Методы анализа данных спутникового мониторинга растительных ареалов для выявления участков незаконного земледелия при проведении специальных экспертиз

В. П. Саворский, О. Ю. Панова, Е. В. Савченко

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

Работа посвящена разработке требований к методическому обеспечению информационной системы, содержащей сервисы, необходимые для выявления незаконного культивирования растений по данным спутниковых мультиспектральных наблюдений. Обоснование этих требований обеспечено результатами аналитического обзора методов выявления незаконного культивирования растений по данным спутниковых мультиспектральных наблюдений в видимом и ближнем ИК-диапазонах. В качестве типовых образцов в работе рассмотрены участки выращивания наркотикосодержащих растений — опиумного мака и конопли. Для этих культур представлен краткий исторический обзор применения технологий дистанционного мониторинга, рассмотрены особенности их наблюдаемых спектральных сигнатур, показаны приёмы повышения точности оценок на основе наблюдения особенностей фенологического цикла этих растений. Представлены примеры применения данных ДЗЗ для составления ежегодных региональных обзоров UNODC. Результаты аналитического обзора использованы при формулировании особенностей использования данных ДЗЗ для обнаружения участков незаконного земледелия. Это позволило сформулировать требования к информационным системам ДЗЗ, обеспечивающим решение задач выявления и оценки продуктивности результатов незаконного землепользования.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, незаконное культивирование растений, спектральные сигнатуры

Одобрена к печати: 26.10.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-13-30

Введение

Использование средств спутникового мониторинга растительного покрова является одним из наиболее успешно развиваемых направлений научных и прикладных исследований Земли из космоса. Важно при этом отметить многообразие и разномасштабность исследуемых при этом объектов — от микромасштаба, определяемого размерами отдельных растений, до регионального и глобального, задаваемых размерами климатических зон и континентов. Существенную роль в этих исследованиях играют работы, направленные на исследование растительных сообществ, или ареалов, в частности с целью выявления происходящих в них изменений или обнаружения новых особенностей. Объектом данной работы также являются ареалы, формируемые в зонах интенсивного земледелия совокупностью выращиваемых сельскохозяйственных культур.

Оперативность, широкомасштабность и возможность использования в труднодоступных и удалённых районах обуславливают преимущества средств мультиспектрального и гиперспектрального дистанционного зондирования (ДЗ) при решении задач контроля ареалов растений при проведении специальных криминалистических экспертиз. В число таких актуальных задач входят в том числе задачи раннего выявления, точной локализации и оперативного оценивания размеров участков, используемых для незаконного (противозаконного) растениеводства. Прежде всего, это касается задач выявления участков, связанных с «незаконным культивированием растений, содержащих наркотические средства или психотропные вещества либо их «прекурсоры» (УК РФ, ст. 231).

Задачи выявления и оценок размеров незаконного растениеводства являются частью более широкой проблемы, связанной с мониторингом состояния и оценками производительности земледелия в целом или его отдельных отраслей. В частности, это определяется необходимостью постоянного контроля сельскохозяйственных угодий и растительного покрова, научно обоснованного, т.е. оптимального, ведения сельскохозяйственного производства. Поэтому важнейшими аспектами этой проблемы являются типизация посевов и достоверная, т.е. корректируемая во времени, оценка их состояния и ожидаемой урожайности.

Сбор достоверной информации о сельскохозяйственных угодьях не только методологически близок к типовым методам выявления и оценивания участков незаконного культивирования растений, он также необходим и для оптимизации самих процедур выявления незаконной деятельности, поскольку процедуры оптимизации возможны только при наличии информации о характерных особенностях ареалов растений, которые окружают участки незаконного земледелия, т.е. являются типовым фоном, окружающим целевые объекты контроля. Это обусловлено тем, что незаконное растениеводство зачастую ведётся на участках малой размерности в окружении полей конвенциональных, т.е. разрешённых к возделыванию, сельскохозяйственных культур, а то и вперемешку с этими культурами.

Как показывает опыт применения данных спутникового мониторинга к исследованию растительных сообществ, эффективное решение указанных комплексных проблем возможно только в рамках комплексного использования результатов дистанционных наблюдений с сопутствующей и вспомогательной информацией, привлекаемой из информационных ресурсов крупных центров обработки и хранения данных спутникового мониторинга. Привлекаемая информация специфична для предмета и области применения разрабатываемых приложений. Поэтому данная работа имеет целью разработку требований к сервисам информационной системы и привлекаемой информации, обеспечивающим выявление незаконного культивирования растений по данным спутниковых мультиспектральных наблюдений. Обоснование этих требований проводится в рамках аналитического обзора методов выявления незаконного культивирования растений по данным спутниковых мультиспектральных наблюдений посевов опиумного мака и конопли в видимом и ближнем ИК-диапазонах.

1. Пионерские работы по использованию дистанционных методов для обнаружения участков незаконного земледелия

Исследования, направленные на развитие методов дистанционного мониторинга растительного покрова для обнаружения участков незаконного земледелия (illicit crop), были впервые инициированы в США в 1971 г. (Staats, 1977) Бюро по наркотикам и опасным лекарственным средствам (Bureau of Narcotics and Dangerous Drugs, или BNDD) для выявления подпольных полей опийного мака как одного из наиболее значимых составляющих незаконного земледелия. Контроль над этим проектом в дальнейшем перешёл к Администрации по борьбе с наркотиками (Drug Enforcement Administration, или DEA). Следует отметить, что данный проект был проведён практически в одно и то же время, что и проект, реализующий начало систематического исследования земной суши средствами спутникового мониторинга, а именно проект Landsat, запуск первого спутника которого был произведён 23.07.1972 (https://ru.wikipedia. org/wiki/Landsat 1). В результате проведённых научно-исследовательских работ была подтверждена возможность обнаружения полей опийного мака с небольшого самолёта, оборудованного многозональной фотокамерой MOPS (Multispectral Opium Poppy Sensor System — Мультиспектральная система сенсоров опиумного мака). Эта сенсорная система была оборудована четырьмя объективами, снабжёнными специальными зональными фильтрами для одновременной регистрации чёрно-белых снимков одного и того же участка земной поверхности в каждой из четырёх спектральных зон. Полевые самолётные испытания, проведённые в Мексике в 1975-1976 гг., подтвердили высокую эффективность системы MOPS для обнаружения участков опиумного мака (порядка 90 %, подтверждённых наземными контактными наблюдениями) при производительности порядка 250 кв. миль в день (Kornbluth, 1978). В результате было обследовано около 9000 кв. миль мексиканской территории и составлена подробная карта трёх состояний посевов мака (Swank, 1977). Аналогичные экспедиционные работы, направленные фактически на проверку применимости аппаратуры MOPS для обнаружения посевов опиумного мака, были также успешно проведены в Турции в 1977—1978 гг. (Sader, 1990).

Вместе с тем научно-исследовательские работы по выявлению участков незаконного земледелия на базе спутниковых данных, проведённые в тот же период (конец 1970-х гг.), не увенчались успехом (Sader, 1990). Одной из причин стала неразвитость научно-методической базы для анализа имеющихся спутниковых экспериментальных данных. Но не менее важным является также то, что использованные в этих работах спутниковые данные имели пространственное разрешение, близкое к размерам индивидуальных полей. Вследствие этого существенная (если не большая) часть обрабатываемых изображений содержали не пикселы с участками однородной, контрольной или фоновой, растительности, а смешанные пикселы, обработку и анализ которых невозможно эффективно проводить в рамках пионерских работ, когда недостаточно полно изучены свойства (спектральные сигнатуры) однородных компонентов, составляющих смешанные растительные сообщества.

Анализ (Sader, 1990), проведённый по данным экспедиционных работ в Мексике, позволил установить состав спектральных диапазонов, наиболее пригодных для выявления полей опиумного мака. Результаты этого анализа приведены в Приложении А работы (Sader, 1990), где показаны перспективные (подтверждённые натурными экспериментальными измерениями) пары каналов для обнаружения посевов мака. Наиболее примечательным является использование пары каналов 0,77–0,9/1,53–1,73 мкм, которое, по мнению автора, является наиболее подходящим (оценка «excellent»). Вместе с тем оценку «very good» получила пара диапазонов 0,63–0,69/0,77–0,9 мкм, традиционно используемая для оценки NDVI (Rouse et al., 1974). Следует отметить, что эта пара имеет существенные преимущества при её применении в умеренной и субарктической климатических зонах, поскольку в ней использован диапазон существенно менее чувствительный к наличию атмосферных аэрозолей (Саворский и др., 2016).

Обобщение результатов работ, приведённых в 1970—1980 гг., представлено в публикации (Sader, 1990), направленной «на оценку возможностей коммерчески доступных наборов данных ДЗЗ для обнаружения участков выращивания (культивирования) опиумного мака и мониторинга изменений объёмов его выращивания в Афганистане». При этом из накопленного опыта были сделаны выводы и даны обоснованные рекомендации по организации работ, связанных с выявлением участков незаконного земледелия в Афганистане (на примере возделывания опиумного мака). В частности, было указано на то, что успешное, т.е. надёжное, «использование спутниковых данных для обнаружения посевов мака в Афганистане возможно в случае сочетания оптимальных условий» (Sader, 1990). Такими оптимальными условиями являются «наличие высококачественных спутниковых данных, знание календаря земледельческих работ, возможность наземных измерений, относительно большой размер посевов, минимальные размеры смешанных посевов» (Sader, 1990). Указанные оптимальные условия, по мнению автора (Sader, 1990), присущи для всех регионов Афганистана, но наилучшее их сочетание наблюдается в провинции Гильменд. Оптимальным периодом наблюдений, как указано в (Sader, 1990), для этого региона является середина марта — начало апреля, что соответствует датам цветения мака. Размер посевов мака в Афганистане составляет от 0,2 до 1 га. Точность обнаружения для посевов менее 0,4 га снижается. Для мониторинга минимально наблюдаемого участка (0,2 га) требуется пространственное разрешение не хуже 15 м (при использовании критерия в 4 пиксела на участок (Sader, 1990)).

По опыту реализованных проектов (Sader, 1990) было установлено, что «существенное повышение эффективности применения разработанных алгоритмов и процедур (обнаружения запрещённых к возделыванию культур) возможно при их интеграции в существующие геоинформационные системы». Это обусловлено тем, что при обработке и анализе данных спутникового мониторинга в данном случае существенно привлечение сопутствующей и вспомогательной информации по ДЗЗ. В качестве такой информации для повышения точности и надёжности оценок, по мнению автора (Sader, 1990), целесообразно привлекать

картографические данные о топографии местности, климатические и метеорологические данные (температура, влажность воздуха и почвы, количество осадков и данные о климатических особенностях), данные о гидрологическом режиме, статистические показатели по плотности и распределению населения, границах населённых пунктов, транспортной сети, данные по составу, структуре и планам сельскохозяйственных угодий, многолетние данные по урожайности основных сельскохозяйственных культур, описания локального сельскохозяйственного календаря и применяемого севооборота.

В работе (Sader, 1990) также отмечено, что «опубликованная информация об усилиях по обнаружению, мониторингу и искоренению наркотических культур с использованием технологий дистанционного зондирования является скудной» и «большая часть информации существует в «серой» литературе». При этом автор (Sader, 1990) и сам избегает существенных деталей в исследуемой предметной области. В частности, наряду с достаточно глубоким и разносторонним анализом проблем использования данных спутникового мониторинга для обнаружения посевов опиумного мака в работе (Sader, 1990) отсутствуют данные о конкретных спектральных сигнатурах посевов мака.

2. Спектральные сигнатуры опиумного мака

Изучение возможностей выявления наркосодержащих посевов по данным измерений в видимом и ближнем ИК-диапазонах было реализовано в ряде экспериментальных работ, проведённых в Средней Азии советскими научно-исследовательскими институтами в 1990—1991 гг. Результаты этих работ, опубликованные в работах (Зайцева и др., 1996, 1997; Матиясевич и др., 1992;), подтвердили высокий потенциал средств ДЗ для выявления участков, засеянных маком и коноплёй, в окружении типовых растительных и сельскохозяйственных ареалов Средней Азии. К сожалению, дальнейшие исследования данной проблемы не были продолжены, по-видимому, в виду отсутствия достаточного финансирования в 1990-е гг.

В работе (Матиясевич и др., 1992) был проведён анализ возможностей обнаружения незаконных посевов мака по данным аэрофотосъёмки территории Средней Азии. Съёмка была выполнена блоком фотоаппаратов в трёх зонах видимого спектра: зелёной — с центром на длине волны 0,562 мкм, красной — 0,652 мкм и инфракрасной — 0,795 мкм. В рамках анализа были исследованы средние значения коэффициентов отражения (коэффициентов спектральной яркости) однородных участков посевов мака и типовых фонов, окружающих эти участки, величины их естественных среднеквадратических вариаций, а также контрасты полей мака относительно фонов и значения NDVI для полей мака в зависимости от величины относительного проективного покрытия растительности. По совокупности результатов (Матиясевич и др., 1992) была показана принципиальная возможность обнаружения посевов мака на фоне сельскохозяйственной растительности. При этом была отмечена высокая технологичность данного метода оценки, позволяющая сформировать полностью автоматизированную достоверную количественную оценку данных о посевах мака. Вместе с тем была подчёркнута необходимость «продолжить изучение яркостных свойств местности в районах произрастания мака и разработку методических и организационных вопросов построения системы наблюдения за этими районами». При этом в работе (Матиясевич и др., 1992) не была отмечена важность интеграции указанной специализированной системы наблюдения с информационной системой, обеспечивающей проведение процедур углублённой обработки и анализа данных спутникового мониторинга с привлечением разнообразной сопутствующей и вспомогательной информации, необходимой для получения надёжных и достоверных оценок.

В работе (Зайцева и др., 1996) проведён детальный анализ результатов тех же экспериментальных наблюдений в Средней Азии в 1990—1991 гг., что и в работе (Матиясевич и др., 1992). При этом в отличие от работы (Матиясевич и др., 1992) для наблюдений была использована спектральная микропроцессорная система Скиф, обеспечивающая регистрацию спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) в диапазоне 400—1000 нм со спектральным разрешением 13 нм. Измерения проводились с высот 50—150 м с вертолёта.

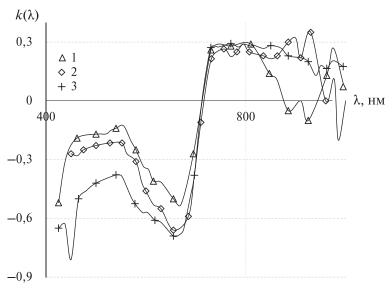


Рис. 1. Спектральные контрасты мака и конопли на различных фазах: 1 — мак (цветение), пойма р. Аму-Дарьи; 2 — конопля, долина р. Чу; 3 — мак (цветение + стеблевание), пустыня (Зайцева и др., 1996)

Основная цель работы — обоснование выбора спектральных каналов для фото- и видеоаппаратуры, которые должны обеспечить получение максимального контраста при обнаружении просевов мака и конопли на фоне сельскохозяйственной и дикорастущей растительности. Наряду с этим в работе были проведены модельные расчёты, направленные на оценку возможных изменений контраста при проведении зондировании растительности из космоса.

По результатам СПЭЯ были вычислены средние значения контрастов для различных пар объектов, например «мак – клевер», «конопля – пшеница», в соответствии с соотношением:

$$k(\lambda) = \frac{(L_1(\lambda) - L_2(\lambda))}{(L_1(\lambda) + L_2(\lambda))},\tag{1}$$

где $L_1(\lambda)$ и $L_2(\lambda)$ — средние по нескольким реализациям значения СПЭЯ для первого и второго объектов. На puc. I приведены зависимости контрастов от длины волны для нескольких пар объектов. Для большинства исследованных пар объектов k>0 при $\lambda=420-690$ нм и k<0 при $\lambda=710-1000$ нм. В первой спектральной зоне $\left|k\right|$ достигают значений 0,5–0,7, во второй — не превышают 0,3. Спектральные диапазоны приемлемы для съёмки при превышении порога $\left|k\right|$ величиной 0,10–0,15 для фотосъёмки и 0,15–0,20 для видеосъёмки (Лазарев и др., 1979). В частности, для пары «мак — клевер» такими диапазонами являются спектральные области 420–693, 927–1000 нм для фоторежима съёмки и 433–680 нм для видеорежима съёмки, а для пары «конопля — дикая растительность долины р. Чу» такими диапазонами являются спектральные интервалы 420–693 и 719–1000 нм как для фото-, так и видеорежимов съёмки. Помимо прочего, в результате анализа выявлено, что выбор спектральных диапазонов в работе (Матиясевич и др., 1992) произведён не оптимально.

Для того чтобы использовать данные съёмки с низколетящих платформ для моделирования съёмки со спутников, необходимо, в соответствии с (Зайцева и др., 1996), использовать соотношения, учитывающие поглощение в атмосферном аэрозоле $\tau(\lambda)$ и яркость атмосферной дымки $L_{\pi}(\lambda)$. Яркость на верхней границе атмосферы, регистрируемая с космической платформы, определяется соотношением:

$$L_{\text{B,rp.}}(\lambda) = L_{\pi}(\lambda) + L(\lambda) \cdot \exp(-\tau(\lambda)), \tag{2}$$

где $L(\lambda)$ — СПЭЯ, зарегистрированная с малой высоты. При этом регистрируемый с космических платформ контраст $K(\lambda)$ связан с $k(\lambda)$ следующим соотношением:

$$K(\lambda) = k(\lambda) \left[1 + 2L_{_{\text{I}}}(\lambda) \frac{\exp(-\tau(\lambda))}{L_{_{1}}(\lambda) + L_{_{2}}(\lambda)} \right]. \tag{3}$$

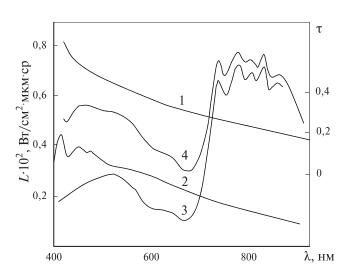
Соотношение (3) показывает, что при всех значениях $L_{\rm д}(\lambda) > 0~K(\lambda) < k(\lambda)$. В качестве примера в статье (Зайцева и др., 1996) приведён прим спектра яркости мака, снятый с высоты 80 м, и расчётные значения этого спектра, снимаемые с космических платформ (puc.~2). Изменение контраста приводит к сужению спектральных полос, пригодных для выявления посевов мака при съёмках с космических платформ, по сравнению со съёмками, проводимыми с низколетящих носителей. При этом для пары «мак – клевер» такими диапазонами при спутниковых наблюдениях являются спектральные области 615—654 нм для фоторежима съёмки и 433—680 нм для видеорежима съёмки, а для пары «конопля — дикая растительность долины р. Чу» такими диапазонами являются спектральные интервалы 420—693, 719—901 нм для фоторежима съёмки и 420—693, 732—901 нм для видеорежима съёмки.

В выводах (Зайцева и др., 1996) отмечено, что максимальные значения контраста для посевов мака всего лишь в 1,5–2,0 раза превышают пороговые, что «не гарантирует их надёжного обнаружения с верхней границы атмосферы на фонах зелёной растительности различных видов». Вместе с тем, используя съёмку в диапазонах полос 420–693 и 732–901 нм, а также 537–69 нм, можно существенно повысить надёжность обнаружения участков дикорастущей конопли.

В статье (Зайцева и др., 1997) авторами были представлены результаты продолжения работы (Зайцева и др., 1996). В данном случае в наземных условиях были измерены спектральные особенности посевов мака и его отдельных фитоэлементов, а также почв типовых районов Центральной Азии. Важно, что при этом были исследованы изменения спектральных коэффициентов яркости растений в зависимости от их фаз вегетации.

В результате исследования (Зайцева и др., 1997) были выявлены специфические особенности спектров фитоэлементов, которые могут быть использованы для оценки фаз вегетации по результатам дистанционных наблюдений. В частности, установлено, что спектральное распределение коэффициентов яркости листьев и коробочек практически идентично, только СКЯ листьев в видимой области спектра в 2,1–2,5, а в ИК-области в 1,7 раза выше, чем СКЯ коробочек. Белые цветы в области 480–780 нм имеют высокие значения, увеличивающиеся с ростом длины волны от 0,60 до 0,78. В синей части спектра отмечен скачкообразный рост СКЯ — примерно в 6 раз при переходе от 420 до 580 нм. Лиловые цветы имеют низкие значения СКЯ (0,04–0,06) в области ниже 640 нм, увеличивающиеся линейно для длин волн более 640 нм.

При регистрации одновременно листьев и цветков мака происходит сглаживание минимума СКЯ в диапазоне 640—480 нм и возрастание СКЯ во диапазоне 420—720 нм для белых цветков и уменьшение СКЯ в диапазонах 520—580 и 710—780 нм. Полученные в работе

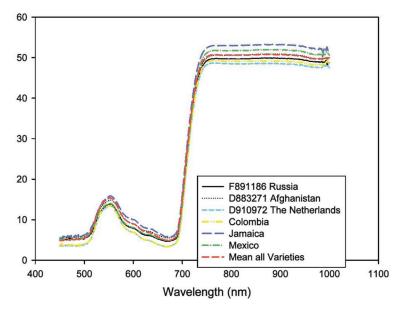


(Зайцева и др., 1997) результаты свидетельствуют о перспективности использования данных оптического и ИК-диапазонов для выделения фаз вегетации мака дистанционными средствами.

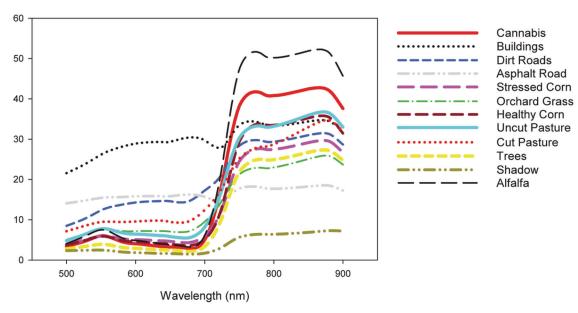
Рис. 2. Спектральные зависимости оптических характеристик атмосферы и яркости излучения, отражённого посевами цветущего мака: 1 — оптическая толщина атмосферы; 2 — яркость атмосферной дымки; 3 — СПЭЯ посевов мака, измеренные прибором СКИФ на высоте 80 м; 4 — значения СПЭЯ на верхней границе атмосферы для посевов мака (Зайцева и др., 1996)

3. Спектральные сигнатуры конопли средствами дистанционных наблюдений

В работе (Walthall et al., 2003) показан суммарный коэффициент отражения в полусферу для различных образцов конопли (Cannabis) (рис. 3). Число измеренных образцов было уменьшено, поскольку некоторые из них имели слишком малую площадь покрытия. Контрастный анализ показал, что существенных отличий в коэффициентах отражения для различных образцов не наблюдается. Этот факт указывает на то, что THC (tetrahydrocannabinol) существенного влияния, как это ожидалось, на суммарный полусферический коэффициент отражения не оказывает. Это свидетельствует, что техническая конопля является хорошим модельным растением для экспериментальной разработки методов и средств обнаружения и оценки посевов наркосодержащей конопли.



Puc. 3. Суммарный коэффициент отражения в полусферу для различных образцов конопли (Cannabis) (Walthall et al., 2003)



Puc. 4. Спектральные сигнатуры из результатов спектральной классификации изображений (Walthall et al., 2003)

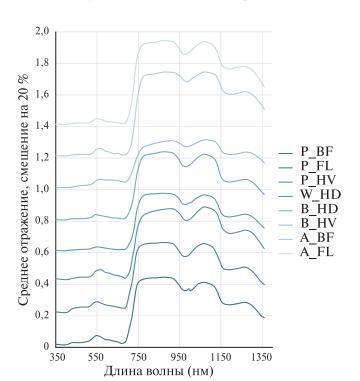
Хотя спектральные сигнатуры конопли имеют индивидуальные особенности в красной и ближней ИК-области спектра (рис. 4, см. с. 19), опыт показывает, что её выделение на фоне различных земных покровов существенно затруднено (Walthall et al., 2003) многочисленными конфликтами. Эти конфликты можно разрешить путём привлечения данных о фенологических циклах конопли в рамках методики (Mattiuzzi et al., 2014), представленной ниже в разделе 5.

4. Методы выделения посевов мака по гиперспектральным данным

В работе (Jia et al., 2011) проведено исследование возможностей обнаружения посевов мака по данным полевых спектрометров видимого — ближнего ИК-диапазонов от 350 до 2500 нм со спектральным разрешением 1,4 нм в диапазоне 350—1000 нм и 2 нм в диапазоне 1000—2500 нм (Handheld radiometer..., 2005). При этом спектральные измерения проводились в течении трёх вегетационных периодов выращивания мака, а именно до цветения, во время цветения и в период созревания. На *рис.* 5 представлены обобщённые спектральные зависимости, полученные в этих спектральных измерениях. Важно отметить, что результаты исследования (Jia et al., 2011) качественно совпадают результатами, полученными в работах (Зайцева и др., 1996, 1997; Матиясевич и др., 1992).

Важным результатом работы (Jia et al., 2011) является развитие комплексной методики выявления посевов мака по гиперспектральным данным, поскольку определение оптимального набора спектральных каналов для выделения (дискриминации) посевов опийного мака по данным многоканальных, в частности гиперспектральных, наблюдений является сложной проблемой. Прежде всего, это связано с тем, что, как показано в работе (Schmidt, Skidmore, 2003), не существует какой-либо определённой методики, имеющей существенные преимущества для оптимального выбора каналов при дискриминации мака. Поэтому в исследовании (Jia et al., 2011) для выделения посевов мака на фоне соседствующих сельскохозяйственных культур был применён комплексный метод, включающий три уровня, или этапа, анализа данных.

На первом этапе для анализа спектральных различий посевов мака и соседствующих культур был использован метод тестирования по U-критерию Манна – Уитни (Schmidt, Skidmore, 2003) для каждого из спектральных каналов. На втором этапе были оценены расстоя-



ния Джефриса — Матуситы (далее JM) (Adam, Mutanga, 2009; Richards, 1993; Schmidt, Skidmore, 2003) и проведён корреляционный анализ для выбора оптимальных каналов из множества, выделенного на первом этапе. На финальном этапе проводился анализ посредством построения классификационно-регрессионных деревьев (CART) (Breiman et al., 1984; Davranche et al., 2010) с тем, чтобы валидировать точность классификации, базирующейся на выбранном оптимальном наборе каналов гипеспектрометрической системы.

Рис. 5. Средние кривые отражения всех типов культур на каждом этапе. Спектры отражения смещены на 20% и обозначены горизонтальными линиями сетки (Jia et al., 2011). Обозначения фаз вегетации и культур см. в таблице

В результате анализа (Jia et al., 2011) установлены оптимальные каналы (*таблица*) и подтверждены высокие показатели для обнаружения посевов мака. А именно для всех фаз вегетации точность дискриминации мака относительно всех испытанных сельскохозяйственных культур (пшеница, ячмень, люцерна) составляет приблизительно 100 %. При пересчёте точности обнаружения на использование каналов спутниковых спектральных инструментов высокого разрешения показано (Jia et al., 2011), что точность обнаружения близка к 100 % в период цветения и не опускается ниже 99,33 % для прочих периодов вегетации.

Оптимальные длины волн для выделения участков опийного мака в трёх периодах его роста на фоне рассмотренных в статье (Jia et al., 2011) сельскохозяйственных культур (в скобках значение JM)

Период роста опийного мака	Диапазон (нм)			
	видимый	красный край	ближний ИК	средний ИК
P_BF и др.	528 (1,33)	736 (1,19)	1207 (1,10)	
P_FL и др.	424 (1,39)		760 (1,17)	1974 1,01
P_HV и др.	468 (1,37)	726 (1,15)	1220 (1,28)	1689 (1,16)

В результате анализа установлено, что для выделения (дискриминации) участков опийного мака до цветения оптимальный набор состоит из спектральных каналов 438, 528, 736, 754 и 1207 нм, во время цветения — 405, 424, 524, 760, 1974 нм, а при сборе урожая — 468, 726, 746, 982, 1220, 1689 нм.

5. Исследование особенностей фенологического цикла

Возможности контроля фаз вегетации, т.е. фенологических особенностей, опиумного мака в Афганистане по данным спутникового мониторинга с использованием мультиспектральной системы MODIS были изучены в работе (Simms, 2016). В работе исследованы годовые циклы NDVI, определённые по данным MODIS. При этом, несмотря на низкую разрешающую способность MODIS (около 500 м), экспериментально была доказана применимость указанных данных для исследования годовых фенологических циклов опиумного мака. В частности, годовые профили индексов NDVI чётко отражают наличие двойных годовых фенологических циклов мака (рис. 6а, b, см. с. 22), выращиваемого в долинах, и одиночных циклов (рис. 6с), наблюдаемых в горных районах с высотой над уровнем моря порядка 1 км. Кроме того, наблюдались и годовые циклы типовых сельскохозяйственных культур Афганистана (рис. 6d–f), что необходимо для оптимизации выделения маковых посевов на фоне посевов, занятых этими культурами, по временным профилям NDVI, отражающим особенности их фенологических циклов.

Временные профили NDVI улучшают точность обнаружения, оптимизируя представление спутниковых данных в таком виде, что они максимально пригодны для выявления опийного мака на фоне окружающих культур. Они также пригодны для установления фаз вегетации мака. Обе эти особенности значительно повышают точность и надёжность оценок размеров, границ и объёмов урожая посевов мака, определяемых с использованием спутниковых средств наблюдения камерами высокого и сверхвысокого пространственного разрешения.

Временные профили NDVI позволяют устанавливать межгодовую изменчивость состояния вегетационного покрова исследуемого участка Земли. При этом тщательный анализ позволяет выявить как особенности изменчивости, связанные с севооборотом или с изменениями объёмов и порядка агротехнических мероприятий, так и вариабельность, вызываемую климатической межгодовой изменчивостью.

В частности, использование таких индексов позволяет в том числе проводить анализ аномальных изменений в растительном покрове. Методические особенности такого анализа на

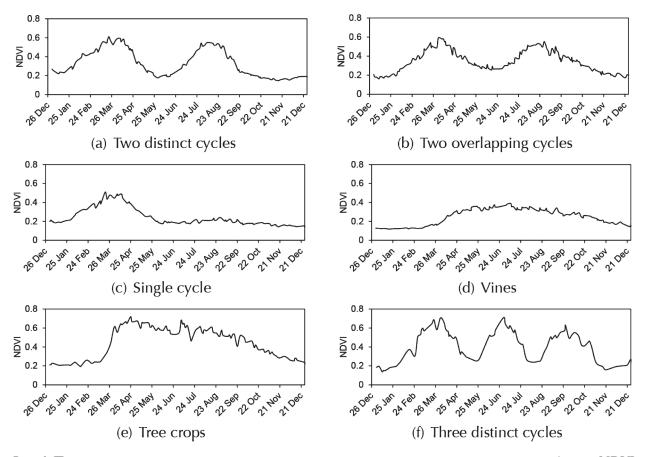
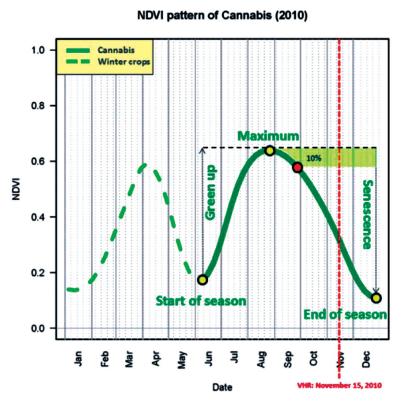


Рис. 6. Примеры динамики развития растительности, установленной по временным профилям NDVI (MODIS) для провинций Афганистана, производящим опийный мак (Simms, 2016)



Puc. 7. Профиль NDVI для участка посевов конопли. Кандагар, Афганистан, 2010 г. (Mattiuzzi et al., 2014)

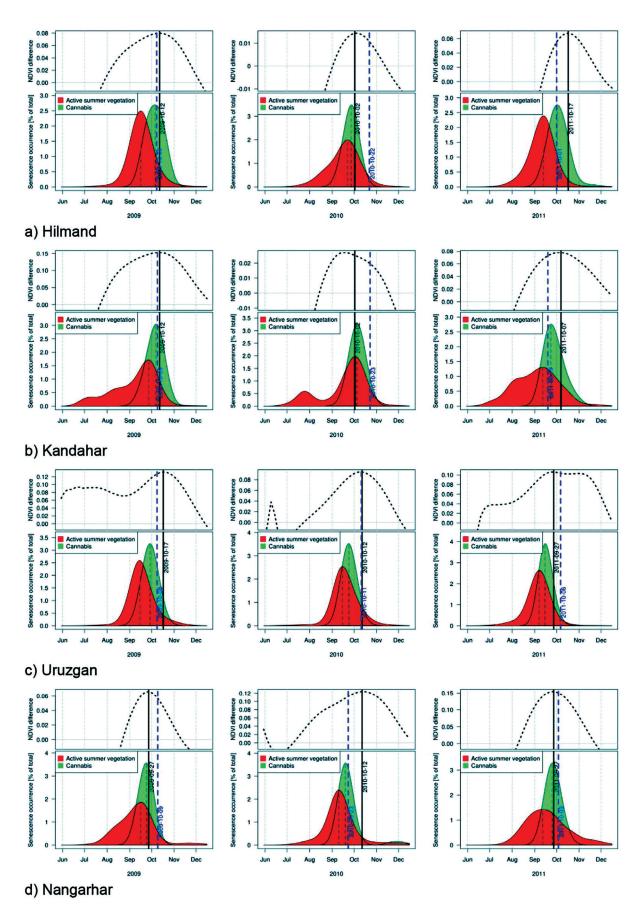


Рис. 8. Разность значений NDVI в регионе в 2009, 2010 и 2011 гг. (линии: сплошная чёрная — дата наблюдаемого максимума разности, синяя пунктирная — дата рассчитанного максимума разности) (Mattiuzzi et al., 2014)

примере анализа аномальных условий развития озимых культур на сельскохозяйственную растительность приведены в статье (Лупян и др., 2016).

Вместе с тем временные профили позволяют устанавливать наличие и места расположения участков со смешанной растительностью. Для таких случаев эти временные профили являются по существу источниками первичной предварительной информациии о видовом составе растительности на смешанных участках, необходимой для последующего уточнения в рамках субпиксельного анализа, скажем, с использованием методики, развитой в работе (Герус и др., 2018).

Экспертное мнение утверждает, что идеальные даты обнаружения и оценки объёмов посадок конопли находятся в конце периода её вегетации (на фазе увядания). На иллюстрации фенологического цикла конопли в Афганистане по данным (Mattiuzzi et al., 2014), приведённом на *рис*. 5, это участок правее вертикальной пунктирной линии. Выделение фазы начала увядания является достаточно сложной задачей, поскольку межгодовая изменчивость приводит к значительной изменчивости календарных дат вегетационных фаз (см. в качестве примера *рис*. 7, см. с. 22).

В работе (Mattiuzzi et al., 2014) был разработан метод прогнозирования оптимальных дат наблюдения независимо от межгодовых различий фенологии. Исследование включает анализ временных рядов NDVI на основе данных наблюдений со спутника Landsat (Landsat-5/TM и Landsat-7/ETM+) и расчёт информации о стадиях увядания конопли и другой растительности. Этот подход был применён к четырём испытательным площадкам в Афганистане (puc.~8, см. с. 23).

6. Использование данных дистанционных наблюдений в обзорах UNODC

Методологии дистанционного зондирования применяются Управлением ООН по наркотикам и преступности (United Nations Office on Drugs and Crime — UNODC) с 2002 г. (Afghanistan..., 2017). Полученные при этом результаты публикуются в ежегодных обзорах (survey) о площадях культивирования опийного мака и оценках суммарного производства опиатов по Афганистану (Afghanistan..., 2017) и другим государствам (Муантаг..., 2003) или регионам (Southeast..., 2014). Аналогичные отчёты формируются и по другим наркосодержащим культурам, в частности по конопле (Могоссо..., 2005).

В качестве иллюстрации на *puc*. 9 приведены результаты выявления площадей культивации опиумного мака по результатам анализа космической информации (Afghanistan..., 2017). Объект наблюдений — провинция Гильменд, Афганистан. Период наблюдений — 2016—2017 гг. Наряду с выявленными участками маковых посевов на *puc*. 9 показана также динамика изменения площадей этих посевов. В частности, показано, что на большей части провинции площади посевов мака либо возросли (на 11-30%), либо значительно возросли (>30%).

Следует при этом отметить, что технология дешифрирования данных дистанционного мониторинга остаётся достаточно примитивной. Так, для дешифрирования применяются космические снимки высокого разрешения с КА Ікопоѕ, каналы которого не оптимизированы на регистрацию сигнатур мака. Поэтому единственным продуктом, помимо синтезированных композитных изображений, в рамках проводимого анализа является NDVI. При этом выделение посевов мака также осуществляется визуально. Вместе с тем по величинам NDVI выносятся оценки сроков цветения и вызревания мака. Для повышения надёжности этих оценок в ряде районов проводятся наземные валидационные измерения.

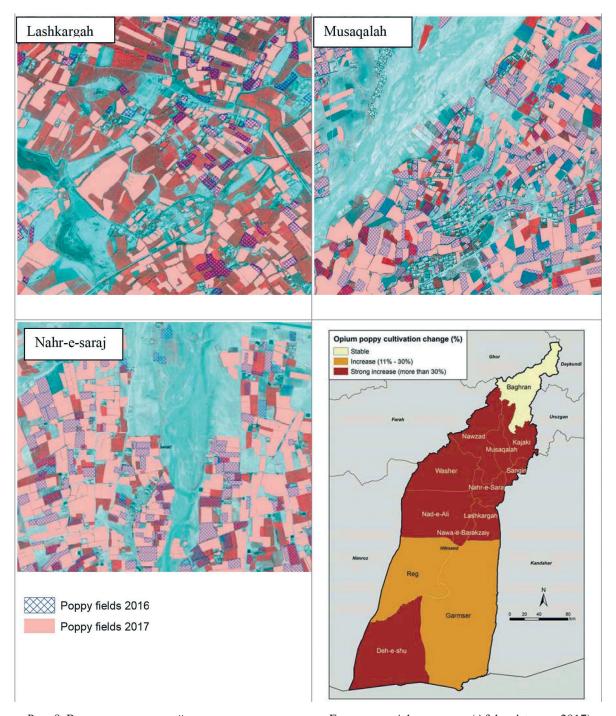


Рис. 9. Выращивание опийного мака в провинции Гильменд, Афганистан (Afghanistan..., 2017)

7. Особенности использования данных Д33 для обнаружения участков незаконного земледелия

Анализ разработанных методов обнаружения участков выращивания мака и конопли, как наиболее значимых объектов культивирования растений в процессе незаконного земледелия, по данным аэрокосмических дистанционных наблюдений показывает, что надёжные и однозначно интерпретируемые оценки наличия указанных посевов предполагают наличия следующих знаний:

1) о спектральных особенностях растительного покрова в данном регионе как для контрольных растений, так и для фоновых растительных покровов;

- 2) фенологических фазах как контрольных растений, так и фоновых растительных покровов;
- 3) физико-географических характеристиках региона (топографии местности), особенностей почвенного покрова и водного режима;
- 4) климатических особенностях (среднестатистических значений гидрометеорологических параметров и их среднеквадратические вариации);
- 5) складывающихся погодных условиях в данном сезоне (текущих показателей, синоптической обстановки и накопленных значений почвенной влаги и снежного покрова);
- 6) типовых размерах участков и типовых агротехнических приёмов (с учётом уклада и традиций местного населения);
- 7) особенностях севооборота, в том числе частоты и особенностей применения смешанных посевов.

Все эти условия составляют список пользовательских требований к сервисам специализированной информационной системы ДЗЗ или специализированному разделу универсальной информационной системы. Как показывает предварительный анализ, прототипом такой системы может служить информационная система семейства ВЕГА-Science (Лупян и др., 2015).

8. Требования к информационным системам Д33, обеспечивающим решение задач выявления и оценки продуктивности результатов незаконного землепользования

Исходя из перечисленных в п. 7. особенностей использования данных ДЗЗ для обнаружения участков нарушений землепользования, можно сформулировать следующие требования к сервисам информационных систем, обеспечивающих решение задач выявления и оценки продуктивности результатов незаконного землепользования:

- 1) обеспечение возможностей автоматизированного совмещения разнородных и разновременных, включая архивные исторические, данных ДЗЗ и продуктов их обработки по регионам сельскохозяйственного производства с возможными участками незаконного землепользования;
- 2) обеспечение возможностей 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, описывающим физикогеографические характеристике региона (в том числе топографию местности), особенности почвенного покрова и водного режима;
- 5) предоставление автоматизированного доступа к базам данных, описывающим 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) доступ к описаниям типовых размеров участков и типовых агротехнических приёмов в контрольном регионе (с учётом уклада и традиций местного населения);
- 8) описания особенностей севооборота, в том числе частоты и особенностей применения смешанных посевов.

Заключение

В работе представлены результаты аналитического обзора методов анализа данных спутникового мониторинга растительных ареалов для выявления по данным ДЗЗ участков незаконного земледелия при проведении специальных экспертиз. В качестве типовых образцов таких участков в работе рассмотрены участки выращивания наркотикосодержащих растений — опиумного мака и конопли. Для этих культур представлен краткий исторический обзор начала применения технологий дистанционного мониторинга, рассмотрены особенности их наблюдаемых спектральных сигнатур, показаны приёмы повышения точности оценок на основе наблюдения особенностей фенологического цикла этих растений. Кратко представлены примеры применения данных ДЗЗ для составления ежегодных региональных обзоров UNODC. Результаты аналитического обзора использованы при формулировании особенностей использования данных ДЗЗ для обнаружения участков незаконного земледелия. Это позволило сформулировать требования к информационным системам ДЗЗ, обеспечивающим решение задач выявления и оценки продуктивности результатов незаконного землепользования.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-29-09615 офи_м.

Литература

- 1. *Герус А. В.*, *Савченко Е. В.*, *Саворский В. П.* Использование метода ортогональной проекции для идентификации малых объектов в мультиспектральном анализе // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 27—35.
- 2. Зайцева В.А., Ловчикова Л.П., Науменко Е.К., Кононович С.И., Никоненко С.В., Плюта В.Е. Спектры отражения наркосодержащих растений и выбор спектральных диапазонов для их обнаружения // Журн. прикладной спектроскопии. 1996. Т. 63. № 6. С. 911—918.
- 3. Зайцева В.А., Ловчикова Л.П., Науменко Е.К., Кононович С.И., Никоненко С.В., Плюта В.Е. Коэффициенты яркости посевов мака и его отдельных фитоэлементов в различных фазах вегетации // Журн. прикладной спектроскопии. 1997. Т. 64. № 1. С. 85–89.
- 4. *Лазарев А. И.*, *Николаев А. Г.*, *Хрунов Е. В.* Оптические исследования в космосе. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1979. 256 с.
- 5. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашниц-кий 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.
- 6. Лупян Е.А., Барталев С.А., Толпин В.А., Крашениникова Ю.С. Возможности использования пространственно-временных вегетационных индексов на примере анализа аномальных условий развития озимых культур на Европейской части России в 2016 году // 14-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. Москва, ИКИ РАН. 2016. С. 361.
- 7. *Матиясевич Л. М.*, *Кочергин Д. В.*, *Субботин Ю. Л.*, *Маматулин В. Н.* Оценка возможностей дешифрирования полей мака фотометрическим методом // Исследование Земли из космоса. 1992. № 3. С. 67—75.
- 8. Саворский В. П., Кашницкий А. В., Константинова А. М., Балашов И. В., Крашениникова Ю. С., Толпин В. А., Маклаков С. М., Савченко Е. В. Возможности анализа гиперспектральных индексов в информационных системах дистанционного мониторинга семейства «Созвездие-Вега» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 28—45.
- 9. *Adam E.*, *Mutanga O.* Spectral discrimination of papyrus vegetation (Cyperus papyrus L.) in swamp wetlands using field spectrometry // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2009. V. 64. No. 6. P. 612–620.
- 10. Afghanistan Opium Survey 2017. Cultivation and Production: United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC) Research. Afghanistan, 2017. 73 p.

- 11. *Breiman L.*, *Friedman J. H.*, *Olshen R.*, *Stone C.* Classification and Regression Trees. N.Y.: Chapman and Hall, 1984. 368 p.
- 12. *Davranche A.*, *Lefebvre G.*, *Poulin B.* Wetland monitoring using classification trees and SPOT-5 seasonal time series // Remote Sensing of Environment. 2010. V. 114. No. 3. P. 552–562.
- 13. Handheld Spectroradiometer: User's Guide. Boulder, CO, USA: ASD Inc., 2005. 72 p.
- 14. *Jia K.*, *Wu B.*, *Tian Y.*, *X. Du*. Spectral Discrimination of Opium Poppy // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2011. V. 49. No. 9. P. 3414–3422.
- 15. *Kornbluth J.* Poisonous fallout from the war on marijuana // The New York Times Magazine. 1978. November 19. P. 15.
- 16. *Mattiuzzi M.*, *Bussink C.*, *Bauer T.* Analysing Phenological Characteristics Extracted from Landsat NDVI Time Series to Identify Suitable Image Acquisition Dates for Cannabis Mapping in Afghanistan // Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation. Stuttgart, 2014. Vol. 5. P. 383–392.
- 17. Morocco Cannabis Survey 2005. United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC). Morocco, 2005. 37 p.
- 18. Myanmar Opium Survey 2003. United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC). Myanmar, 2003. 52 p.
- 19. *Richards J. A.* Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1993. 340 p.
- 20. *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.
- 21. *Sader S. A.* Remote sensing of narcotic crops with special reference to techniques for detection and monitoring of poppy production in Afghanistan: Technical report. Washington: Development Alternatives Corp., 1990. 70 p.
- 22. *Schmidt K. S.*, *Skidmore A. K.* Spectral discrimination of vegetation types in a coastal wetland // Remote Sensing of Environment. 2003. V. 85. No. 1. P. 92–108.
- 23. *Simms D. M.* Remote sensing of opium poppy cultivation in Afghanistan: PhD Thesis. Cranfield University, 2016. 159 p.
- 24. Southeast Asia Opium Survey 2014. United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC). Bangkok, 2014. 105 p.
- 25. *Staats E. B.* Review of Selected Narcotics Enforcement Research and Demonstration Projects: Report of the Comptroller General of the United States. Washington, 1997. 35 p.
- 26. Swank I. C. North American heroin // Drug Enforcement. 1977. V. 4. No. 1. P. 2–12.
- 27. *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.

Methods for analyzing satellite monitoring data on plant areals to identify illegal crop fields in the conduct of special examinations

V. P. Savorskiy, O. Yu. Panova, E. V. Savchenko

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

The work is devoted to the development of requirements for the methodological support of an information system containing the services necessary to detect illegal crop plantations from satellite multispectral observations. The rationale for these requirements is ensured by the results of an analytical review of methods for detecting illicit plant cultivation from satellite multispectral observations in the visible and near-IR bands. As typical samples of such sites, the areas of cultivation of narcotic species — opium poppy and cannabis — were examined. For these species, a brief historical overview of the application of remote monitoring technologies is presented, features of their observed spectral signatures are examined, and techniques for improving the accuracy of estimates based on observing the features of the phenology cycle of these plants are shown. Examples of application of remote sensing

data for the compilation of annual regional surveys of UNODC are presented. The results of the analytical review were used in formulating the specifics of the use of remote sensing data for the detection of illegal agriculture sites. This allowed to formulate requirements for ERS information systems, which provides the solution of problems of identifying and evaluating the productivity of illegal land use.

Keywords: satellite monitoring, illicit crop cultivation, spectral signatures

Accepted: 26.10.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-13-30

References

- 1. Gerus A. V., Savchenko E. V., Savorskiy V. P., Ispolzovanie metoda ortogonalnoi proektsii dlya identifikatsii malykh ob"ektov v multispektralnom analize (Using the orthogonal projection method to identify small objects in multispectral analysis), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 27–35.
- 2. Zajtseva V.A., Lovchikova L. P., Naumenko E. K., Kononovich S. I., Nikonenko S. V., Plyuta V. E., Spektry otrazheniya narkosoderzhashchikh rastenii i vybor spektral'nykh diapazonov dlya ikh obnaruzheniya (Reflection spectra of drug-containing plants and selection of spectral ranges for their detection), *Zhurnal prikladnoi spektroskopii*, 1996, Vol. 63. No. 6. pp. 911–918.
- 3. Zajtseva V.A., Lovchikova L.P., Naumenko E.K., Kononovich S.I., Nikonenko S.V., Plyuta V.E., Koeffitsienty yarkosti posevov maka i ego otdel'nykh fitoelementov v razlichnykh fazakh vegetatsii (Brightness coefficients of poppy crops and its individual phytoelements in different phases of vegetation), *Zhurnal prikladnoi spektroskopii*, 1997, Vol. 64, No. 1. pp. 85–89.
- 4. Lazarev A. I., Nikolaev A. G., Hrunov E. V., *Opticheskie issledovaniya v kosmose* (Optical research in space), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979, 256 p.
- 5. 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., Tsentr kollektivnogo polzovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
- 6. Loupian E. A., Bartalev S. A., Tolpin V. A., Krasheninnikova Yu. S., Vozmozhnosti ispolzovaniya prostranstvenno-vremennykh vegetatsionnykh indeksov na primere analiza anomalnykh uslovii razvitiya ozimykh kultur na evropeiskoi chasti Rossii v 2016 godu (The possibility of using spatiotemporal vegetation indices on the example of the analysis of abnormal conditions of development of winter crops in the European part of Russia in 2016), 14-ya Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa" (14th All-Russian Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, Moscow: IKI RAN, 2016, p. 361.
- 7. Matiyasevich L. M., Kochergin D. V., Subbotin Yu. L., Mamatulin V. N., Otsenka vozmozhnostei deshi-frirovaniya polei maka fotometricheskim metodom (Estimation of the possibilities of deciphering poppy fields by photometric method), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1992, Vol. 3, pp. 67–75.
- 8. Savorskiy V. P., Kashnitskiy A. V., Konstantinova A. M., Balashov I. V., Krasheninnikova Yu. S., Tolpin V. A., Maklakov S. M., Savchenko E. V., Vozmozhnosti analiza giperspektral'nykh indeksov v informatsionnykh sistemakh distantsionnogo monitoringa semeistva "Sozvezdie-Vega" (Capabilities of hyperspectral indices analysis of the Vega-Constellation remote monitoring information systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp. 28–45.
- 9. Adam E., Mutanga O., Spectral discrimination of papyrus vegetation (Cyperus papyrus L.) in swamp wetlands using field spectrometry, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009. Vol. 64. No. 6. pp. 612–620.
- 10. Afghanistan Opium Survey 2017, Cultivation and Production: United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC) Research, Afghanistan, 2017, 73 p.
- 11. Breiman L., Friedman J. H., Olshen R., Stone C., *Classification and Regression Trees*, New York: Chapman & Hall, 1984, 368 p.
- 12. Davranche A., Lefebvre G., Poulin B., Wetland monitoring using classification trees and SPOT-5 seasonal time series, *Remote Sensing of Environment*, 2010, Vol. 114, No. 3, pp. 552–562.

- 13. Handheld Spectroradiometer: User's Guide, Boulder, CO, USA: ASD Inc., 2005. 72 p.
- 14. Jia K., Wu B., Tian Y., X. Du., Spectral Discrimination of Opium Poppy, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, Vol. 49, No. 9, pp. 3414–3422.
- 15. Kornbluth J., Poisonous fallout from the war on marijuana, *The New York Times Magazine*, 1978, November 19, p. 15.
- 16. Mattiuzzi M., Bussink C., Bauer T., Analysing Phenological Characteristics Extracted from Landsat NDVI Time Series to Identify Suitable Image Acquisition Dates for Cannabis Mapping in Afghanistan, *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, Stuttgart, 2014, Vol. 5, pp. 383–392.
- 17. *Morocco Cannabis Survey 2005*, United Nations Office on Drugs and Crime (UNIDOC), Morocco, 2005, 37 p.
- 18. *Myanmar Opium Survey 2003*, United Nations Office on Drugs and Crime (UNIDOC), Myanmar, 2003, 52 p.
- 19. Richards J.A., *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*, Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1993, 340 p.
- 20. 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.
- 21. Sader S.A., Remote Sensing of Narcotic Crops with Special Reference to Techniques for Detection and Monitoring of Poppy Production in Afghanistan: Technical report. Washington: Development Alternatives Corp., 1990, 70 p.
- 22. Schmidt K. S., Skidmore A. K., Spectral discrimination of vegetation types in a coastal wetland, *Remote Sensing of Environment*, 2003, Vol. 85, No. 1, pp. 92–108.
- 23. Simms D. M., Remote Sensing of Opium Poppy Cultivation in Afghanistan, Cranfield University, 2016, 159 p.
- 24. *Southeast Asia Opium Survey 2014*, United Nations Office on Druds and Crime (UNIDOC), Bangkok, 2014, 105 p.
- 25. Staats E.B., Review of Selected Narcotics Enforcement Research and Demonstration Projects: Report of the Comptroller General of the United States, Washington, 1997, 35 p.
- 26. Swank I. C., North American heroin, *Drug Enforcement*, 1977, Vol. 4, No. 1, pp. 2–12.
- 27. Walthall C. L., Daughtry 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.