеостанция Клепинино, 1988–2019 гг.)

Условия периода по обеспеченности осадками	Годы, сезоны которых близки по уровню обеспеченности осадками, в т.ч. для культур:		
	год в целом* (I–XII мес.)	ранние яровые (I–VI)	озимые (X–VI)
Засушливые	1994, 2012, 1993	2017, 1996, 1993	2018, 2013, 1994
Средние	1999, 2007, 2003	2002, 1999, 2000	2008, 2007, 2003
Влажные	1997, 2004, 2016	2016, 2015, 1989	2016, 2015, 1989

Примечания: * – без 2019 г.; средние в столбцах годы соответствуют среднему (50 %), засушливому (95 %) и влажному (5 %) по осадкам, а в пределах одной колонки левее находятся более влажные годы.

Данные, приведенные в таблице, подтверждают вывод, сделанный в работе [39], о том, что для года в целом и для отдельных периодов обеспеченность осадками в большинстве случаев различается. Для засушливых территорий, подверженных засухам, это свидетельствует о необходимости, кроме ориентации на количество осадков, задействовать дополнительные источники информации, одним из которых являются данные ДЗЗ. Подтверждением этого служит информация, приведенная в таблице 2, где для всех приведенных в таблице 1 засушливых лет и периодов указаны данные о соответствующих суммах осадков и уровне средней урожайности по району (данные статистической отчетности).

Таблица 2 – Средняя урожайность сельскохозяйственных культур в разные по обеспеченности осадками годы (для засушливых лет и периодов), Красногвардейский район

Год	Осадки, мм			Сельскохозяйственная культура		
	I–XII	I–VI	X–VI**	зерновые и зернобобовые	яровой ячмень	озимая пшеница
1993	228*	122*	247	29,4	24,5	30,5
1994	259*	161	222*	24,5	25,5	25,4
1996	384	128*	260	17,8*	14,2*	20,6
2012	251*	177	265	17,9	14,9	15,2*
2013	419	180	230*	16,5*	8,7*	12,2*
2017	288	155*	250	29,7	28,5	31,6
2018	553	168	235*	12,0*	6,8*	14,4*

Примечания: * – суммы осадков, соответствующие засушливым годам и периодам в таблице 1, а также по три минимальных значения урожайности по культурам (и видам); ** – с октября по декабрь предыдущего и январь – июнь заданного года.

При анализе данных из таблицы 2 необходимо учитывать, что дополнительные изменения уровня связи урожайности с суммами осадков могут быть вызваны различным распределением осадков в течение вегетационного периода в разные годы, а также варьированием репрезентативности данных метеостанции Клепинино территории всего района.

Условия обеспеченности осадками периода вегетации озимых 2017–2018 гг. были засушливыми, соответствующими повторяемости такого периода не чаще одного раза в 10 лет, при этом тот же период (X–XII месяцы 2018 г. и I–VI 2019 г.) был достаточно влажным, с обеспеченностью суммы осадков за этот период 24,5 %,

то есть настолько же и более влажные годы встречаются приблизительно один раз в четыре года. Для ранних яровых культур 2018 г. был близким к средне-засушливому (сумма осадков за январь – июнь составила 168 мм и обеспеченность –81,8 %), при этом условия аналогичного периода 2019 г. были близки к средне-влажным (255 мм и обеспеченность – 34,1 %).

На основе информации о списанных посевах и их локализации, проведен расчет площадей посевов, находящихся в угнетенном состоянии, при этом значения вегетационных индексов у полей со списанными посевами использовали в качестве базы сравнения.

По данным Министерства сельского хозяйства Республики Крым, площадь погибших и списанных посевов в 2018 г. в результате неблагоприятных климатических условий, а именно засухи, составила 33720,8 га, в Красногвардейском районе – 8212,0 га (зерновых).

Для оценки возможности использования вегетационных индексов при картировании посевов, находящихся в неудовлетворительном состоянии, были выделены диапазоны градации состояния посевов в нормальном и угнетенном состоянии. Для условий 2018 и 2019 г. по Красногвардейскому району было проведено сравнение полученных с использованием индексов NDVI, VCI, NDDI, RDVI и EVI (рисунок 1) расчетных и фактических (по данным отчетности) значений площади посевов, находившихся в неудовлетворительном состоянии (или списанных). Пример картирования значений индексов для территории Красногвардейского района для второй половины апреля 2018 и 2019 гг. приведен на рисунке 1. По результатам анализа определено, что нормализованный разностный индекс засухи (NDDI) оказался наиболее применимым (отклонение площадей от списанных за 2018 г. около 50 % в большую сторону). При этом необходимо учесть, что данное превышение может быть вызвано тем, что часть земель с посевами в очень плохом состоянии, принадлежащих небольшим сельскохозяйственным предприятиям, не попала в процедуру списания и не была учтена из-за особенностей подготовки документов для получения компенсации.

Наличие диапазонов градации состояния посевов позволяет использовать данную классификацию для определения посевов в угнетенном состоянии при отсутствии данных полевых наблюдений на основе обработки данных ДЗЗ.

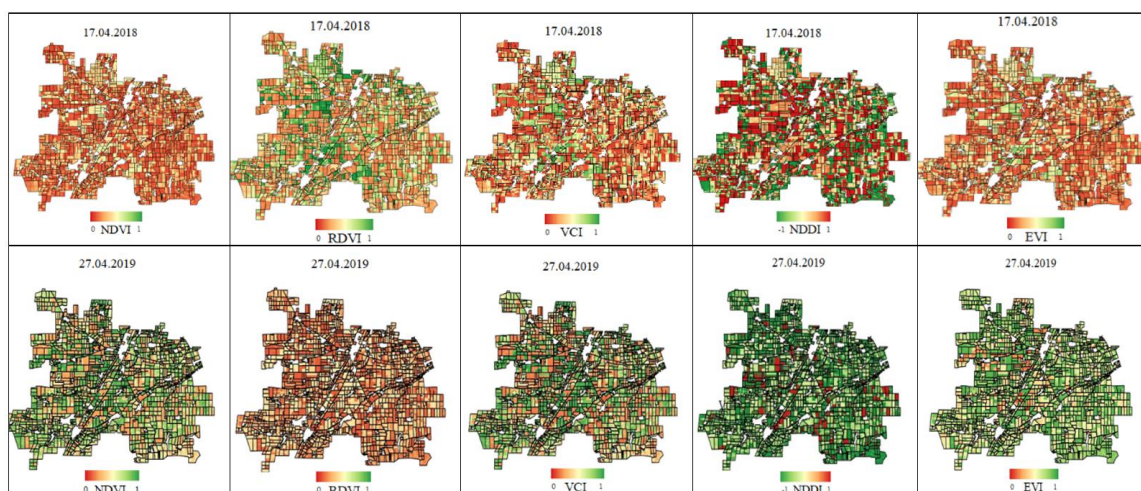


Рисунок 1 – Сравнение вегетационных индексов для Красногвардейского района

На основе проведенного анализа составлен алгоритм попарного расчета косвенных индикаторов наступления засухи на основе данных дистанционного

зондирования Земли и описана методика идентификации наступления засушливых условий с использованием данных дистанционного зондирования (рисунок 2).

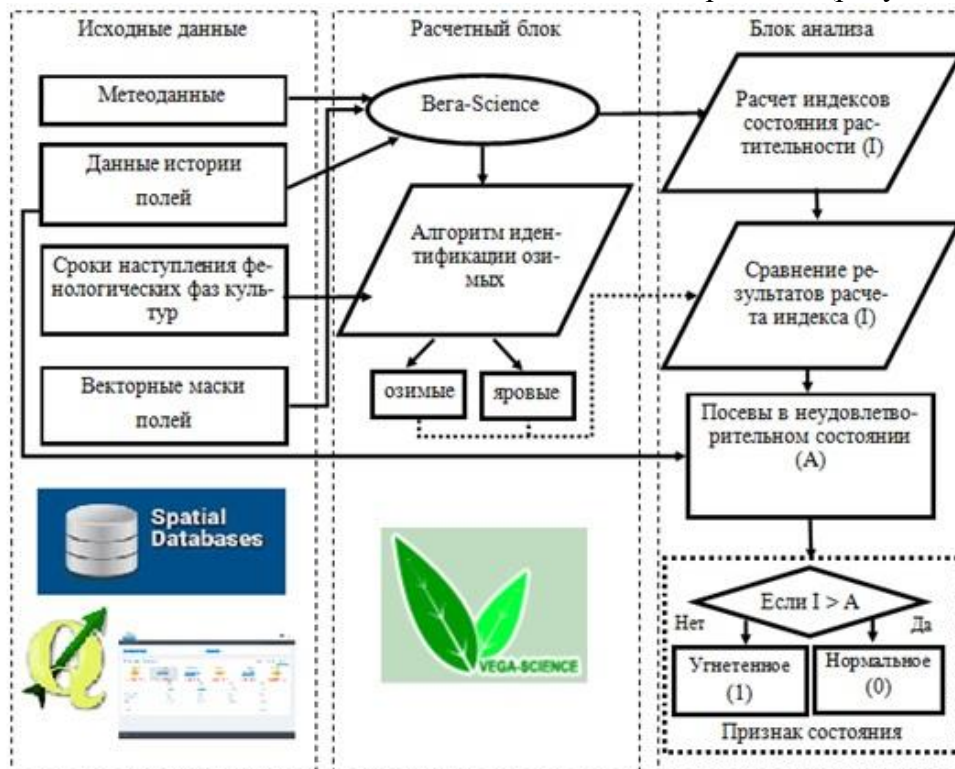


Рисунок 2 – Алгоритм расчета косвенных индикаторов наступления засухи

Алгоритм расчета состоит из трех блоков: исходных данных, расчетного блока (реализуется в Вега-science) и блока анализа.

Как было описано ранее, временные ряды вегетационных индексов отражают динамику развития, а их значения на качественном уровне отражают состояние посевов. Для оценки наличия проблем в развитии и повреждении посевов вследствие тех или иных неблагоприятных факторов предложено использование подхода сравнения текущих показателей развития посевов на поле с эталоном развития культуры. Предполагается, что эталон отражает нормальную сезонную динамику культуры. В качестве эталона развития посевов может выступать среднееголетнее значение индекса NDVI для анализируемой культуры в определенном районе или, при отсутствии многолетней статистики по культурам, значения NDVI за год, близкий к климатической норме. При наличии этих данных выявление аномалий в развитии посевов может быть основано на оценке отклонений текущих значений вегетационного индекса от эталонных, соответствующих «нормальному» развитию посевов культуры, и состояние посевов признается аномальным в случае выхода значений показателя за определенный порог.

В общем виде методика оценки состояния посевов состоит из следующих шагов:

1. Сбор статистики – наземных опорных данных;
2. Сбор и обработка спутниковых данных;
3. Построение временных рядов NDVI, отражающих нормальную динамику развития посевов, характерную для заданной территории и типа растительности, из которых исключены аномальные отклонения. В качестве «нормы» может использоваться результат осреднения многолетних данных и среднегодовой эталон для определенной культуры;

4. Ежедневное вычисление текущего значения NDVI поля, для которого проводится мониторинг;

5. Сравнение текущего значения NDVI поля с нормой с расчетом перцентилей или числа среднеквадратичных отклонений и выявление фактов отклонений (аномалий) развития посевов с помощью коридора допустимых отклонений;

6. Анализ возможных причин отклонений развития, в том числе в результате неблагоприятных погодных явлений, определение площади пострадавших посевов.

Для построения эталона культуры необходимо наличие наземных данных о посевах в исследуемом регионе. По всем имеющимся полям с информацией о культуре на основе данных ДЗЗ рассчитывается индекс NDVI (ежедневные значения); построение сглаженных временных рядов вегетационных индексов осуществляется на основе преобработанных спутниковых данных. Для построения эталона озимой пшеницы для Красногвардейского и Белогорского районов Крыма использована имеющаяся у ИКИ РАН статистика о границах полей и выращиваемых культурах за 2016–2017 гг. и разработанная там же автоматизированная технология сбора, хранения и предварительной обработки спутниковых данных и построения ежедневных временных рядов вегетационного индекса NDVI [40]. Таким образом, временные ряды NDVI для полей озимой пшеницы в исследуемых районах построены на основе данных MODIS по полям с известной культурой. Далее, на основе рядов спутниковых индексов вычисляют показатели динамики культуры – среднее и медианное значение индекса, а также его стандартное отклонение. Локальный эталон культуры – это ряд средних или медианных значений вегетационного индекса для каждой суммы накопленных температур. Также рассчитывают ряд стандартных отклонений для каждого эталона. Эталон развития озимой пшеницы для исследуемых районов Крыма был построен за 2016 и 2017 гг. (отдельно за каждый сезон), сезоны проверяли на соответствие климатической норме и затем данные были усреднены.

Оперативная оценка состояния посевов основана на анализе степени отклонения текущей динамики вегетационного индекса от эталона. Для исследуемого поля на вход поступают оперативные данные о временном ряде спутникового индекса, осредненные в границах поля, и значения эталонных значений. Для корректного сравнения исследуемой динамики развития посевов с эталоном и исключения эффекта «сдвига сезона» предложено приводить ряды спутниковых индексов к единой шкале накопленных эффективных температур воздуха. Известно, что скорость развития растений зависит от температуры воздуха и для достижения растениями определенной фазы роста необходимо накопление определенной суммы температур. Таким образом, приведение временных рядов вегетационных индексов к единой шкале накопленных температур позволяет оценивать отклонение посевов от нормы в сопоставимых фазах их развития. При этом использование шкалы накопленных температур требует выбора устойчивой точки отсчета, соответствующей одному и тому же этапу развития культуры для разных лет. Такой точкой отсчета может служить момент начала вегетации. Для оценки момента начала вегетации в данной работе использован метод аппроксимации временного ряда гауссовыми кривыми [41].

Итак, для посевов на поле оценивают момент начала вегетации и сумму накопленных температур воздуха и осуществляют переход от временной шкалы к шкале накопленных температур для обеспечения сопоставимости данных различных лет и районов. Далее, для оценки отклонений развития посевов от

эталона, предлагается использовать два подхода: измерение отклонения в перцентилях или стандартных отклонениях.

Перцентили дают легко интерпретируемую оценку отклонения поля от нормы, указывающую на его состояние в сравнении с ретроспективными данными по этому полю. Если текущее состояние поля лучше, чем состояние N % исторических полей на той же фазе развития, то можно сказать, что оно лежит в перцентиле N. Перцентиль, в который попадает поле, можно использовать для оценки его текущего состояния относительно репрезентативной исторической выборки и установления порогов аномалий. Оценка аномалий на основе перцентилей позволяет в полной мере учесть статистику, на основе которой строится норма поведения культуры.

В случае использования перцентилей в качестве показателей аномалий в развитии, выявление отклонений выглядит следующим образом:

1. Для каждого момента времени устанавливают, в какой перцентиль попадает текущее значение NDVI анализируемого поля;
2. Проводят его осреднение в скользящем окне, позволяющее отфильтровать случайные временные аномалии в значениях NDVI;
3. Определяют, выходит ли вычисленный перцентиль за порог «аномалии». Предлагаются пороги на значения NDVI, такие, что если оно попадает в 25 % перцентиль, то наблюдается серьезная аномалия, если оно ниже 10 % перцентили, то это может означать наличие экстремальной аномалии развития культуры.

По вышеописанной методике проведен анализ состояния посевов озимой пшеницы и озимого ячменя для Республики Крым в 2018 г. в условиях засухи конца апреля – начала мая. Валидацию результатов детектирования аномалий проводили на ряде тестовых полей в Красногвардейском и Белогорском районах, состояние которых в 2018 г. было известно благодаря проведенным наземным обследованиям.

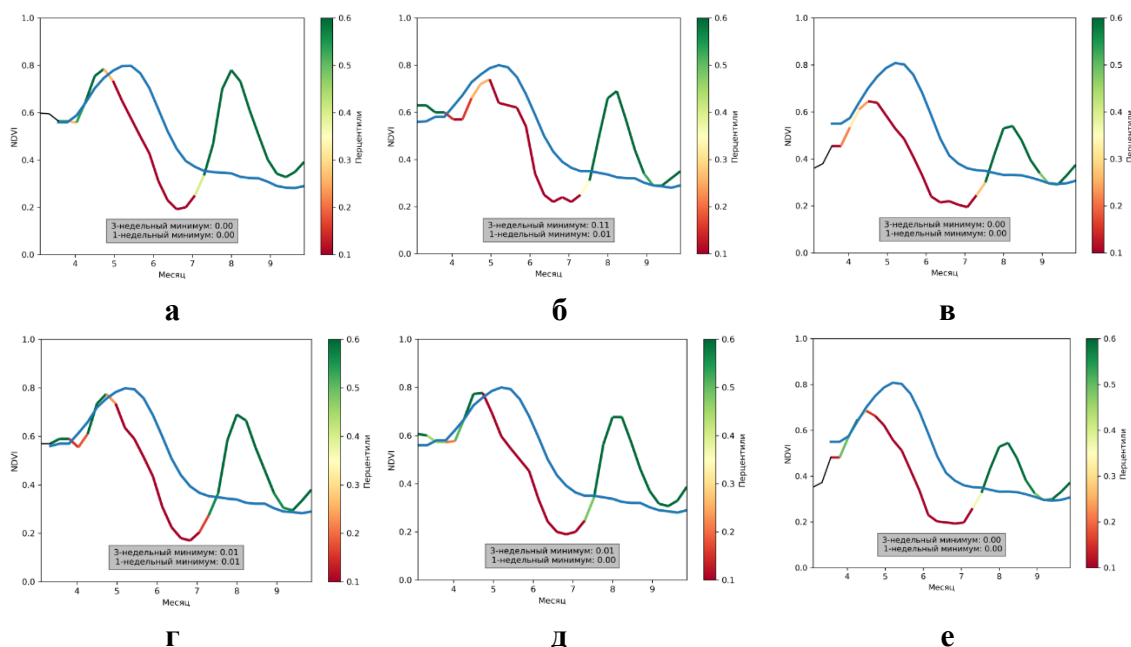


Рисунок 3 – Детектирование аномалий развития озимой пшеницы в Крыму во время засухи 2018 г. (в терминах перцентилей)

Примечания: а, б, в, г, д, е – NDVI профили различных полей озимой пшеницы в Красногвардейском районе и их сравнение с эталоном. Синяя линия – эталон озимой пшеницы. С начала мая для всех полей наблюдаются отклонения от эталона (поля попадают в перцентиль ниже 0.2).

Для полей было корректно детектировано наличие (рисунок 3 а-е) и отсутствие (рисунок 4 а-г) аномалий. Согласно наземным данным, поля с выявленными аномалиями в развитии озимых списаны вследствие низкой урожайности.

На уровне района для Красногвардейского района Республики Крым были проанализированы годы, по которым есть данные об урожайности озимой пшеницы. В 2012 и 2018 гг. отмечено существенное отклонение развития посевов от среднееголетней нормы как на протяжении весеннего периода развития, так и в точке максимума (рисунок 5 а). В 2017 г. средняя урожайность озимой пшеницы в районе была в норме – выше 25 ц/га (см. таблицу 2), что подтверждают данные ДЗЗ. На рисунке 5 б, в показан ход развития озимой пшеницы в Красногвардейском районе в 2016 и 2017 гг. соответственно. Ход развития соответствует норме, без отклонений в течение сезона вегетации, в точке максимума отмечено превышение среднееголетних значений вегетационного индекса (выше 0,7).

Исследования показали, что аномалии в развитии культур в случае, если они носят массовый характер на территории района и приводят к снижению урожайности, можно выявить с помощью анализа динамики временных рядов вегетационного индекса NDVI и с помощью оценки их отклонения от среднееголетней нормы.

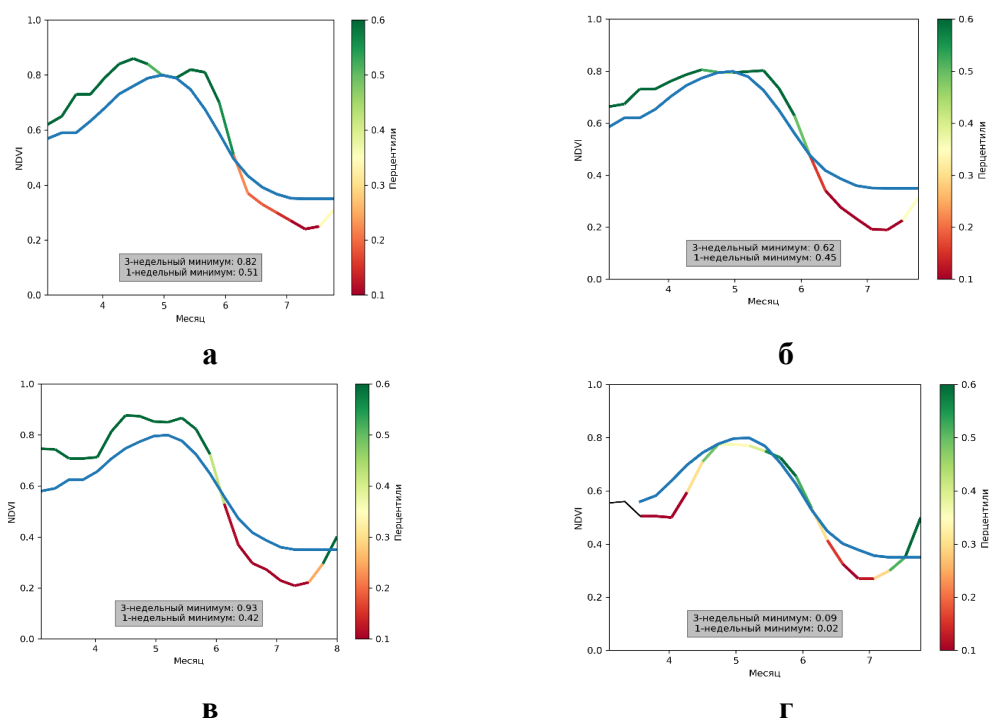


Рисунок 4 – Оценка состояния полей озимых, слабо пострадавших от засушливых условий 2018 г. (поля засеяны по пару)

Примечания: а, б, в, г – NDVI профили различных полей озимой пшеницы в Красногвардейском районе и их сравнение с эталоном. Синяя линия – эталон озимой пшеницы. В апреле-мае поля находятся в хорошем состоянии по сравнению с эталоном (поля попадают в перцентиль выше 0,5, т.е. их состояние лучше, чем у 50 % исторических полей). Состояние поля «г» в мае оценивалось как удовлетворительное.

Анализ результатов валидации, выполненной в сравнении с данными наземного обследования, подтверждает применимость методов дистанционной оценки состояния посевов для выявления ситуаций их аномального развития.

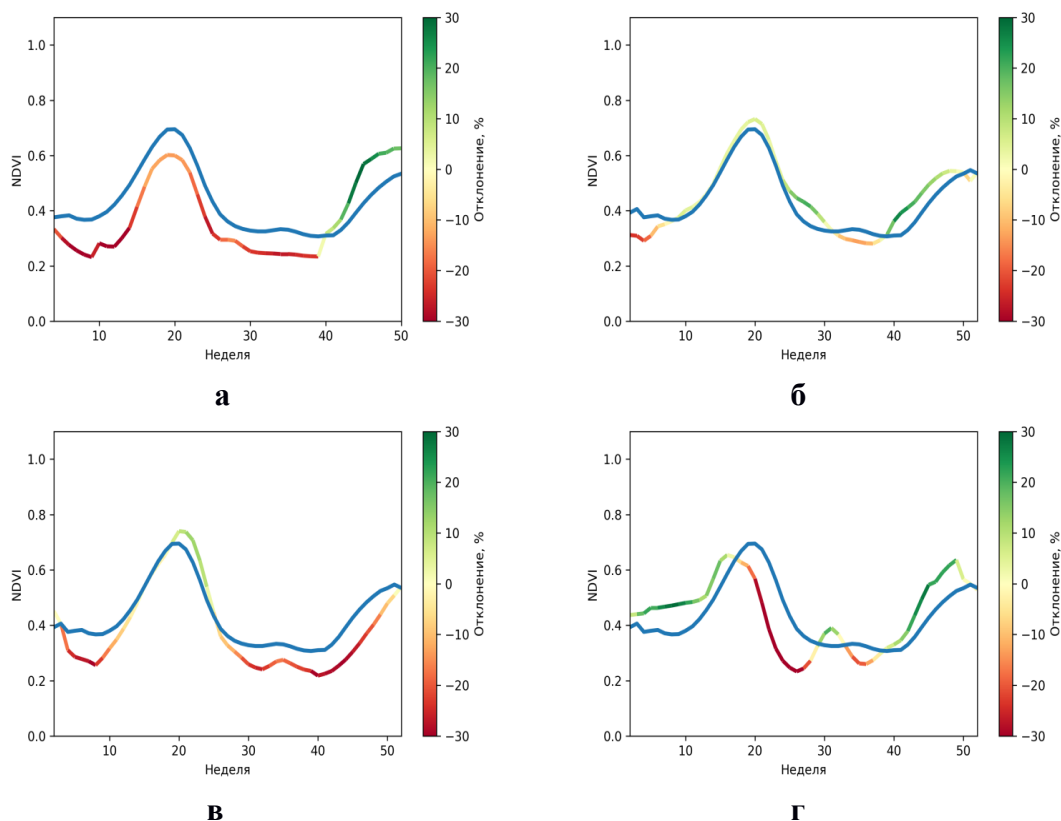


Рисунок 5 – Детектирование аномалий развития озимых культур в Республике Крым (Красногвардейский район)

Примечания: а – 2012, б – 2016, в – 2017, г – 2018 гг. Синим обозначен ход среднемноголетней нормы NDVI. Отклонение оценивается в терминах среднеквадратичных отклонений.

По факту выявления аномалии в развитии посевов предполагается экспертное определение причин выявленных аномалий, определение площади пострадавших посевов и наземная проверка факта стресса посевов. Для проведения подобной работы требуется совместный анализ временных рядов вегетационных индексов с визуализацией отклонений от эталона, анализ метеорологической информации, спутниковых изображений и продуктов (карт), наземных данных. Эти возможности заложены в сервисе Vega-science и доступны широкому кругу пользователей.

Выводы

В связи с потенциальными изменениями климата существует вероятность увеличения частоты возникновения и интенсивности засух, что в свою очередь может оказать влияние на обеспечение продовольствием региона, поэтому разработка механизмов и методов прогнозирования и мониторинга ситуации является актуальной. Для обеспечения устойчивого развития территории и решения продовольственной проблемы в регионах рискованного сельского хозяйства необходима разработка механизмов аналитического мониторинга за динамикой развития сельскохозяйственных культур.

Использование индексов по своевременному выявлению засухи позволяет кроме того обеспечить меры для смягчения последствий засухи и провести мониторинг её развития и оперативную оценку ущерба.

Проведенные исследования показали практическую применимость подхода оценки состояния посевов на основе данных дистанционного зондирования и исторической информации о динамике посевов в прошлые годы как на уровне полей, так и на уровне районов.

В дальнейшем необходимы дополнительные исследования и более точный подбор локального порога, выход за который означает аномалии в развитии растительности, строгое определение ограничений работоспособности методики (размер полей, тип аномалий) и дополнительная валидация по более широкому кругу культур и районов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Министерства образования, науки и молодежи Республики Крым в рамках научного проекта № 19-416-910006-р-а с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды.

Литература

1. Wilhite D. A. World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP) (2014) National Drought Management Policy Guidelines: A Template for Action. Integrated Drought Management Programme (IDMP) Tools and Guidelines. Series 1. WMO, Geneva, Switzerland and GWP, Stockholm, Sweden. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1164_ru.pdf (дата обращения 19.11.2019).
2. Хлебникова Е. И., Павлова Т. В., Сперанская Н. А. Засухи: методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем // под рук. Семенова С. М. М.: Росгидромет, 2012. С. 126–164. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://downloads.igce.ru/publications/metodi_ocenki/04.pdf (дата обращения 19.11.2019).
3. Серякова Л. П. Агрометеорология: учебное пособие. Л.: Ленинградский политехнический институт, 1978. 158 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007626820> (дата обращения 19.11.2019).
4. Грингофф И. Г. Засухи и опустынивание – экологические проблемы современности // Труды ВНИИСХМ. 2000. Вып. 33. С. 14–40.
5. Золотокрылин А. Н. Климатическое опустынивание. М.: Наука. 2003. 245 с.
6. Клещенко А. Д. Современные проблемы мониторинга засух // Труды ВНИИСХМ. 2000. Вып. 33. С. 3–13.
7. Климатические катаклизмы на Кубани в историческом прошлом. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://gazetavk.ru/> (дата обращения 19.11.2019).
8. Города жаждут. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://zn.ua/> (дата обращения 19.11.2019).
9. Robbins R. G. Famine in Russia, 1891–1892. The imperial government responds to a crisis. New York: Columbia University Press, 1975. 259 p.
10. «Голод» в Российской Империи (1890–1910-е гг.). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cont.ws/> (дата обращения 21.11.2019).
11. Великий голод в Крыму. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://newsland.com/> (дата обращения 20.11.2019).
12. Аграрные рекорды и антирекорды Крыма. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.krymr.com/> (дата обращения 21.11.2019).
13. Засуха в Крыму: ущерб идет на сотни миллионов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://newizv.ru/> (дата обращения 20.11.2019).
14. Более 70 хозяйств пострадали от засухи в Крыму. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://milknews.ru/> (дата обращения 20.11.2019).
15. Svoboda M., Fuchs V. A. World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP), 2016: Handbook of Drought Indicators and Indices. Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines. Series 2. Geneva. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.droughtmanagement.info/literature/GWP_Handbook_of_Drought_Indicators_and_Indices_2016.pdf (дата обращения 19.11.2019).
16. Дунаева Е. А. Применение ГИС и ДЗЗ для оценки водообеспеченности территории // Всероссийская научная конференция молодых ученых с международным участием «Современное состояние, проблемы и перспективы развития агропромышленного комплекса». Симферополь: ГБУ РК «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма», 2015. [Электронный ресурс].

- Режим доступа: <http://confmol.niishk.ru/data/documents/Dunaeva-E.A..pdf> (дата обращения 19.11.2019).
17. Щербенко Е. В. Дистанционные методы выявления сельскохозяйственной засухи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4. № 2. С. 408–419.
 18. Palmer W. C. Meteorological Drought. Research Paper No. 45. US Weather Bureau. Washington: DC, 1965. 59 p.
 19. Hayes M. Drought indexes. Lincoln, NE: University of Nebraska. 2002. 9 p.
 20. Cook E. R., Woodhouse C. A., Eakin C. M., Meko D. M., Stahle D. W. Long-term changes in the western United States // Science. 2004. Vol. 306. No. 5698. P. 1015–1018. DOI: 10.1126/science.1102586.
 21. Kim T. W., Valdes J. B., Aparicio J. Frequency and spatial characteristics of droughts in the Conchos River Basin, Mexico // Water International. 2002. No. 27 (3). P. 420–430. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arizona.pure.elsevier.com/en/publications/frequency-and-spatial-characteristics-of-droughts-in-the-conchos-> (дата обращения 19.11.2019).
 22. Mika J., Horvath S., Makra L., Dunkel, Z. The Palmer Drought Severity Index (PDSI) as an indicator of soil moisture // Physics and Chemistry of the Earth. 2005. P. 223–230. DOI: 10.1016/j.pce.2004.08.036.
 23. Kogan F. N. Global drought watch from space // Bulletin of the American Meteorological Society. 1997. No. 78. P. 621–636. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/249615841_Global_Drought_Watch_from_Space (дата обращения 19.11.2019).
 24. Селянинов Г. Т. О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. 1928. Вып. 20. С. 165–177.
 25. Зондзе Е. К., Хомякова Г. В. Моделирование формирования влагообеспеченности территории Европейской России в современных условиях и основы оценки агроклиматической безопасности // Метеорология и гидрология. 2006. № 2. С. 98–105.
 26. Brown J. F., Wardlow B. D., Tadesse T., Hayes M. J., Reed B. C. The Vegetation Drought Response Index (VegDRI): a new integrated approach for monitoring drought stress in vegetation // GIScience & Remote Sensing. 2008. No. 45 (1). P. 16–46.
 27. Дунаева Е. А., Попович В. Ф. База данных критериев оценки водообеспеченности территории // Таврический вестник аграрной науки. 2017. № 1 (9). С. 107–118.
 28. Tarpley J. D., Schneider S. R., Money R. L. Global vegetation indices from the NOAA-7 meteorological satellite // Journal of Climate and Applied Meteorology. No. 23 (3). 1984. 494 p.
 29. Kogan F. N. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polarorbiting satellite data // Bulletin of the American Meteorology Society. 1995. No. 76(5). P. 655–668.
 30. Karnieli A., Agam N., Pinker R. T., Anderson M., Imhoff M. L., Gutman G. G., Panov N., Goldberg A. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations // Climate. 2010. Vol. 23. P. 618–633. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-24112-8_4 (дата обращения 19.11.2019).
 31. Kogan F. N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection // Advances in Space Research. 1995. No. 15(11). P. 91–100.
 32. Lui W. T., Kogan F. N. Monitoring regional drought using the vegetation condition index // International Journal of Remote Sensing. 1996. No. 17. P. 2761–2782. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/248977064_Monitoring_regional_drought_using_the_Vegetation_Condition_Index (дата обращения 19.11.2019).
 33. Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E. P., Gao X., Ferreira L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices // Remote Sensing of Environment. 2002. No. 83 (1). P. 195–213.
 34. Лобанов Г. В., Зайцева А. Ф., Полякова А. В., Тришкин Б. В., Михеев К. Ю. Пространственно-временная динамика вегетационного индекса EVI (Enhanced vegetation index) в разных типах ландшафтов Брянской области // Ежегодник НИИ фундаментальных и прикладных исследований. 2012. № 3 (3). С. 46–52.
 35. Gu Y., Brown J. F., Verdin J. P., Wardlo B. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States // Geophysical research letters. 2007. Vol. 34. L06407. DOI: 10.1029/2006GL029127.
 36. Дунаева Е. А., Попович В. Ф. Оценка водообеспеченности сельских территорий с использованием ДЗЗ, ГИС и стандартизированного индекса осадков // Материалы II Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». Красноярск: Сибирский Федеральный университет, 2015. С. 147–150.
 37. Understanding NDVI. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://support.dronedeploy.com/> (дата обращения 26.11.2019).
 38. Vegetation Condition Index. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://land.copernicus.eu/global/products/VCI> (дата обращения 26.11.2019).
 39. Попович В. Ф. Особенности сценарного моделирования развития

сельскохозяйственных культур // Сборник материалов IV Международной научной конференции «Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки» Симферополь: ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма», 2019. С. 328–330.

40. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашницкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.

41. Хвостиков С. А., Барталев С. А. Построение эталонов сезонной динамики NDVI для основных сельскохозяйственных культур // Электронный сборник статей 16-й конференции «Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли – RORSE 2018». М.: ИКИ РАН, 2019. С. 55–59.

References

1. Wilhite D. A. World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP) (2014) National Drought Management Policy Guidelines: A Template for Action. Integrated Drought Management Programme (IDMP) Tools and Guidelines. Series 1. WMO, Geneva, Switzerland and GWP, Stockholm, Sweden. [Electronic resource]. Access point: https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1164_ru.pdf (reference's date 19.11.2019).
2. Khlebnikova E. I., Pavlova T. V., Speranskaya N. A. Droughts: Methods for assessing the effects of climate change on physical and biological systems // Hand. call mon. Semenov S. M. Moscow: Roshydromet, 2012. P. 126–164. [Electronic resource]. Access point: http://downloads.igce.ru/publications/metodi_ocenki/04.pdf (reference's date: 19.11.2019).
3. Seryakova L. P. Agrometeorology: textbook. L: Leningrad Polytechnic Institute, 1978. 158 p. [Electronic resource]. Access point: <https://search.rsl.ru/en/record/01007626820> (reference's date 19.11.2019).
4. Gringoff I. G. Droughts and desertification – environmental problems of our time // Transactions of VNIISKHM. 2000. No. 33. P. 14–40.
5. Zolotokrylin A. N. Climatic desertification. Moscow: Nauka, 2003. 245 p.
6. Kleshchenko A. D. Current problems of drought monitoring // Transactions of VNIISKHM. 2000. No. 33. P. 3–13.
7. Cities crave. [Electronic resource]. Access point: <https://zn.ua/> (reference's date: 19.11.2019).
8. Robbins R. G. Famine in Russia, 1891–1892. The imperial government responds to a crisis. New York: Columbia University Press, 1975. 259 p.
9. Robbins R. G. Famine in Russia, 1891–1892. The imperial government responds to a crisis. New York: Columbia University Press, 1975. 259 p.
10. The great famine in the Crimea. [Electronic resource]. Access point: <https://newsland.com/> (reference's date 20.11.2019).
11. Climatic disasters in the Kuban in the historical past. [Electronic resource]. Access point: <http://gazetavk.ru/> (reference's date 11.19.2019).
12. Agrarian records and anti-records of Crimea. [Electronic resource]. Access point: <https://ru.krymr.com/> (reference's date 21.11.2019).
13. Drought in Crimea: hundreds of millions of damages. [Electronic resource]. Access point: <https://newizv.ru/> (date of appeal: 20.11.2019).
14. More than 70 households were affected by the drought in Crimea [Electronic resource]. Access point: <https://milknews.ru/> (reference's date 20.11.2019).
15. Svoboda M., Fuchs B. A. World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP), 2016: Handbook of Drought Indicators and Indices. Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines. Series 2. Geneva. [Electronic resource]. Access point: http://www.droughtmanagement.info/literature/GWP_Handbook_of_Drought_Indicators_and_Indices_2016.pdf (reference's date 11.2019).
16. Dunaieva Ie. A. The use of GIS and remote sensing for assessing the water supply of the territory // All-Russian Scientific Conference of Young Scientists with International Participation “Current status, problems and prospects for the development of agriculture”. Simferopol: Federal State Budget Scientific Institution “Research Institute of Agriculture of Crimea”, 2015. [Electronic resource]. Access point: http://confmol.niishk.ru/data/documents/Dunaieva_Ie.A.pdf (reference's date 19.11.2019).
17. Shcherbenko E. V. Remote methods for identifying agricultural drought // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2007. Vol. 4. No. 2. P. 408–419.
18. Palmer W. C. Meteorological Drought. Research Paper No. 45, US Weather Bureau. Washington: DC, 1965. 59 p.
19. Hayes M. Drought indexes. Lincoln, NE: University of Nebraska. 2002. 9 p.

20. Cook E. R., Woodhouse C. A., Eakin C. M., Meko D. M., Stahle D. W. Long-term changes in the western United States // *Science*. 2004. Vol. 306. No. 5698. P. 1015–1018. DOI: 10.1126/science.1102586.
21. Kim T. W., Valdes J. B., Aparicio J. Frequency and spatial characteristics of droughts in the Conchos River Basin, Mexico // *Water International*. 2002. No. 27 (3). P. 420–430. [Electronic resource]. Access point: <https://arizona.pure.elsevier.com/en/publications/frequency-and-spatial-characteristics-of-droughts-in-the-conchos-> (reference's date 19.11.2019).
22. Mika J., Horvath S., Makra L., Dunkel, Z. The Palmer Drought Severity Index (PDSI) as an indicator of soil moisture // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2005. P. 223–230. DOI: 10.1016/j.pce.2004.08.036.
23. Kogan F. N. Global drought watch from space // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1997. No. 78. P. 621–636. [Electronic resource]. Access point: https://www.researchgate.net/publication/249615841_Global_Drought_Watch_from_Space (reference's date 19.11.2019).
24. Selyaninov G. T. On agricultural climate assessment // *Transactions in Agricultural Meteorology*. 1928. No 20. P. 165–177.
25. Zoidze E. K., Khomyakova G. V. Modeling the formation of moisture in the territory of European Russia in modern conditions and the basics of assessing agroclimatic safety // *Meteorology and hydrology*. 2006. No. 2. P. 98–105.
26. Brown J. F., Wardlow B. D., Tadesse T., Hayes M. J., Reed B. C. The Vegetation Drought Response Index (VegDRI): a new integrated approach for monitoring drought stress in vegetation // *GIScience & Remote Sensing*. 2008. No. 45 (1). P. 16–46.
27. Dunaieva Ie. A., Popovych V. F. Database of the territory water availability indices // *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2017. No. 1 (9). P. 107–118.
28. Tarpley J. D., Schneider S. R., Money R. L. Global vegetation indices from the NOAA-7 meteorological satellite // *Journal of Climate and Applied Meteorology*. No. 23(3). 1984. 494 p.
29. Kogan F. N. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polarorbiting satellite data // *Bulletin of the American Meteorology Society*. 1995. No. 76 (5). P. 655–668.
30. Karnieli A., Agam N., Pinker R. T., Anderson M., Imhoff M. L., Gutman G. G., Panov N., Goldberg A. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations // *Climate*. 2010. Vol. 23. P. 618–633. [Electronic resource]. Access point: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-24112-8_4 (reference's date 19.11.2019).
31. Kogan F. N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection // *Advances in Space Research*. 1995. No. 15 (11). P. 91–100.
32. Lui W. T., Kogan F. N. Monitoring regional drought using the vegetation condition index // *International Journal of Remote Sensing*. 1996. No. 17. P. 2761–2782. [Electronic resource]. Access point: https://www.researchgate.net/publication/248977064_Monitoring_regional_drought_using_the_Vegetation_Condition_Index (reference's date 19.11.2019).
33. Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E. P., Gao X., Ferreira L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices // *Remote Sensing of Environment*. 2002. No. 83 (1). P. 195–213.
34. Lobanov G. V., Zaitseva A. F., Polyakova A. V., Trishkin B. V., Mikheev K. Yu. Spatial-temporal dynamics of the vegetative index EVI (Enhanced vegetation index) in different types of landscapes of the Bryansk region // *Yearbook of the Research Institute for Fundamental and Applied Research*. 2012. No. 3 (3). P. 46–52.
35. Gu Y., Brown J. F., Verdin J. P., Wardlo B. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States // *Geophysical research letters*. 2007. Vol. 34. L06407. DOI: 10.1029/2006GL029127.
36. Dunaieva Ie. A., Popovych V. F. Water availability evaluation of rural areas with remote sensing, GIS and standardized precipitation index // *Proceedings of the II International Scientific Conference “Regional Problems of Remote Sensing of the Earth”, 2015*. P. 147–150.
37. Understanding NDVI. [Electronic resource]. Access point: <https://support.dronedeploy.com/> (reference's date 26.11.2019).
38. Vegetation Condition Index. [Electronic resource]. Access point: <https://land.copernicus.eu/global/products/VCI> (reference's date 26.11.2019).
39. Popovych V. F. Features of scenario modeling of crop development // collection of materials of the IV International scientific Conference “Current state, problems and prospects of the development of agrarian science”. Simferopol: Federal State Budget Scientific Institution “Research Institute of Agriculture of Crimea”, 2019. P. 328–330.
40. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring // *Current problems in remote sensing of the earth from space*. 2015. Vol. 12. No. 5. P. 263–284.
41. Khvostikov S. A., Bartalev S. A. Development of Seasonal NDVI Profiles References for Main Agricultural Crops. Information Electronic collection of articles of the 16th conference “Information Technologies in Remote Sensing of the Earth – RORSE 2018”. Moscow: ISR RAS, 2019. P. 55–59.

UDC 631.152+519.6

Dunaieva Ie. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Elkina E. S., Barbotkina E. S.,
Vecherkov V. V., Bartalev S. A.

USE OF REMOTE SENSING DATA FOR EARLY DIAGNOSTICS OF THE DRY CONDITIONS ACTION

Summary. Assessing the dry conditions probability and developing methodological foundations and principles for monitoring adverse situations for crops is important both at the local and regional levels. A joint project of the Research Institute of Agriculture of Crimea and IKI RAS “Scientific basis of remote sensing data application to assess of dry conditions probability” is aimed at exploring the possibilities and finding effective methods for remote assessment of crops state in the conditions of the Crimean region. The work carried out a retrospective analysis of meteorological data, with the calculation of the annual rainfall and crop yields to determine characteristic features during the onset of drought, explored the possibility of identifying winter crops using Earth remote sensing data, and proposed approaches to assessing their condition. To determine the occurrence of dry conditions, spectral vegetation indices (NDVI, NDDI, RDVI, VCI) were used as indicators of the response of plants to water availability. Data on failed crops in 2018 were used as a comparison base for identifying crops in bad/poor conditions. Vega-science and QGIS 2.18 were used to analysed the state of crops in 2018–2019, making maps of winter crops, identification of oppressed vegetation due to arid conditions and determination of areas of crops in poor condition. Comparison of several remote sensing indices minimizes the error in identifying the influence of weather conditions on the development of crops and the level of biomass. A method is proposed for identifying anomalies in the development of agricultural vegetation according to remote sensing data, based on determining deviations from the “reference” of crop development in terms of percentiles. The time series of the observed and reference NDVI values are reduced to a single scale of accumulated air temperatures, which allows comparison at comparable phenological phases of the development of crop crops and an assessment of the state of vegetation in the field relative to the reference historical index values for a given period. At the same time, the state of crops is recognized as abnormal if the indicator values exceed a certain threshold (percentile). The causes of the anomalies, in particular, arid conditions, can be established by additional analysis of weather data, including those available in the Vega-science service. Validation of the method was carried out on data on winter wheat crops for the year of 2018 crop in the Krasnogvardeisky and Belogorsky regions of Crimea. Reliable detection of anomalies in the development of crops is shown. The practical applicability of the described methodology is demonstrated by the example of the identification of winter crops in the Republic of Crimea.

Keywords: yield analysis, VEGA, geoinformation technologies, drought.

Дунаева Елизавета Андреевна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела цифрового мониторинга и моделирования агроэкосистем ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»; 295493, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 150; e-mail: dunaeva_e@niishk.ru.

Плотников Дмитрий Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории спутникового мониторинга наземных экосистем ФГБУН «Институт космических исследований РАН»; 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32; e-mail: dmitplot@d902.iki.rssi.ru.

Хвостиков Сергей Антонович, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории спутникового мониторинга наземных экосистем ФГБУН «Институт космических исследований РАН»; 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32; e-mail: khvostikov@d902.iki.rssi.ru.

Ёлкина Евгения Сергеевна, инженер лаборатории спутникового мониторинга наземных экосистем ФГБУН «Институт космических исследований РАН»; 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32; e-mail: elkina@d902.iki.rssi.ru.

Барботкина Екатерина Сергеевна, младший научный сотрудник отдела цифрового мониторинга и моделирования агроэкосистем ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»; 295453, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 150; e-mail: k.golovastova96@mail.ru.

Вечерков Валентин Валериевич, младший научный сотрудник отдела цифрового мониторинга и моделирования агроэкосистем ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»; 295453, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 150; e-mail: v.valenteen11@yandex.ru.

Барталев Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией спутникового мониторинга наземных экосистем ФГБУН «Институт космических исследований РАН»; 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32; e-mail: bartalev@d902.iki.rssi.ru.

Dunaieva Ielizaveta Andreevna, Cand. Sc. (Techn.), leading researcher of digital monitoring and agroecosystem modeling Department, FSBSI “Research Institute of Agriculture of Crimea”; 150, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea, 295493, Russia; tel.: 8 (978)-781-3981, e-mail: dunaeva_e@niishk.ru.

Plotnikov Dmitry Evgenievich, Cand. Sc. (Phys.-Math.), senior researcher, terrestrial ecosystems monitoring Laboratory, Space Research Institute (IKI) of the Russian Academy of Sciences; 84/32, Profsoyuznaya str., Moscow, 117997, Russia; e-mail: dmitplot@d902.iki.rssi.ru

Khvostikov Sergey Antonovich, Cand. Sc. (Techn.), researcher, terrestrial ecosystems monitoring Laboratory, Space Research Institute (IKI) of the Russian Academy of Sciences; 84/32, Profsoyuznaya str., Moscow, 117997, Russia; e-mail: khvostikov@d902.iki.rssi.ru.

Elkina Evgenia Sergeevna, engineer, terrestrial ecosystems monitoring Laboratory, Space Research Institute (IKI) of the Russian Academy of Sciences; 84/32, Profsoyuznaya str., Moscow, 117997, Russia; e-mail: elkina@d902.iki.rssi.ru.

Barbotkina Ekaterina Sergeevna, junior researcher of digital monitoring and agroecosystem modeling Department, FSBSI “Research Institute of Agriculture of Crimea”; 150, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea, 295493, Russia; e-mail: k.golovastova96@mail.ru.

Veчерков Valentin Valerievich, junior researcher of digital monitoring and agroecosystem modeling Department, FSBSI “Research Institute of Agriculture of Crimea”; 150, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea, 295493, Russia; e-mail: v.valenteen11@yandex.ru.

Bartalev Sergey Aleksandrovich, Dr. Sc. (Techn.), Professor, leading researcher, head of terrestrial ecosystems monitoring Laboratory, Space Research Institute (IKI) of the Russian Academy of Sciences; 84/32, Profsoyuznaya str., Moscow, 117997, Russia; e-mail: bartalev@d902.iki.rssi.ru.

Дата поступления в редакцию – 06.08.2019.

Дата принятия к печати – 12.11.2019.