Информационные инструменты распределённого анализа данных спутникового мониторинга растительных ареалов при проведении специальных экспертиз

В. П. Саворский[1], А. В. Кашницкий[2], О. Ю. Панова[1]

[1] *Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Фрязино, Московская обл., 141190 Россия*
E-mail: savor@inbox.ru

[2] *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*
E-mail: kashnizky@gmail.com

Работа посвящена созданию информационных инструментов для поддержки специализированных сервисов, используемых в процедурах выявления участков незаконного культивирования растений по данным спутниковых мультиспектральных наблюдений. Разработка этих инструментов основывается на требованиях, объективно обусловленных особенностями методов выявления таких участков. Разработанный набор инструментов применён к исследованию средствами спутникового мониторинга посевов технической конопли, являющейся модельной культурой для изучения спектральных сигнатур участков наркотикосодержащей конопли. Полученные результаты позволили оценить использование мультиспектральных и гиперспектральных сигнатур, а также спектральных индексов для выявления участков технической конопли, а именно эффективность обнаружения посевов конопли на фоне яровых зерновых (типовой фоновой культуры районов сельскохозяйственного производства чернозёмной зоны России) в течение периода вегетации. Мерой эффективности обнаружения посевов конопли стали значения расстояния Джеффриса – Матуситы между множествами значений спектральных характеристик, описывающих спектральные характеристики в диапазонах видимого и ближнего ИК-диапазонов технической конопли и яровых зерновых, наблюдаемые со спутников в период с мая по сентябрь. В качестве спектральных характеристик использованы коэффициенты отражения солнечного излучения на верхней границе атмосферы и спектральные индексы (СИ). По результатам статистического анализа данных спутниковых наблюдений аппаратурой ETM+ Landsat-7 и MSI Sentinel-2 определено, что предложенный в работе СИ NDCI совместно с СИ NDVI позволяет устойчиво обнаруживать и/или различать посадки конопли и яровых зерновых в течение большей части вегетационного периода с июня по сентябрь. Кроме того, была установлена более высокая устойчивость СИ NDCI к межгодовой изменчивости спектральных характеристик сельскохозяйственных покровов по сравнению с СИ NDVI.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, незаконное культивирование растений, спектральные сигнатуры, расстояние Джеффриса – Мацуситы

Одобрена к печати: 24.07.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-99-110

Введение

В число актуальных проблем исследования растительного покрова средствами спутникового мониторинга входят задачи раннего выявления, точной локализации и оперативного оценивания размеров участков, используемых для незаконного (противозаконного) растениеводства. Прежде всего это касается вопроса выявления участков, связанных с «незаконным культивированием растений, содержащих наркотические средства или психотропные вещества либо их «прекурсоры» (УК РФ, ст. 231). Одной из задач, существенно повышающих эффективность спутниковых методов наблюдения, является разработка специализированных информационных инструментов, обеспечивающих пользователей средствами выявления фактов незаконного культивирования растений по данным дистанционного зондирования земли (ДЗЗ).

Целью исследования является разработка такого рода специализированных информационных инструментов в составе крупной системы мониторинга, поддерживающей сервисы удалённого доступа к информационным ресурсам и средствам анализа хранимых в ней данных. Создание этих инструментов основывается на требованиях (Саворский и др., 2018), объективно обусловленных особенностями методов выявления участков незаконного культивирования растений средствами спутникового мониторинга. Разработанный набор инструментов применён к исследованию средствами спутникового мониторинга участков посевов технической конопли, являющейся модельной культурой для изучения спектральных сигнатур участков наркотикосодержащей конопли (Walthall et al., 2003). Важной методической особенностью развиваемого подхода является ориентация на исследование и разработку специализированных (или ориентированных) спектральных индексов, позволяющих при прочих равных условиях более надёжно выявлять участки земной поверхности с запрещёнными для выращивания культурами на фоне типовых для контролируемого региона сельскохозяйственных угодий. С помощью полученных в результате применения разработанных инструментов данных можно выделить спектральные индексы и кластеры, устойчиво характеризующие посевы конопли на протяжении всего периода её вегетации.

Требования к информационным системам ДЗЗ, обеспечивающим решение задач выявления и оценки продуктивности результатов незаконного землепользования

Исходя из данных аналитического обзора (Саворский и др., 2018), можно сформулировать следующие требования к сервисам информационных систем касательно состава задач выявления и оценки продуктивности результатов незаконного землепользования:

1) обеспечение автоматизированного совмещения разнородных и разновременных данных ДЗЗ, включая архивные исторические, и продуктов их обработки по регионам сельскохозяйственного производства с возможными участками незаконного землепользования;
2) обеспечение автоматизированного совмещения данных и продуктов ДЗЗ по регионам сельскохозяйственного производства с возможными участками незаконного землепользования с данными наземных наблюдений;
3) обеспечение возможностей сбора данных и проведения их анализа для мониторинга фенологических фаз как контрольных растений, так и фоновых растительных покровов;
4) предоставление автоматизированного доступа к базам данных, описывающих физико-географические характеристики региона (в том числе топографию местности), особенности почвенного покрова и водного режима;
5) предоставление автоматизированного доступа к базам данных, описывающих климатические особенности (среднестатистические значения гидрометеорологических параметров и их среднеквадратические вариации);
6) наличие доступа к оперативным данным и краткосрочным и среднесрочным гидрометеорологическим прогнозам (текущие показатели, синоптическая обстановка и накопленные значения почвенной влаги и снежного покрова);
7) наличие доступа к описаниям типовых размеров участков и типовых агротехнических приёмов в контролируемом регионе (с учётом уклада и традиций местного населения);
8) наличие доступа к описаниям особенностей севооборота, в том числе частоты и специфики применения смешанных посевов.

Указанные требования в значительной части могут быть выполнены с помощью информационного сервиса коллективного пользования «ВЕГА-Science» (http://sci-vega.ru/). В нём на базе ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015) организован доступ к долговременным большим архивам спутниковых данных. Имеющиеся

в сервисе возможности работы с данными ДЗЗ решают указанные выше требования по п. 1–4. Так как в сервисе одновременно со спутниковыми данными предоставляется доступ к метеоданным (NCEP Climate Forecast System Version 2, набор ds094.0, https://rda.ucar.edu/datasets/ds094.0), то требования по п. 5, 6 также выполняются при решении задач выявления и оценки продуктивности результатов незаконного землепользования с помощью сервиса «ВЕГА-Science».

Средства анализа результатов антропогенного воздействия на ареалы растений, предоставляемые сервисом «ВЕГА-Science»

Для разработки устойчивой и стабильной методики выявления незаконного землепользования и оценки продуктивности результатов использовался сервис «ВЕГА-Science». Для решения задач настоящей работы важным является момент, что сервис предоставляет доступ к безоблачным наблюдениям целевых регионов в заданном периоде фенологического цикла. В частности, в нём существует возможность поиска и обработки архивных наборов данных дистанционных наблюдений с космического аппарата (КА) Landsat-7 за период с 1999 г. для средней полосы Европейской части России, включая поля технической конопли. Также в нём доступны различные карты типов сельскохозяйственной растительности, покрывающие целевой регион. Такие карты регулярно строятся и обновляются в автоматическом режиме по данным прибора MODIS (Барталев и др., 2011; Плотников и др., 2008). Для точного позиционирования и выделения постоянных объектов также можно использовать высокодетальную подложку от компании DIGITAL GLOBE (http://mapsapi.digitalglobe.com). Таким образом, сервис обладает необходимыми возможностями поиска и выбора полей с технической коноплёй и другими сельскохозяйственными культурами. Применённый в работе метод отбора таких полей будет описан далее.

Кроме доступа к долговременным архивам спутниковых данных, сервис «ВЕГА-Science» также поддерживает их углублённый анализ. Эта возможность предоставляется в виде набора информационных веб-инструментов, которые позволяют выполнять обработку доступной в системе информации ДЗЗ на мощностях самих центров хранения данных (Кашницкий и др., 2015, 2016). Такая обработка проводится в автоматическом режиме и описана в работах (Толпин и др., 2007, 2014). Получаемая при этом информация хорошо подходит для изучения особенностей землепользования на объектах большого размера, но не годится для целевых задач данной работы. Поскольку размеры исследуемых участков с культивированием незаконных растений невелики (типовые размеры составляют 300–500 м), в настоящей работе для их выявления применены результаты спутниковых наблюдений КА Landsat-7 с пространственным разрешением в требуемых спектральных каналах 30 м/пиксель. При этом одним из основных критериев выбора контрольного участка было наличие обоснованного подтверждения вида выращиваемой на этом участке культуры.

Для анализа, заключающегося в выявлении изменений растительного покрова по данным дистанционных спутниковых наблюдений, состав и возможности информационных инструментов в сервисе «ВЕГА-Science» были расширены. Прежде всего это вызвано необходимостью создания средств, которые в автоматическом или полуавтоматическом режиме позволили бы получить оценки статистик спектральных характеристик для отдельных полей или участков этих полей с визуально однородной растительностью. Для целей данной работы такими статистиками являются минимальное, максимальное и среднее значения, общее число пикселей на поле, дисперсия, коэффициент вариации. Важно отметить, что разработанные инструменты анализа позволяют оценивать не только статистические характеристики данных исходных дистанционных наблюдений и определяемые по ним коэффициенты отражения (КО) (на верхней границе атмосферы), но и статистики получаемых по ним спектральных индексов. При этом расширенный состав инструментов сервиса даёт возможность проводить статистические оценки как общепринятых индексов (например, нормализованного вегетационного индекса NDVI — Normalized Difference Vegetation Index), введённых заранее в сервис, так и индексов, формируемых пользователями в интерактивном режиме.

Получаемый в результате набор статистик позволяет объективно оценивать различия индексов пар наблюдаемых полей в рамках выбранной метрики. В настоящей работе для этих целей нами используется расстояние Джеффриса – Матуситы *JM* (Richards, Jia, 2006):

$$JM_{12} = 2\left(1 - \mathrm{e}^{-D_{12}}\right), \tag{1}$$

которое в предположении нормальных распределений случайных величин оценивается через расстояние Баттачарии D12 (Kailath, 1967):

$$D_{12} = \frac{1}{4}\ln\left(\frac{1}{4}\left(\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2} + 2\right)\right) + \frac{1}{4}\left(\frac{(M_1 - M_2)^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}\right), \tag{2}$$

где M_1 и M_2 — средние значения; σ_1 и σ_2 — среднеквадратические вариации спектральных характеристик на участках 1 и 2 соответственно.

Порядок обработки спутниковых данных

В рамках данной работы были исследованы посевы технической конопли и окружающих её ареалов сельскохозяйственных культур и участков естественных лесов (дикоросов), типичных для средних широт Европейской части РФ, описанные ранее в работе (Чернявский, Стрыков, 2003). Посевы технической конопли были выбраны нами в соответствии с подходом, предложенным в работе (Чернявский, Стрыков, 2003) как объект для моделирования спутниковых мульти- или гиперспектральных наблюдений посевов конопли в видимом и ближнем ИК-диапазонах. Этот подход подтверждён результатами работы (Walthall et al., 2003), в которой показано, что спектральные характеристики конопли не зависят от концентрации содержащихся в ней канабиоидов. А это означает, что техническая конопля может быть использована как модельная культура для исследования спектральных сигнатур участков наркотикосодержащей конопли.

Для указанных в работе (Чернявский, Стрыков, 2003) участков технической конопли в сервисе «ВЕГА-Science» были выбраны все безоблачные сцены летнего сезона 2002 г. с КА Landsat-7, прибор ETM+. При идентификации участков технической конопли были использованы эти спутниковые данные, описания и планы размещения участков технической конопли из работы (Чернявский, Стрыков, 2003), а также публичные кадастровые карты (https://egrp365.ru/map). С использованием всех этих данных были также выбраны и локализованы участки яровых зерновых культур как типовых растительных покровов, на фоне которых необходимо исследовать возможности обнаружения участков технической конопли по данным спутниковых дистанционных наблюдений в типовых условиях чернозёмного региона Европейской части России (Орловской обл.). В итоге для совместного анализа были отобраны семь полей технической конопли и девять полей яровых зерновых.

По всем отобранным снимкам для всех полей был рассчитаны указанные выше в разд. «Средства анализа результатов...» статистики (минимальное, максимальное и среднее значения, общее число пикселей на поле, дисперсия, коэффициент вариации) коэффициентов отражения исследуемых полей (без атмосферной коррекции) для каналов прибора Landsat-7 ETM+: 1-го (450–515 нм), 3-го (630–690 нм), 4-го (775–900 нм), 5-го (1550–1750 нм) (https://landsat.gsfc.nasa.gov/the-enhanced-thematic-mapper-plus/). По выбранным сценам были вычислены спектральные индексы NDCI (Normalized Difference Canopy Index) и NDVI и оценены статистики, описанные выше в разд. «Средства анализа результатов...». Таким образом, была получена статистическая информация по семи полям технической конопли и девяти расположенным в непосредственной близости к ним полям яровых зерновых, т. е. фактически по 16 локальным сценам Орловской обл. в вегетационном сезоне 2002 г., показанным на *рис. 1* (см. с. 103). Результаты интерпретации полученной информации представлены в следующем разделе.

Рис. 1. Контрольные участки технической конопли. Орловская обл., 2002 г.

Результаты анализа

Внутрисезонные изменения спектральных характеристик технической конопли и яровых культур

Для выбранной совокупности полей технической конопли и яровых зерновых культур в рамках анализа, базирующегося на веб-инструментах системы «ВЕГА-Science», были определены статистические характеристики их коэффициентов отражения (без атмосферной коррекции) на три срока вегетации 2002 г., зарегистрированные аппаратурой ETM+ Landsat-7.

Внутрисезонную изменчивость иллюстрируют результаты, представленные на *рис. 2–5.*

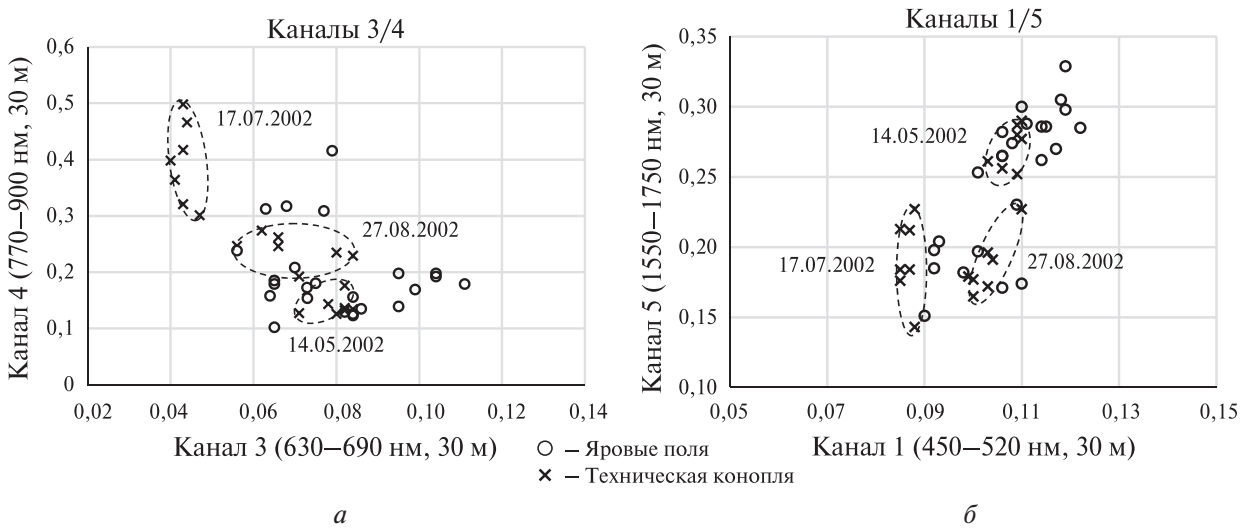

Рис. 2. Диаграммы рассеяния средних значений КО по отдельным сельскохозяйственным полям в каналах 3, 4 (*а*) и 1, 5 (*б*) ETM+ (Landsat-7). Орловская обл., 2002 г.

Типовые диаграммы рассеяния средних значений коэффициентов отражения (КО) по отдельным сельскохозяйственным полям для пар каналов ETM+ Lansat-7 представлены на *рис. 2*. Коэффициенты отражения определены по измерению интенсивностей солнечного излучения, падающего и отражённого солнечного излучения на верхней границе атмосферы. Следует отметить чёткое разделение сезонных КО в канале 1 и отсутствие чёткого разделения в канале 5. Поля с технической коноплёй для представленных пар каналов на большой части вегетационного периода плохо отделяются от яровых зерновых.

В результате анализа КО было экспериментально подтверждено, что непосредственное использование отражательных характеристик не позволяет с высокой степенью достоверности различать поля технической конопли и яровых культур. Это проиллюстрировано результатами, приведёнными на *рис. 2* и *3*, где показано, что кластеры технической конопли и яровых в мае и августе для выбранных пар каналов ETM+ практически не различимы. Эти выводы подтверждаются также приведёнными в *табл. 1* значениями расстояний *JM* для каналов 3 и 4 ETM+ Lansat-7, используемыми для оценок NDVI (Rouse et al., 1974). Здесь $\overline{JM}$ — средние значения расстояний *JM* каждого из полей технической конопли относительно всей совокупности полей яровых зерновых, а σ_{JM} — среднеквадратические значения вариаций по всей совокупности этих расстояний. За исключением канала 3 в июле и канала 4 в августе, измерения во всех остальных случаях не позволяют устойчиво отличать посевы конопли от полей яровых зерновых.

Таблица 1. Средние и среднеквадратические значения расстояний *JM* по каналам 3 и 4 ETM+ Lansat-7 полей технической конопли относительно яровых зерновых (усреднение *JM* проведено для каждого поля конопли относительно всей совокупности полей яровых зерновых). Сезон 2002 г.

Поля технической конопли		*Болхов-1*		*Кромы-2*		*Кромы-1*		*Брянцево-1*		*Брянцево-2*		*Брянцево-3*		*Хотынец-1*	
Каналы		*3*	*4*	*3*	*4*	*3*	*4*	*3*	*4*	*3*	*4*	*3*	*4*	*3*	*4*
$\overline{JM}$	14 мая	0,52	0,78	0,79	0,94	1,17	1,14	0,96	1,17	0,76	0,96	0,96	1,28	0,63	0,53
σ_{JM}		0,30	0,49	0,46	0,55	0,53	0,43	0,45	0,45	0,48	0,53	0,45	0,40	0,33	0,31
$\overline{JM}$	17 июля	1,75	0,82	1,92	1,37	1,92	1,17	1,92	1,93	1,91	1,83	1,92	1,76	1,84	1,29
σ_{JM}		0,23	0,60	0,11	0,43	0,12	0,63	0,12	0,11	0,13	0,25	0,12	0,29	0,15	0,46
$\overline{JM}$	27 августа	0,63	1,43	1,81	1,62	1,52	0,98	1,90	1,94	1,70	1,80	0,97	1,77	1,58	1,66
σ_{JM}		0,42	0,35	0,14	0,23	0,38	0,55	0,10	0,05	0,25	0,13	0,51	0,19	0,30	0,22

Внутрисезонные изменения спектральных индексов технической конопли и яровых культур

Для повышения надёжности обнаружения и контроля состояния целевых объектов наблюдения в работе были проанализированы возможности использования спектральных индексов (СИ) целевых (техническая конопля) и фоновых (яровые зерновые) объектов. В частности, для наблюдений, КО которых представлены на *рис. 2*, были определены значения нормализованного дифференцированного индекса растительности NDVI (Rouse et al., 1974):

$$\mathrm{NDVI} = \frac{\text{КСЯ}_{\text{канал 4}} - \text{КСЯ}_{\text{канал 3}}}{\text{КСЯ}_{\text{канал 4}} + \text{КСЯ}_{\text{канал 3}}}.$$

Наряду с NDVI в рамках работы был предложен и исследован дополнительный специализированный СИ NDCI:

$$\mathrm{NDCI} = \frac{\text{КСЯ}_{\text{канал 1}} - 0{,}66\text{КСЯ}_{\text{канал 5}}}{\text{КСЯ}_{\text{канал 1}} + 0{,}66\text{КСЯ}_{\text{канал 5}}}.$$

Результаты анализа показали, что в начале фенологического цикла посадки конопли и яровых культур практически не различимы и при использовании индексов. Но, как видно на *рис. 3*, NDVI и NDCI позволяют удовлетворительно различать поля технической конопли на фоне яровых вблизи максимума фенологического цикла (июль – август). При этом в течение периода вегетации май – сентябрь наблюдается существенное различие в динамике индексов. Так, NDVI имеют за весь указанный период более высокие значения для конопли, чем для зерновых, а NDCI — меньшие значения в июле и большие в августе. Это свидетельствует о том, что данные индексы дополняют друг друга в описании фенологии этих культур и регистрируют разные факторы, формирующие отражательные характеристики растительных покровов.

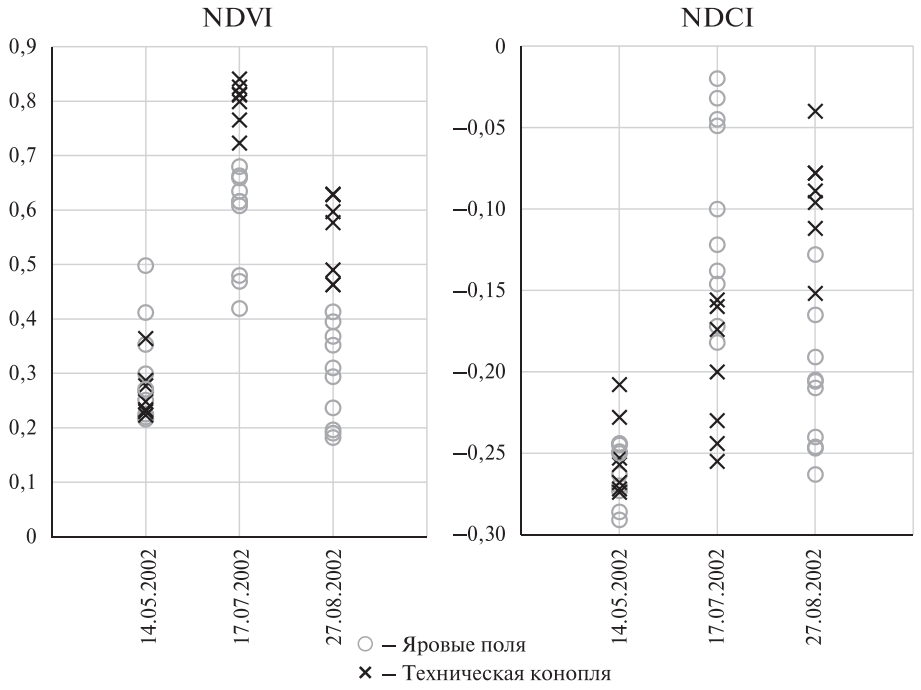

Рис. 3. Спектральные индексы полей технической конопли и яровых зерновых:
а — NDVI; *б* — NDCI. Орловская обл., 2002 г.

Таблица 2. Средние $\overline{JM_i}$ и среднеквадратические значения σ_i расстояний индексов NDVI/NDCI полей технической конопли относительно яровых зерновых (усреднение JM_i проведено для каждого поля конопли относительно всей совокупности полей яровых зерновых). Сезон 2002 г.

Поля технической конопли		*Болхов-1*		*Кромы-2*		*Кромы-1*		*Брянцево-1*		*Брянцево-2*		*Брянцево-3*		*Хотынец-1*	
Индексы		NDVI	NDCI	NDVI	NDCI	NDVI	NDCI	NDVI	NDCI	NDVI	NDCI	NDVI	NDCI	NDVI	NDCI
$\overline{JM_i}$	14 мая	0,73	0,91	1,09	1,41	0,95	0,55	1,00	0,71	1,05	0,72	1,02	0,48	0,57	0,33
σ_i		0,86	0,60	0,67	0,44	0,62	0,50	0,70	0,18	0,72	0,23	0,73	0,25	0,51	0,33
$\overline{JM_i}$	17 июля	1,21	0,81	1,93	1,03	1,86	1,28	2,00	1,76	1,99	1,45	1,99	0,88	1,76	1,76
σ_i		0,65	0,76	0,09	0,80	0,18	0,60	0,01	0,35	0,02	0,60	0,02	0,57	0,24	0,35
$\overline{JM_i}$	27августа	1,52	1,06	1,95	1,93	1,64	1,77	1,98	1,85	1,95	1,89	1,72	1,87	1,91	1,64
σ_i		0,68	0,69	0,10	0,14	0,59	0,34	0,04	0,25	0,10	0,19	0,48	0,23	0,16	0,46

Высокая надёжность выделения полей технической конопли подтверждается и усреднёнными значениями расстояний Джеффриса – Мацуситы $\overline{JM_i}$ индексов NDVI и NDCI каждого из полей технической конопли относительно всех полей яровых, приведённых в *табл. 2*.

Представленные в таблице усреднённые значения $\overline{JM_i}$ в большинстве случаев превышают 1,5. Это указывает на значительное различие средних статистических значений данных индексов для июля и августа. В этом случае вероятность пропуска участков конопли (по критерию $\overline{JM_i} < 1$ для NDVI или NDCI) не превышает 4 %. В мае расстояния $\overline{JM_i}$ для NDVI и NDCI в большинстве случаев не превышают 1, что объективно связано с состоянием растительного покрова.

В *табл. 3* показаны усреднённые расстояния $\overline{JM_i}$ индексов NDVI и NDCI для пар полей технической конопли. В этом случае вероятность пропуска участков конопли (по критерию $\overline{JM_i} > 1$ для NDVI и NDCI) не превышает 30 % для всей совокупности полей конопли и 14 % при исключении из статистики поля «Брянцево-1», которое находилось в стадии вегетации, отличной от стадий вегетации прочих полей.

Таблица 3. Средние значения расстояний $\overline{JM_i}$ индексов NDVI/NDCI (усреднение JM_i проведено для каждого поля конопли относительно всей совокупности полей технической конопли 17.07.2002)

Поля технической конопли	*Болхов-1*		*Кромы-2*		*Кромы-1*		*Брянцево-1*		*Брянцево-2*		*Брянцево-3*		*Хотынец-1*	
Индексы	NDVI	NDCI	NDVI	NDCI	NDVI	NDCI	NDVI	NDCI	NDVI	NDCI	NDVI	NDCI	NDVI	NDCI
Болхов-1	0,00	0,00	0,90	0,09	0,66	0,58	***1,71***	***1,47***	1,50	0,81	1,44	0,29	0,61	1,47
Кромы-2	0,90	0,09	0,00	0,00	0,61	0,53	***1,17***	***1,51***	0,57	0,73	0,43	0,40	0,29	1,52
Кромы-1	0,66	0,58	0,61	0,53	0,00	0,00	***1,96***	***1,98***	1,74	1,55	1,57	1,03	0,71	2,00
Брянцево-1	***1,71***	***1,47***	***1,17***	***1,51***	***1,96***	***1,98***	0,00	0,00	***1,96***	***1,98***	1,32	0,71	0,94	0,17
Брянцево-2	1,50	0,81	0,57	0,73	***1,74***	***1,55***	***1,96***	***1,98***	0,00	0,00	0,32	0,32	0,67	0,35
Брянцево-3	1,44	0,29	0,43	0,40	***1,57***	***1,03***	1,32	0,71	0,32	0,32	0,00	0,00	0,80	0,87
Хотынец-1	0,61	1,47	0,29	1,52	0,71	2,00	0,94	0,17	0,67	0,35	0,80	0,87	0,00	0,00

На основе результатов анализа можно сформировать требования к методическому обеспечению сопутствующих лабораторных и полевых экспериментальных работ, в частности определить диапазоны проводимых спектральных (в том числе и гиперспектральных) наблюдений. Так, они предварительно определяют спектральные диапазоны, измерения в которых позволяют выявлять специализированные СИ, потенциально наиболее устойчивые к изменению условий наблюдения. Например, для технической конопли такими диапазонами являются спектральные интервалы 0,45–0,52 и 1,55–1,75 мкм. По результатам проведённого в рамках работы анализа также можно прийти к заключению, что в диапазоне 0,45–0,52 мкм целесообразно выделить более узкие поддиапазоны наблюдений для обнаружения и оценки объёмов посевов контролируемой модельной культуры.

Результаты исследования межсезонных изменений спектральных индексов технической конопли и яровых культур

Для исследования межгодовой изменчивости, помимо данных наблюдений вегетационного сезона 2002 г. в Орловской обл., полученных с использованием аппаратуры ETM+ Landsat-7, были привлечены данные наблюдений аппаратуры MSI Sentinel-2 в каналах 2 (456–523 нм), 4 (650–680 нм), 8 (785–900 нм) и 11 (1565–1655 нм), полученные в вегетационном сезоне 2018 г. в Тульской обл. Эти каналы близки по своим спектральным характеристикам к каналам ETM+ Landsat-7, результаты измерений в которых легли в основу статистического анализа, описанного выше в подразделах «Внутрисезонные изменения спектральных характеристик...» и «Внутрисезонные изменения спектральных индексов...». Важно также то, что для анализа межгодовой изменчивости была выбрана Тульская обл., по своим природно-климатическим условиям близкая к Орловской обл.

Внутрисезонная изменчивость КО по данным наблюдений 2018 г. аппаратурой MSI Sentinel-2 показана на *рис. 4.* Как и в случае наблюдений с использованием данных за 2002 г., видно, что спектральные кластеры для выбранных пар каналов не позволяют надёжно выделять поля технической конопли на фоне яровых зерновых.

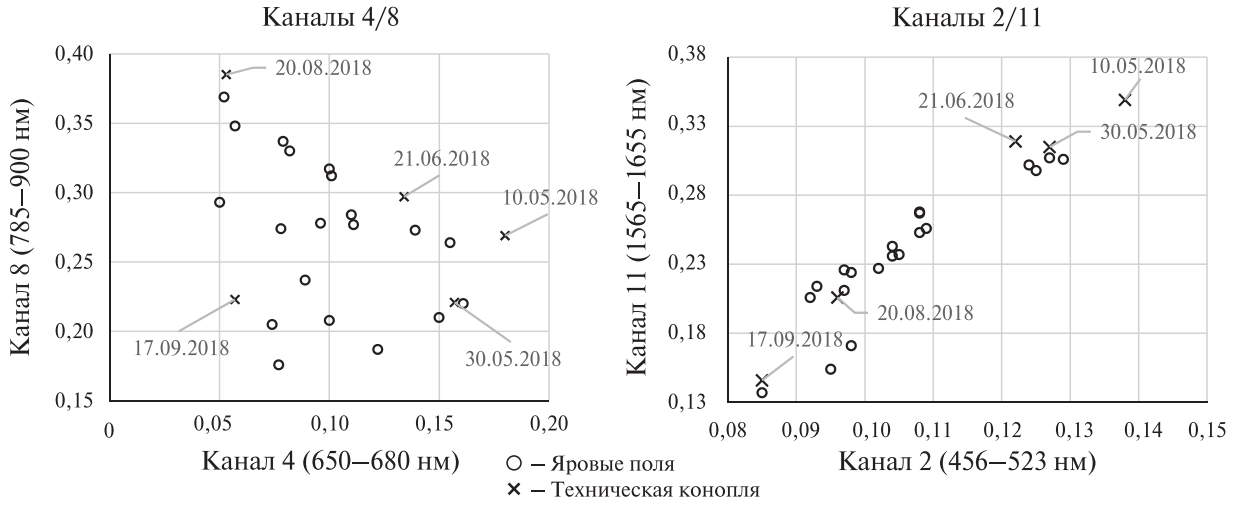

Рис. 4. Диаграммы рассеяния средних значений КО по отдельным сельскохозяйственным полям в каналах 4; 8 (*а*) и 2; 11 (*б*) Sentinel-2. Тульская обл., 2018 г.

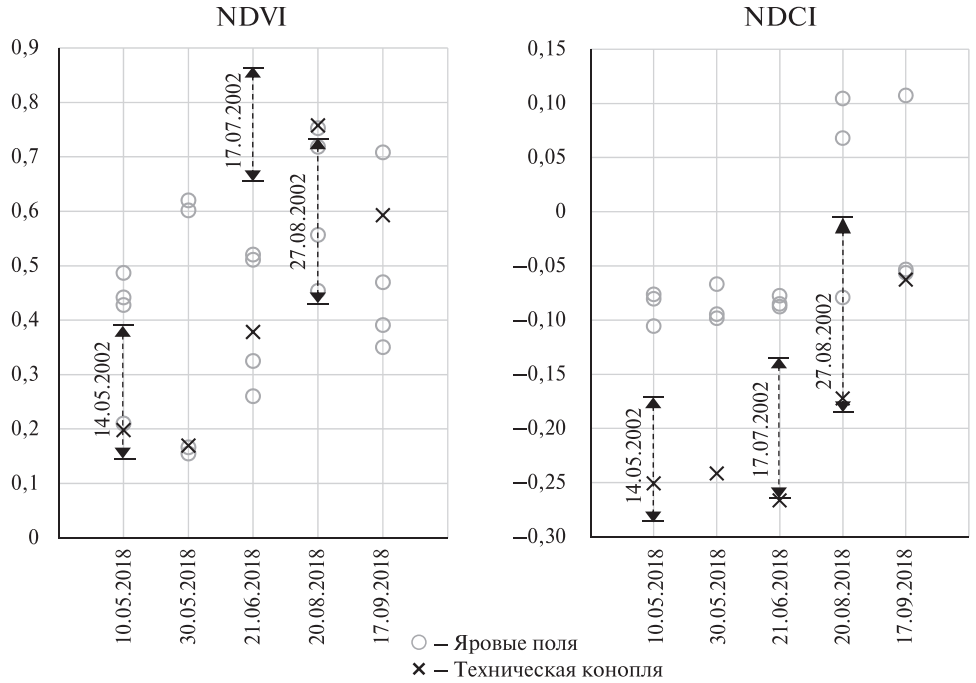

Рис. 5. Спектральные индексы полей технической конопли и яровых зерновых: *а* — NDVI; *б* — NDCI. Тульская обл., 2018 г.

Межгодовую изменчивость КО иллюстрируют результаты, представленные на *рис. 5.* Из рисунка видно, что СИ NDVI для технической конопли в 2018 г. попадает в интервал изменчивости NDVI для технической конопли в 2002 г. в начале (май) и в конце (август) периода вегетации. СИ NDCI для технической конопли в 2018 г. попадает в интервал изменчивости NDCI для технической конопли в 2002 г. в течение всего периода вегетации. Таким образом, доказывается перспективность использования предложенного СИ NDCI для обнаружения

и контроля участков конопли размером порядка 300–500 м, что подтверждается результатами экспериментальных измерений. Следует отметить, что размеры участка не являются существенным методическим ограничением, поскольку они могут быть значительно уменьшены, вплоть до нескольких метров, при использовании низколетящих наблюдательных платформ. При этом разработанная методическая основа применима и в случае низколетящих платформ в случае применения аппаратуры, имеющей спектральные каналы, аналогичные используемым в данной работе каналам ETM+ Landsat-7 и MSI Sentinel-2.

Заключение

В работе представлены результаты применения информационных веб-инструментов системы «ВЕГА-Science», поддерживающие функционирование специализированных сервисов, необходимых для выявления и анализа участков незаконного культивирования растений по данным спутниковых мультиспектральных наблюдений. Разработанный набор инструментов применён к данным спутникового мониторинга, направленным на выявление посевов технической конопли. В качестве исходных данных для анализа были привлечены информационные ресурсы системы «ВЕГА-Science». Применение разработанных инструментов позволило выделить спектральные индексы NDCI или NDCI совместно с NDVI (что предпочтительнее), устойчиво характеризующие посевы конопли на протяжении всего периода её вегетации.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 16-29-09615 офи_м.

Литература

1. *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Лупян Е. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Уваров И. А.* Распознавание пахотных земель на основе многолетних спутниковых данных спектрорадиометра MODIS и локально-адаптивной классификации // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35. № 1. С. 103–116.
2. *Кашницкий А. В.*, *Балашов И. В.*, *Лупян Е. А.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* Создание инструментов для удаленной обработки спутниковых данных в современных информационных системах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 156–170.
3. *Кашницкий А. В.*, *Лупян Е. А.*, *Балашов И. В.*, *Константинова А. М.* Технология создания инструментов обработки и анализа данных сверхбольших распределенных спутниковых архивов // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 9. С. 772–777.
4. *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.
5. *Плотников Д. Е.*, *Барталев С. А.*, *Лупян Е. А.* Метод детектирования летне-осенних всходов озимых культур по данным радиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 2. № 5. С. 322–330.
6. *Саворский В. П.*, *Панова О. Ю.*, *Савченко Е. В.* Методы анализа данных спутникового мониторинга растительных ареалов для выявления участков незаконного земледелия при проведении специальных экспертиз // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 13–30.
7. *Толпин В. А.*, *Барталев С. А.*, *Бурцев М. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Лупян Е. А.*, *Мазуров А. А.*, *Матвеев А. М.*, *Прошин А. А.*, *Флитман Е. В.* Оценка состояния сельскохозяйственных культур на основе межгодовой динамики с использованием данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 2. С. № 4. С. 380–389.
8. *Толпин В. А.*, *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Матвеев А. М.* Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса «ВЕГА» // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 07. С. 581–586.

9. *Чернявский Г. М.*, *Стрыков А. И.* Системный подход и новые информационные технологии в задачах обнаружения наркосодержащих растений. М.: АНО «Научно-изд. информ. центр», 2003. 207 с.
10. *Kailath T.* The Divergence and Bhattacharyya Distance Measures in Signal Selection // IEEE Trans. Communication Theory. 1967. V. COM-15. P. 52–60.
11. *Richards J. A.*, *Jia X.* Remote Sensing Digital Image Analysis. Berlin Heidelberg: Springer, 2006. 439 p.
12. *Rouse J. W.*, *Haas R. H.*, *Scheel J. A. Deering D. W.* Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // Proc. 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symp. 1974. V. 1. P. 48–62.
13. *Walthall C. L.*, *Daughtry C. S. T.*, *Pachepsky L.* Development of Cannabis Spectral Signatures and Cannabis Growth Simulation Model: Progress report FY 2003. Beltsville. MD. USA: USDA-ARS Hydrology and Remote Sensing Laboratory, 2003. 15 p.

Information tools for distributed data analysis of satellite monitoring of plant areas during special examinations

V. P. Savorskiy[1], A. V. Kashnitskii[2], O. Yu. Panova[1]

[1] *V. A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch*
Fryazino 141190, Moscow Region, Russia
E-mail: savor@inbox.ru

[2] *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: kashnizky@gmail.com

The work is devoted to the development of information tools to support specialized services needed to identify areas of illicit crop cultivation according to satellite multispectral observations. The development of these tools is based on the requirements objectively determined by the peculiarities of methods of detection of such sites by means of satellite monitoring. The developed set of tools was applied to the study of areas of technical hemp crops by means of satellite monitoring, which was a model culture for the study of spectral signatures of areas of drug-containing hemp. The statistical estimates, which were obtained as a result of the application of the developed tools, made it possible to evaluate the effectiveness of using multispectral and hyperspectral signatures, as well as spectral indices. Namely, they allowed evaluating the differences between technical hemp crops and spring grain crops (typical background culture of agricultural areas of the chernozem zone of Russia) spectral signatures during the growing season. As a measure of the effectiveness of the detection of hemp crops, the Jeffreys–Matushita distance between sets of spectral characteristics values, which describes the spectral characteristics in the visible and near-IR ranges of technical hemp and spring grains observed from satellites in the period from May to September, were used. As spectral characteristics, the spectral reflectances on TOA (SR) and spectral indices (SI) are used. According to the results of the statistical analysis of satellite observation data, which were registered by the ETM+ Landsat7 and MSI Sentinel-2 instruments, it was established that the NDCI SI (introduced in the work) and NDVI can consistently detect and/or distinguish the hemp and spring crops during the majority of the growing season, i.e. from June to September. In addition, a high stability of NDCI to the interannual variability of the spectral characteristics of agricultural covers was established compared with NDVI.

Keywords: satellite monitoring, illicit crop cultivation, spectral signatures, Jeffreys – Matushita distance

Accepted: 24.07.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-99-110

References

1. Bartalev S. A., Egorov V. A., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Uvarov I. A., Raspoznavanie pakhotnykh zemel' na osnove mnogoletnikh sputnikovykh dannykh spektroradiometra MODIS i lokal'no-adaptivnoi klassifikatsii (Agricaltural lands recognition using multi-year satellite data Spectroradiometer MODIS and locally adaptive classification), *Komp'yuternaya optika*, 2011, Vol. 35, No. 1, pp. 103–116.

2. Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Loupian E. A., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Sozdanie instrumentov dlya udalennoi obrabotki sputnikovykh dannykh v sovremennykh informatsionnykh sistemakh (Development of software tools for satellite data remote processing in contemporary information systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 156–170.
3. Kashnitskii A. V., Loupian E. A., Balashov I. V., Konstantinova A. M., Tekhnologiya sozdaniya instrumentov obrabotki i analiza dannykh sverkhbol'shikh raspredelennykh sputnikovykh arkhivov (Technology for Designing Tools for the Process and Analysis of Data from Very Large Scale Distributed Satellite Archives), *Optika atmosfery i okeana*, 2016, Vol. 29, No. 9, pp. 772–777.
4. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov A. V., Kashnitskii V. Yu., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of systems for satellite data archiving, processing and analysis for tasks of environmental analysis and monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
5. Plotnikov D. E., Bartalev S. A., Loupian E. A., Metod detektirovaniya letne-osennikh vskhodov ozimykh kul'tur po dannym radiometra MODIS (Method of summer-fall sprouts of winter crops detection with MODIS radiometer data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 5, No. 2, pp. 322–330.
6. Savorskiy V. P., Panova O. Yu., Savchenko E. V., Metody analiza dannykh sputnikovogo monitoringa rastitel'nykh arealov dlya vyyavleniya uchastkov nezakonnogo zemledeliya pri provedenii spetsial'nykh ekspertiz (Methods for analyzing satellite monitoring data on plant areals to identify illegal crop fields in the conduct of special examinations), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 5, pp. 13–30.
7. Tolpin V. A., Bartalev S. A., Burtsev M. A., Efremov V. Yu., Loupian E. A., Mazurov A. A., Matveev A. M., Proshin A. A., Flitman E. V., Otsenka sostoyaniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur na osnove mezhgodovoi dinamiki s ispol'zovaniem dannykh MODIS (Interannual dynamics based estimation of crops conditions by MODIS data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2007, Vol. 4, No. 2, pp. 380–389.
8. Tolpin V. A., Loupian E. A., Bartalev S. A., Plotnikov D. E., Matveev A. M., Vozmozhnosti analiza sostoyaniya sel'skokhozyaistvennoi rastitel'nosti s ispol'zovaniem sputnikovogo servisa "VEGA" (Agricultural crops analysis abilities with the VEGA satellite service) *Optika atmosfery i okeana*, 2014, Vol. 27, No. 7, pp. 581–586.
9. Chernyavskiy G. M., Strykov A. I., *Sistemnyi podkhod i novye informatsionnye tekhnologii v zadachakh obnaruzheniya narkosoderzhashchikh rastenii* (System approach and new information technologies in the detection of narcotic plants), Moscow: ANO Nauchno-informatsionnyi izdatel'skii tsentr, 2003, 207 p.
10. Kailath T., The Divergence and Bhattacharyya Distance Measures in Signal Selection, *IEEE Trans. Communication Theory*, 1967, Vol. COM-15, pp. 52–60.
11. Richards J. A., Jia X., *Remote Sensing Digital Image Analysis*, Berlin Heidelberg: Springer, 2006, 439 p.
12. Rouse J. W., Haas R. H., Scheel J. A., Deering D. W., Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS, *Proc. 3rd Earth Resource Technology Satellite* (*ERTS*) *Symp.*, 1974, Vol. 1, pp. 48–62.
13. Walthall C. L., Daughtry C. S. T., Pachepsky L., *Development of Cannabis Spectral Signatures and Cannabis Growth Simulation Model: Progress report FY 2003*, Beltsville, MD, USA: USDA-ARS Hydrology and Remote Sensing Laboratory, 2003, 15 p.