

Развитие методов спутникового мониторинга состояния посевов сахарного тростника в Южной Индии

Е. С. Ёлкина¹, В. А. Егоров¹, Д. Е. Плотников¹, Е. В. Самофал¹,
С. А. Баргалева¹, В. К. Патил², Дж. К. Сунил², В. С. Чаван³

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: elkina@d902.iki.rssi.ru

² *Институт прикладных сельскохозяйственных исследований*
имени К. Дж. Сомая, Карнатака, Индия
E-mail: patil.vc@somaiya.com

³ *Институт инженерных наук и информационных технологий*
имени К. Дж. Сомая, Мумбай, Индия
E-mail: vchavan@somaiya.edu

В рамках работы проведён анализ возможностей мониторинга посевов сахарного тростника по спутниковым данным дистанционного зондирования на территории Индии и представлены подходы к дистанционной оценке их состояния. Для оценки возможностей разделимости посевов сахарного тростника и других сельскохозяйственных культур, а также для формирования опорной выборки данных для обучения классификатора и валидации результатов обработки спутниковых изображений была собрана наземная информация о посевах сельскохозяйственных культур на территории тестового региона. Для проведения исследований спектрально-временных особенностей посевов сахарного тростника построены однородные временные ряды оптических (Sentinel-2) и радарных (Sentinel-1) спутниковых данных за 2017–2018 гг. Исследования фенологических особенностей посевов сахарного тростника, а также характеристик, основанных на анализе временных рядов данных дистанционного зондирования, показали, что информативными признаками для распознавания этой культуры могут являться длина вегетационного периода и накопленная биомасса. Оценка состояния посевов в терминах водной и азотной обеспеченности может проводиться с использованием определённых вегетационных индексов, информативность которых будет проверена с помощью данных, полученных в рамках эксперимента на полях Института прикладных сельскохозяйственных исследований им. К. Дж. Сомая в Южной Индии. В качестве технологической платформы для проведения исследований и разработок научный проект Российского фонда фундаментальных исследований и Департамента науки и технологии Правительства Индии № 18-51-45001 ИНД_а ориентирован на использование веб-сервиса спутникового мониторинга Vega-GEOGLAM.

Ключевые слова: сахарный тростник, распознавание культур, спутниковый мониторинг, оценка состояния, Vega-GEOGLAM, Sentinel

Одобрена к печати: 28.06.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-159-173

Введение

По прогнозам Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединённых наций (ФАО, Food and Agriculture Organization — FAO), к 2050 г. в связи с ростом населения планеты потребуется увеличение мирового производства продовольствия примерно на 70 % (<http://www.fao.org/news/story/ru/item/35677/icode/>). Производство продовольствия относится к числу областей, требующих своевременного получения объективной информации о состоянии посевов с использованием инструментов сельскохозяйственного мониторинга. Развитие возможностей глобального спутникового мониторинга сельскохозяйственных угодий является целью международной программы GEOGLAM (<http://www.geoglam.org>), инициированной в 2011 г. странами Большой двадцатки и координируемой межправительственной Группой наблюдения Земли (Group on Earth Observations — GEO, <http://www.earthobservations.org>). В поддержку инициативы GEOGLAM Институт космических исследований

Российской академии наук (ИКИ РАН) создал информационную систему Vega-GEOGLAM (Толпин и др., 2019), обеспечивающую технологическую поддержку исследованиям и разработкам по развитию методов дистанционного мониторинга сельского хозяйства в различных регионах мира и охватывающую глобальную сеть тестовых полигонов программы JECAM (Joint Experiment for Crop Assessment and Monitoring, <http://www.jecam.org>).

Российский фонд фундаментальных исследований и Департамент науки и технологии Правительства Индии поддержали партнёрскую инициативу ИКИ РАН и Института прикладных сельскохозяйственных исследований им. К. Дж. Сомайя (K.J. Somaiya Institute of Applied Agricultural Research — KIAAR) по проведению российско-индийских научных исследований, направленных на разработку методов спутникового мониторинга посевов сахарного тростника в Индии в целях контроля их водообеспечения и азотного питания. В регионе исследования расположен один из тестовых участков сети JECAM.

Сахарный тростник выращивается преимущественно в тропических и субтропических регионах и используется для получения сахара, производства биотоплива и целлюлозы. Индия находится в тройке лидеров по площади плантаций тростника и экспорту сахара. Вместе с тем выращивание сахарного тростника в Индии большим числом частных ферм при отсутствии системы мониторинга посевов затрудняет возможности объективной оценки их состояния и прогноза урожая.

Российско-индийский проект направлен на разработку дистанционных методов картографирования и мониторинга состояния посевов сахарного тростника для контроля их обеспеченности водой и азотным питанием и реализуется для территории административных округов Багалкот и Белгаум Южной Индии.

Характеристика объекта исследования

Сахарный тростник (*Saccharum officinarum*) — многолетнее растение, характеризующееся относительно быстрым ростом, набирающее большую биомассу, с многократным сбором урожая в течение нескольких лет, требовательное к количеству солнечной радиации и условиям полива. В Южной Индии практикуется выращивание тростника в виде саженцев или из корней ранее убранных посевов (ratoon). Последние растут быстрее, но отличаются меньшей биомассой. Полный цикл развития посевов сахарного тростника в зависимости от сорта может составлять 10–12, 14 или 18 мес. Выделяют четыре фазы роста культуры: прорастание, кущение, удлинение стебля и созревание (<http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/sugarcane/ru/>) (рис. 1).

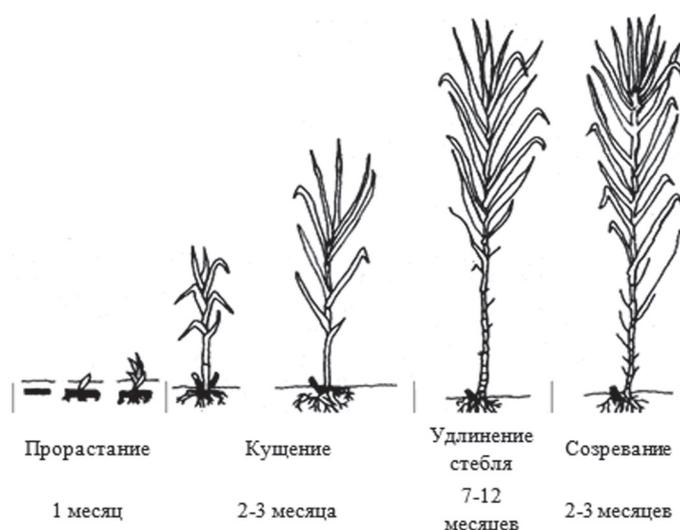


Рис. 1. Фенологические фазы развития посевов сахарного тростника

Фенологические фазы развития сахарного тростника в Южной Индии имеют следующие особенности (<http://www.sugarcane crops.com>). Прорастание начинается после 20-го дня с момента посадки и длится около месяца. Стадия кушения наступает на 40–60-й день и занимает около 2–3 мес; в этот период растения формируют узлы кушения, новые побеги и становятся распознаваемы на спутниковых изображениях. Фаза роста начинается ориентировочно на 120-й день и длится 8–12 мес. На этом этапе ускоренно растёт стебель, появляются новые листья, тростник распознается на спутниковых изображениях. Фаза созревания длится около 3 мес, сопровождаясь остановкой роста, усыханием нижних и старых листьев, повышением концентрации сахара в стеблях. Содержание сахара на момент уборки обычно составляет 10–12 % биомассы растений. Для достижения оптимального содержания сахара в стеблях критичными факторами являются своевременная подкормка растений азотистыми удобрениями, обеспечение необходимого уровня влагосодержания посевов и правильный выбор момента уборки при их созревании.

Подходы к дистанционному мониторингу посевов сахарного тростника

Исследования по использованию данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для мониторинга плантаций сахарного тростника фокусируются преимущественно на следующих направлениях:

- разработка методов распознавания посевов с выделением возрастных групп и сортов;
- разработка методов мониторинга состояния посевов в процессе их развития: оценка недостатка питательных веществ в растениях, выявление стрессов и болезней, определение участков полегания посевов;
- разработка методов оценки урожайности сахарного тростника.

Имеется значительное количество исследований по дистанционной оценке плантаций сахарного тростника (Junior et al., 2017; Mulianga et al., 2015; Schultz, Immitzer, 2015). Однако подавляющее их число проводилось применительно к условиям Южной Африки, Бразилии, Австралии и Индонезии. Для Индии число публикаций по мониторингу плантаций тростника с помощью данных ДЗЗ очень ограничено, а имеющиеся исследования, как правило, относятся к отдельным фермерским хозяйствам и посвящены распознаванию посевов (Rajeev et al., 2014; Verma et al., 2017). Немногочисленность исследований на эту тему объясняется особенностями региона и объекта мониторинга, а именно чрезвычайно малыми размерами полей, неоднородностью спектрально-временных характеристик класса, недоступностью информативных дистанционных измерений оптического диапазона длин волн в течение многомесячного сезона дождей.

Распознавание плантаций сахарного тростника

Подавляющее число публикаций по вопросам распознавания плантаций сахарного тростника относятся к территории Бразилии (Formaggio et al., 2010; Junior et al., 2017; Schultz, Immitzer, 2015; Vicente et al., 2013 и др.) с достаточно большими размерами полей и высоким уровнем агротехники. В стране имеются официальные данные по площади посевов сахарного тростника, часто используемые для сравнительной оценки с результатами распознавания (Junior et al., 2017). Ввиду относительно большого размера полей в Бразилии эффективно могут использоваться объектно-ориентированные подходы к распознаванию посевов с использованием текстурных признаков (Formaggio et al., 2010; Schultz, Immitzer, 2015).

Заметное количество исследований посвящено использованию временных серий спутниковой информации оптического диапазона, например данных Landsat (Formaggio et al., 2010; Mulyono, Nadirah, 2016; Schultz, Immitzer, 2015), IRS (Verma et al., 2017), Sentinel-2 (Zhou et al., 2015). Для распознавания плантаций могут применяться иерархические подходы (Formaggio

et al., 2010; Fortes, Dematte, 2006) с использованием в качестве решающего правила методов максимального правдоподобия (Junior et al., 2017) и наименьшего расстояния, а также непараметрических классификаторов (Schultz, Immitzer, 2015). Так как сахарный тростник является неоднородным классом, в ряде работ применяется разбиение посевов на подклассы по ряду критериев, включая возраст, сорт, тип посадки (Vikesh et al., 2010).

Ввиду ограниченных возможностей использования спутниковых данных оптического диапазона во время муссонного сезона ведутся исследования по использованию радарных данных для дистанционной оценки посевов тростника. Показана информативность спутниковых радиолокационных данных X-диапазона TerraSAR-X для выявления плантаций сахарного тростника в условиях тропического климата (Baghdadi et al., 2010; Lin et al., 2015). Исследуются возможности комбинирования оптических и радарных данных ДДЗ (Baghdadi et al., 2010; Steinhausen et al., 2018).

Оценка состояния растений и прогнозирование урожайности

Известно, что недостаток азота, влаги и солей в стеблях сахарного тростника оказывает влияние на спектральный отклик посевов (Abdel-Rahman, Ahmed, 2008; Muñoz-Huerta et al., 2013). Для мониторинга состояния сахарного тростника используются временные ряды спектральных вегетационных индексов, таких как NDVI (Normalised Difference Vegetation Index), RVI (Ratio Vegetation Index), EVI (Enhanced Vegetation Index), NDWI (Normalized Difference Water Index), тесно связанных с биофизическими показателями LAI (Leaf Area Index) и APAR (Absorbed Photosynthetically Active Radiation). Исследуются возможности оценки динамики развития сахарного тростника в зависимости от накопленной эффективной температуры воздуха для определения достижения фазы зрелости посевов и максимума биомассы. Данные ДЗЗ применяются для прогнозирования урожайности тростника с помощью регрессионных моделей с привлечением статистической информации или результатов моделирования (Abdelrahim, Abdelaziem, 2018; Lisboa et al., 2018).

Характеристика региона исследования

В округах Багалкот и Белгаум штата Карнатака на юго-западе Индии (рис. 2) находится множество плантаций сахарного тростника, включая экспериментальные и промышленные поля института KIAAR.

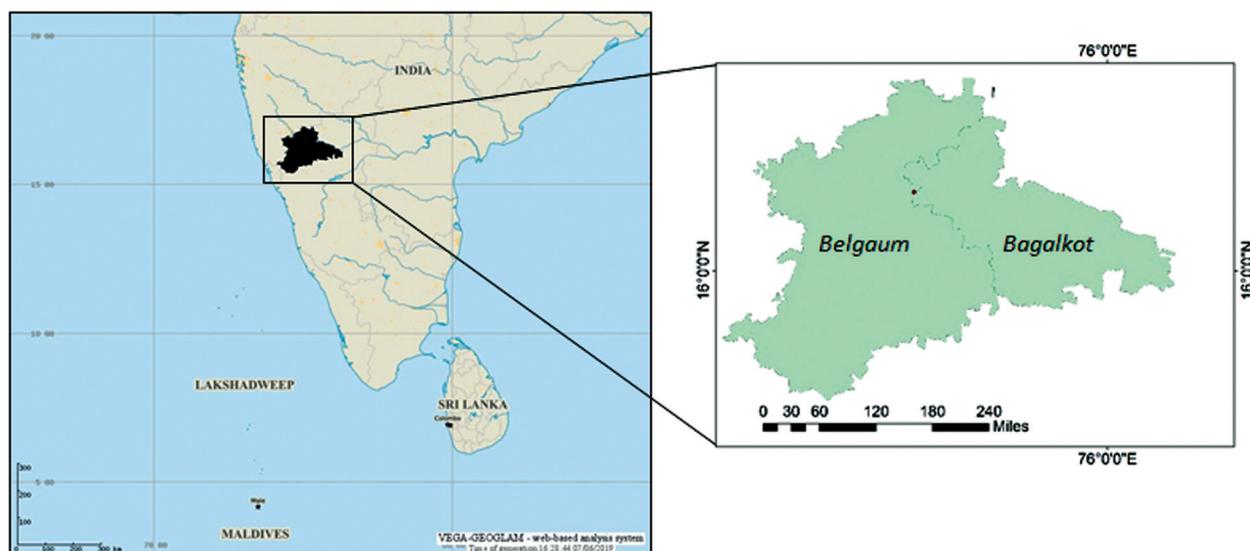


Рис. 2. Расположение тестового региона в Южной Индии

Регион характеризуется муссонным климатом с периодами затяжных дождей (июнь – сентябрь) и засушливой погоды (декабрь – март). Основные выращиваемые культуры — сахарный тростник, кукуруза, куркума, пшеница. Структура землевладения характеризуется наличием большого количества фермерских хозяйств малой площади (часто менее 1 га) с преобладанием ручного труда. Для оценки возможности картографирования тростника и других культур, а также получения опорных данных для классификации и валидации результатов был организован сбор наземной информации, включая сведения о расположении и границах полей, фенологии развития растений, способе посадки, наличии орошения и др. С использованием GPS была собрана информация о более чем 450 полях института KIARR и независимых хозяйств в округах Белгаум и Багалкот и сформирована база данных об участках, занятых различными культурами.

Оценка возможностей дистанционного мониторинга посевов сахарного тростника

Концептуальная схема исследований (рис. 3) включает в себя два основных блока, направленных на оценку возможностей распознавания посевов сахарного тростника и выработку подходов к дистанционной оценке их состояния.

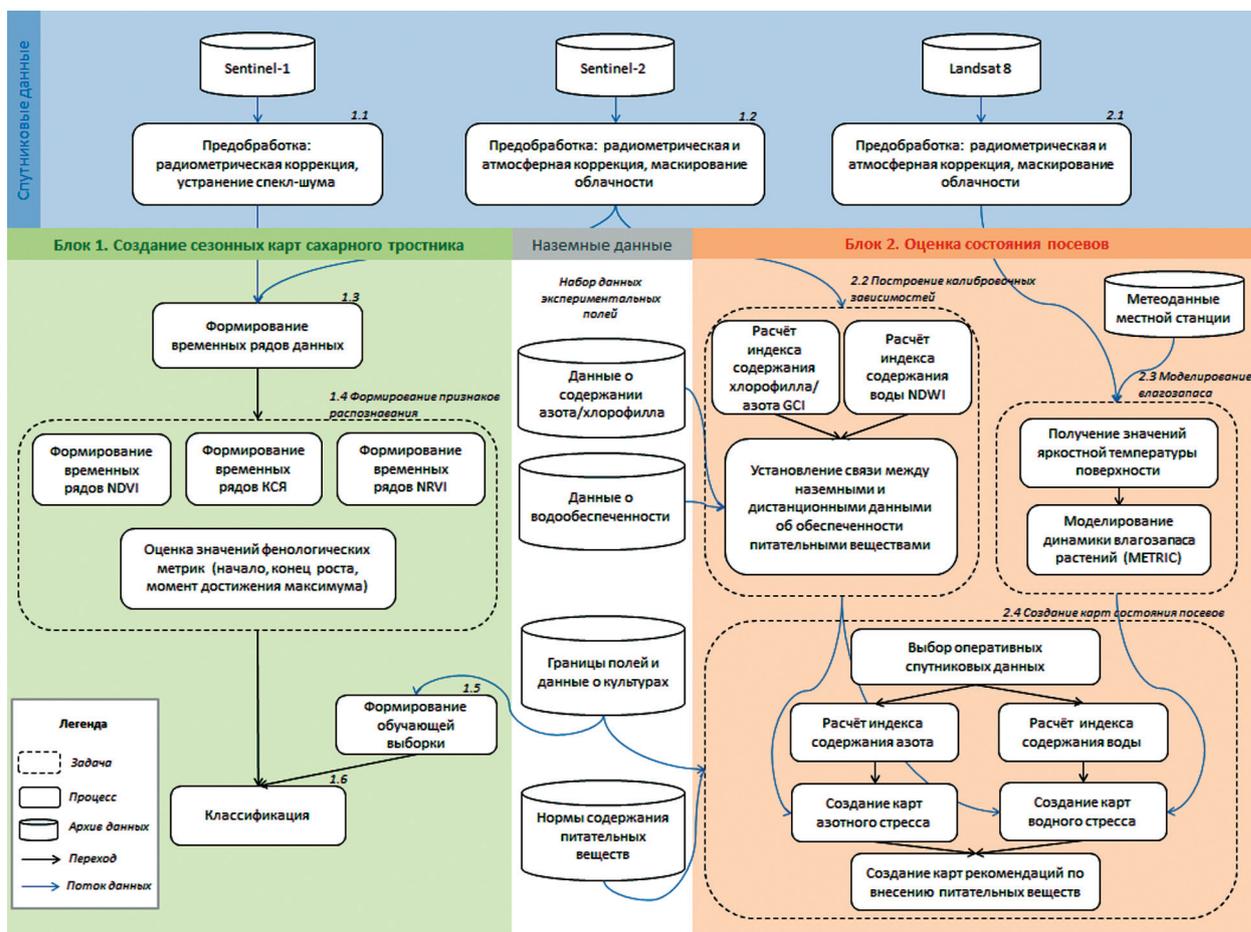


Рис. 3. Концептуальная схема исследований по развитию методов дистанционного мониторинга посевов сахарного тростника

Исследования по созданию карт посевов сахарного тростника предполагают построение временных рядов оптических и радарных данных, формирование различных признаков

распознавания посевов тростника на основе анализа временных рядов данных, исследование возможностей их классификации с оценкой получаемых результатов на основе опорной выборки. Необходимость учёта внутриклассовой неоднородности сахарного тростника (различия сортов, дат сева, типов посадки, используемой агротехники) и небольшого размера полей предопределяет использование спутниковых данных достаточно высокого пространственного разрешения (рис. 4). Необходимым требованиям удовлетворяют оптические данные спутников Sentinel-2 (пространственное разрешение 10–20 м) и радиолокационные данные С-диапазона Sentinel-1 с размером пикселя 10×20 м. Снимки спутника Landsat-8 имеют разрешение 30–60 м и могут быть применены, в частности, для оценки состояния посевов.

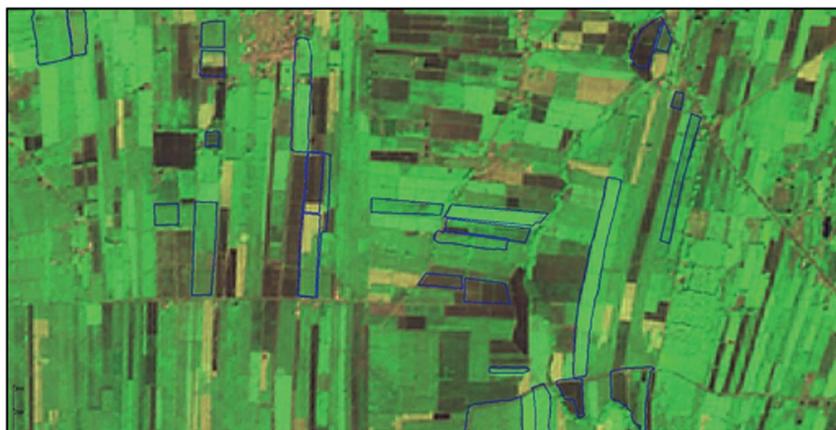


Рис. 4. Спутниковое изображение Sentinel-2В от 23 декабря 2018 г. Синим цветом обозначены границы полей сахарного тростника, которые могут находиться на различных этапах развития и уборки

На территорию исследования сформирован архив спутниковых оптических изображений Sentinel-2A/B MSI, Landsat-8 OLI-TIRS и Sentinel-1A/B C-SAR за 2013–2019 гг. (рис. 5). Архив данных оперативно пополняется, автоматически проходит радиометрическую и атмосферную коррекцию. Обработка информации осуществляется с использованием инфраструктуры обработки данных ДЗЗ в составе Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015).

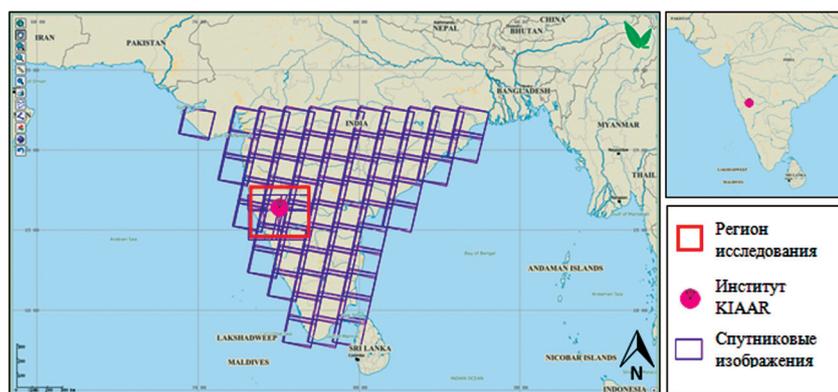


Рис. 5. Покрытие тестового региона сценами Landsat-8 и Sentinel-2A/B за 2013–2019 гг. в интерфейсе сервиса Vega-GEOGLAM

В период муссонных дождей (конец мая – начало сентября) создание очищенных от влияния облачности однородных временных рядов данных ДЗЗ оптического диапазона на территорию штата Карнатака затруднено (рис. 6, см. с. 165).

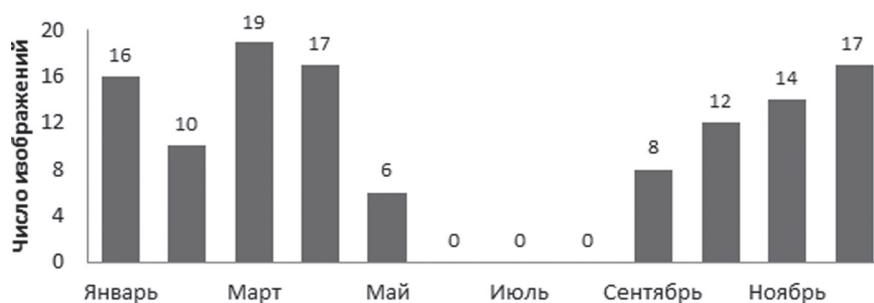


Рис. 6. Количество безоблачных спутниковых наблюдений спутника Sentinel-2 в 2018 г. для региона исследования (штат Карнатака, Индия)

Для восстановления временных рядов данных высокого пространственного разрешения в условиях отсутствия масок облачности и теней был применён метод восстановления пропущенных значений вегетационного индекса NDVI на основе скользящей оконной взвешенной регрессии полиномами LOWESS (Cleveland, 1979). В качестве весов при этом использованы значения индекса NDSI (Normalized Difference Snow Index), рассчитанного на основе измерений в голубом и ближнем ИК-каналах прибора MSI и связанного с влиянием мешающих факторов. В результате оказалось возможным получить на регион исследования ежедневные оценки NDVI с пространственным разрешением 10 м и сформировать непрерывный временной ряд за 2018–2019 гг. На рис. 7 представлен разновременный синтез ежедневных измерений NDVI, полученных по данным прибора MSI (Sentinel-2A/B).

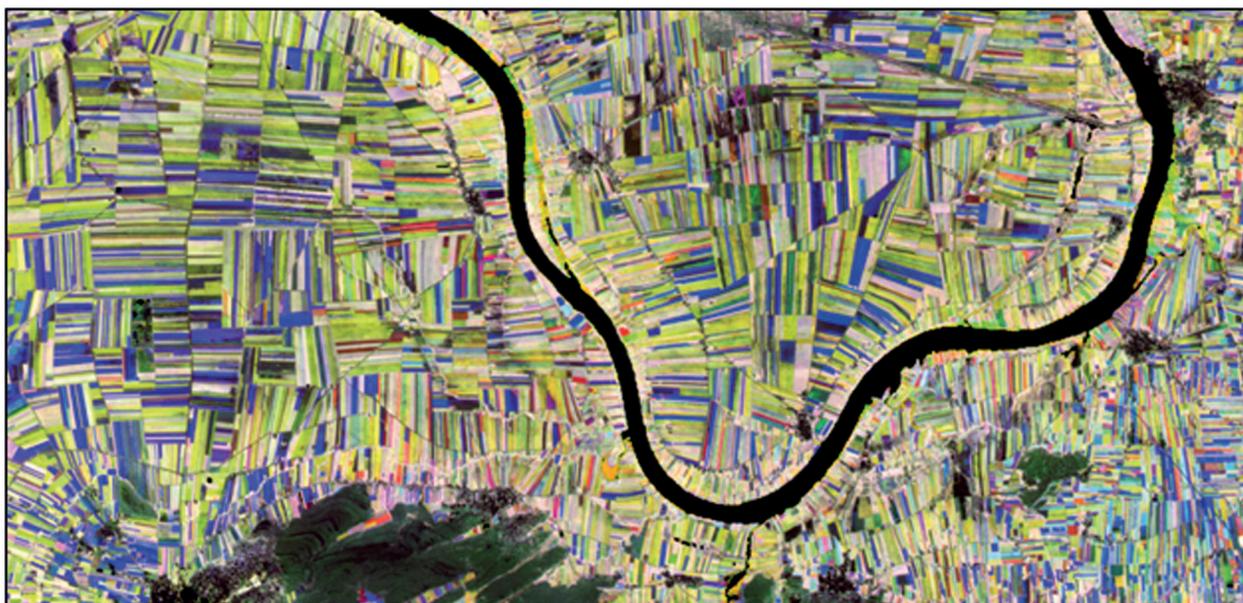


Рис. 7. Цветовой синтез разновременных изображений NDVI, построенных по данным системы Sentinel-2A/B на регион исследования

Построенные таким образом временные ряды NDVI сельскохозяйственной растительности позволяют анализировать и формировать фенологические метрики для распознавания культур. Временной ряд ежедневных значений NDVI формирует характерный «портрет» культуры, отражающий развитие растительности на поле с присущей ей динамикой. На рис. 8 (см. с. 165) приведены временные профили NDVI для полей сахарного тростника, пшеницы, куркумы и кукурузы. На рис. 9 (см. с. 166) показан годовой профиль NDVI для нескольких полей сахарного тростника.

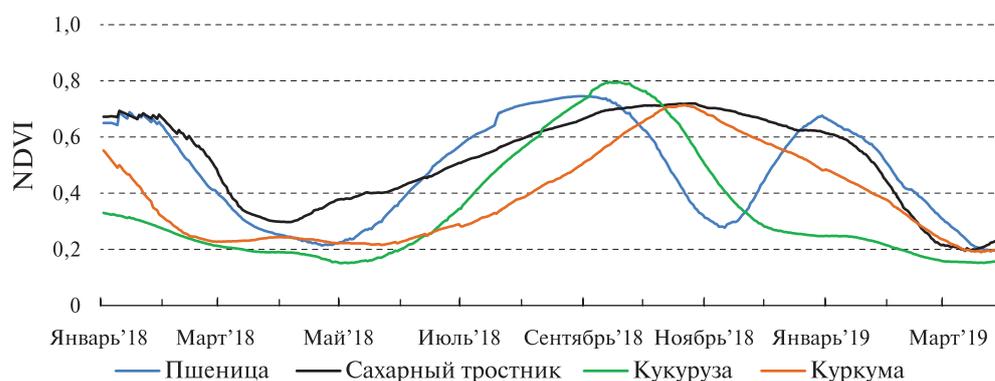


Рис. 8. Примеры профилей NDVI сахарного тростника в сравнении с основными культурами по данным Sentinel-2A/B. Сахарный тростник обладает наиболее продолжительным вегетационным периодом

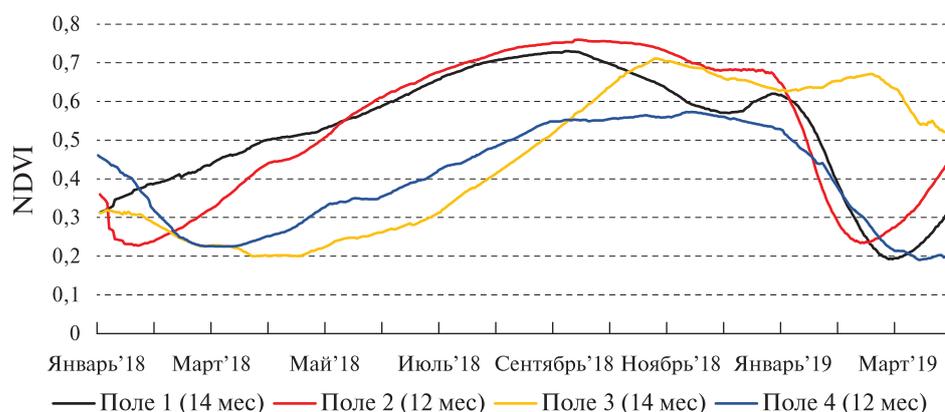


Рис. 9. Графики по данным Sentinel-2A,B NDVI для полей сахарного тростника различной динамики развития: поле 1 — посадка в ноябре 2017 г. — уборка в феврале 2019 г.; поле 2 — росток из корня, январь 2018 г. — февраль 2019 г.; поле 3 — посадка в июне 2018 г., уборка ожидается в конце 2019 г.; поле 4 — росток из корня, февраль 2018 г. — начало марта 2019 г.

Очевидно, что для посевов сахарного тростника с разным временем посадки даты наступления отдельных фаз различаются. Тем не менее спектрально-временные профили посевов сахарного тростника отражают сезонность его посадки и уборки (см. рис. 9).

Анализ спектрально-временных профилей сахарного тростника и других выращиваемых в тестовом регионе культур указывает на их потенциальную делимость (см. рис. 8). Исследования фенологических особенностей сахарного тростника показали, что одним из возможных признаков его распознавания может служить длина вегетационного периода, являющаяся максимальной для культур тестового региона. Продолжительность полного цикла развития тростника составляет 12, 14 или 18 мес, в то время как для других культур не превышает 10 мес (таблица).

Календарь роста культур в тестовом регионе

Культура	Время посадки	Время уборки	Длительность роста, мес
Сахарный тростник	январь – февраль октябрь – ноябрь июль – август	ноябрь – март	12/14/18
Кукуруза	июнь – октябрь	октябрь – ноябрь	4
Куркума	июнь – июль	февраль – март	9
Пшеница	октябрь – декабрь	январь	5

Признаком распознавания посевов сахарного тростника могут служить и максимальные значения накопленной зелёной биомассы, в качестве индикатора которой часто используют величину NDVI, что, однако, требует учёта эффекта насыщения индекса при высоких его значениях. Исследования показывают, что для сахарного тростника пиковые значения NDVI примерно соответствует стадии его зрелости.

Для получения оценки индекса биомассы культур исследуется использование нормализованного радарного индекса NRVI (Normalized Radar Vegetation Index) (1), оцениваемого по снимкам Sentinel-1 в момент достижения максимума NDVI по данным оптических наблюдений:

$$\text{NRVI} = 1 - \frac{\text{RVI} - 1}{\text{RVI} + 1}, \quad (1)$$

где $\text{RVI} = 10^{0,1(VV - HV)}$ — радарный вегетационный индекс (Radar Vegetation Index); VV — поляризация ВВ (вертикально-вертикальная), излучение и приём — на вертикальной поляризации; HV — поляризация ГВ (горизонтально-вертикальная), излучение — на горизонтальной, приём — на вертикальной поляризации. Радарный индекс RVI, метод получения которого разработан в ИКИ РАН, чувствителен к изменениям, связанным с вегетационной динамикой сельскохозяйственных культур независимо от облачного покрова и влияния жидких осадков. Рисунок 10 демонстрирует, что значения NRVI посевов сахарного тростника в максимуме своего развития заметно выше величин данного показателя для других культур тестового региона.

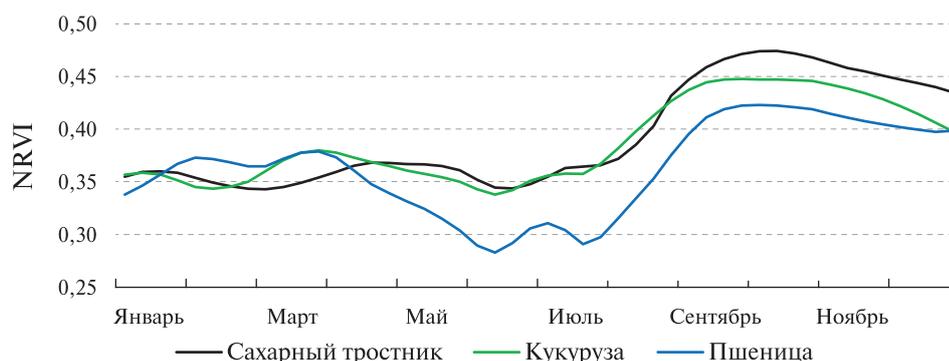


Рис. 10. Осреднённые значения NRVI по данным Sentinel-1 для полей, занятых различными культурами в 2018 г. Наибольшие значения сезонного максимума NRVI отмечаются у посевов сахарного тростника

Использование радарных данных в совокупности с оптическими даёт возможность получить большее количество метрик, описывающих рост сахарного тростника. Временные ряды оптических и радарных данных позволяют извлечь спектрально-временные метрики распознавания сахарного тростника, такие как дата начала и конца вегетации, дата наступления максимума, скорость роста кривой и др. Для повышения точности распознавания посевов данной культуры при классификации также целесообразно использовать маску пахотных земель.

Следует отметить, что использование признаков длины вегетационного периода и максимума биомассы делает возможным выявление посевов сахарного тростника лишь за несколько месяцев до его уборки, накладывая ограничения на применение данного подхода для решения задач оперативной оценки их состояния.

Создание методики оценки состояния сахарного тростника

Содержание воды и азота — главные факторы успешного развития посевов сахарного тростника. Потребность в водном обеспечении тростника зависит от фазы его развития. На первых стадиях роста кущение напрямую зависит от орошения, интервалы полива в период активного роста — удлинения стебля — могут быть увеличены, а в течение периода созревания полив

может быть сведён к минимуму. Уменьшение полива позволяет довести урожай до зрелости путём обезвоживания растения для ускоренного формирования сахарозы (http://www.agri-tech.tnau.ac.in/expert_system/sugar/faq.html). Выявление водного стресса посевов сахарного тростника крайне важно на ранних стадиях их развития.

Логика исследований возможностей оценки состояния посевов сахарного тростника (см. рис. 3, блок 2) включает в себя ряд этапов, а именно:

- сбор и подготовку спутниковых данных;
- экспериментальное установление связей данных дистанционных измерений с измененными на земле показателями содержания воды и азота в растениях;
- моделирование эвапотранспирации растений;
- оценку обеспеченности водой и азотом посевов сахарного тростника для выработки рекомендаций по внесению питательных веществ (prescription maps).

Известно, что при недостатке азота листья тростника краснеют, сворачиваются, при недостатке воды — желтеют и усыхают. Эти изменения в цвете и тоне листьев растений потенциально могут распознаваться на спутниковых изображениях в определённых каналах спектра, что создаёт предпосылки для их использования при оценке состояния посевов. Целью исследований является создание оперативных карт азотной и водной обеспеченности посевов сахарного тростника. Построение таких карт требует предварительной калибровки зависимостей дистанционно измеренных вегетационных индексов от содержания воды и азота в листьях по опорным данным наземных измерений. Для установления такого рода калибровочных зависимостей на полях института KIAAR намечено создание эталонных полей сахарного тростника, обеспечиваемых водой и азотом на 75, 50 и 30 % от принятой нормы. В течение всего вегетационного периода по спутниковым данным ДЗЗ будут строиться карты информативных вегетационных индексов, потенциально чувствительных к содержанию в растениях хлорофилла и воды. Соотнесение значений количества воды/азота в растениях со значениями получаемых вегетационных индексов позволит исследовать возможность построения и использования в качестве калибровочных зависимостей соответствующих регрессионных моделей (см. рис. 3, блок 2.2).

Для оценки количества воды в листьях целесообразно провести исследование возможностей нормализованных разностных индексов NDWI (Normalized Difference Water Index) и NDMI (Normalized Difference Moisture Index) (2)–(3):

$$\text{NDWI} = \frac{\text{GREEN} - \text{NIR}}{\text{GREEN} + \text{NIR}}, \quad (2)$$

$$\text{NDMI} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}}, \quad (3)$$

где GREEN, NIR, SWIR — коэффициенты спектральной яркости соответственно в зелёном, ближнем инфракрасном и среднем инфракрасном диапазонах длин волн спектра.

Для дистанционной оценки количества азота в листьях предполагается использование канала Red Edge прибора MSI (Sentinel-2), чувствительного, согласно исследованиям (Delegido et al., 2013; Sharma et al., 2015), к содержанию хлорофилла в растениях. Наличие корреляции между содержанием хлорофилла и азота в растениях открывает возможность использования данного канала MSI для оценки содержания последнего в посевах сахарного тростника. На этапе построения калибровочных зависимостей будет использован хлорофилловый индекс (Chlorophyll Index — CII), индекс красного края (Red-edge index), а также нормализованный разностный Red Edge индекс (Normalized Difference Red Edge Index — NDRE) (4)–(6). Кроме того, будут рассмотрены индексы содержания хлорофилла NDVI, GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index), CVI (Chlorophyll Vegetation Index) и ClGreen (Green Chlorophyll Index) (7)–(10):

$$\text{CII} = \frac{\text{NIR}}{\text{RedEdge}} - 1, \quad (4)$$

$$\text{Red-edge index} = \frac{\text{RedEdge} - \text{Red}}{\text{RedEdge} + \text{Red}}, \quad (5)$$

$$\text{NDRE} = \frac{\text{NIR} - \text{RedEdge}}{\text{NIR} + \text{RedEdge}}, \quad (6)$$

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}}, \quad (7)$$

$$\text{GNDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{GREEN}}{\text{NIR} + \text{GREEN}}, \quad (8)$$

$$\text{CVI} = \frac{\text{NIR}}{\text{GREEN}} \cdot \frac{\text{RED}}{\text{GREEN}}, \quad (9)$$

$$\text{ClGreen} = \frac{\text{NIR}}{\text{GREEN}} - 1, \quad (10)$$

где RED и RedEdge — коэффициенты спектральной яркости соответственно в красном и «крайнем красном» диапазонах длины волны спектра.

Оценку состояния растений можно получить также с помощью моделей динамики вла­гоза­па­са растений. Например, модель METRIC (Allen et al., 2007) позволяет оценивать эва­по­тран­спи­ра­цию растений, используя в качестве входных данных метеорологическую ин­фор­ма­цию и данные «тепловых» каналов спутниковых приборов, описывающие темпе­ра­туру подстилающей поверхности. Получив оценку темпов эвапотранспирации растений с помощью дистанционных данных и уравнений теплового баланса, используемых в модели METRIC, можно сравнить её с потенциальной эвапотранспирацией, измеряемой на мест­ной метеостанции (см. рис. 3, блок 2.3). Величина разницы уровней потенциальной и реаль­ной эвапотранспирации характеризует наличие и уровень водного стресса растений. В работе предполагается использование тепловых каналов спутника Landsat-8, позволяющих полу­чать измерения температуры подстилающей поверхности с наилучшим пространственным разрешением.

На рис. 3 (блок 2.4) описан процесс оперативной оценки недостатка азотного или водного питания посевов сахарного тростника. Полученные калибровочные экспериментальные дан­ные и данные моделирования используются как входные наряду с актуальными спутниковы­ми изображениями. На территорию исследования по спутниковым данным рассчитываются вегетационные индексы, показавшие свою информативность. С помощью полученных кали­бровочных зависимостей значения индексов переводятся в относительное содержание воды или азота в растениях в масштабе каждого пикселя. Это позволит проанализировать степень неоднородности обеспечения растений питательными веществами, а также дать оценку необ­ходимого количества вносимых удобрений и воды.

Заключение

Мониторинг сахарного тростника — задача, актуальная для ряда стран тропического и суб­тропического регионов, однако в настоящее время не существует единого комплекса мето­до­логических подходов к её решению. Цели данного проекта — создание методики картогра­фирования посевов сахарного тростника и разработка способа оценки его состояния в тече­ние сезона вегетации в терминах недостатка водного и азотного питания.

Возможными признаками распознавания сахарного тростника по дистанционным дан­ным могут служить длина его вегетационного периода и индексы биомассы растений в мак­симум их сезонного развития. Для идентификации сахарного тростника по спутниковой информации целесообразно использовать временные ряды восстановленных ежедневных измерений NDVI по данным MSI (Sentinel-2), а также радарного вегетационного индекса по данным Sentinel-1.

Для развития возможностей оперативного спутникового мониторинга состояния посевов ведётся исследование дистанционных индикаторов в связи с лабораторно установленными показателями водного и азотного обеспечения на экспериментальных полях института KIAAR.

В качестве технологической платформы проекта используется сервис Vega-GEOGLAM, предоставляющий оперативно обновляемый архив спутниковых данных и временные ряды вегетационных индексов. Интеграция в сервис Vega-GEOGLAM инструментов оперативного спутникового мониторинга состояния сахарного тростника в перспективе позволит предоставлять сельхозпроизводителям Южной Индии информацию, необходимую для оптимального обеспечения посевов водой и азотным питанием.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Департамента науки и технологии Правительства Индии в рамках научного проекта № 18-55-45023 ИНД_а.

Литература

1. Луян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий 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.
2. Толпин В. А., Барталев С. А., Ёлкина Е. С., Кашицкий А. В., Константинова А. М., Луян Е. А., Марченков В. В., Плотников Д. Е. Информационная система Vega-GEOGLAM — инструмент разработки методов и подходов использования данных спутникового дистанционного зондирования в интересах решения задач глобального сельскохозяйственного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 183–197.
3. Abdel-Rahman E. M., Ahmed F. B. The application of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum spp. hybrid*) production: a review of the literature // Intern. J. Remote Sensing. 2008. V. 29. P. 3753–3767.
4. Abdelrahim E., Abdelazjem A. Monitoring and Yield Estimation of Sugarcane Using Remote Sensing and IS // American J. Engineering Research. 2018. V. 7. Iss. 1. P. 170–179.
5. Allen R. G., Tasumi M., Morse A., Trezza R., Wright J. L., Bastiaanssen W., Kramber W., Lorite I., Robinson C. W. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) — Applications // J. Irrigation and Drainage Engineering. 2007. V. 133(4). P. 395–406.
6. Baghdadi N., Cresson R., Todoroff P., Moinet S. Multitemporal Observations of Sugarcane by TerraSAR-X Images // Sensors. 2010. No. 10. P. 8899–8919.
7. Cleveland W. S. Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots // J. American Statistical Association. 1979. V. 74(368). P. 829–836.
8. Delegido J., Verrelst J., Meza C., Rivera J., Alonso L., Moreno O. A red-edge spectral index for remote sensing estimation of green LAI over agroecosystems // European J. Agronomy. 2013. V. 46. P. 42–52.
9. Formaggio A. R., Vieira M. A., Rennó C. D., Mello M. P. Object-Based Image Analysis and Data Mining for mapping sugarcane with Landsat imagery in Brazil // The Intern. Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2010. V. XXXVIII-4/C7. P. 10–19.
10. Fortes C., Dematee J. A. M. Discrimination of sugarcane varieties using Landsat 7 ETM+ spectral data // Intern. J. Remote Sensing. 2006. V. 27. No. 7–8. P. 1395–1412.
11. Junior C. C., Johann J. A., Antunes J. F. G. Mapping of sugarcane crop area in the Paraná State using Landsat/TM/OLI and IRS/LISS-3 images // Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 2017. V. 21. No. 6. P. 427–432.
12. Lin H., Chen J., Liang S., Li Q. Sugarcane Mapping in Tillering Period by Quad-Polarization TerraSAR-X Data // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2015. V. 12. No. 5. P. 993–997.
13. Lisboa I. P., Damian J. M., Cherubin M. R., Barros P. P. S., Fiorio P. R., Cerri C. C., Pellegrino C. E. Prediction of Sugarcane Yield Based on NDVI and Concentration of Leaf-Tissue Nutrients in Fields Managed with Straw Removal // Agronomy. 2018. V. 8. P. 196.
14. Mulianga B., Bégué A., Clouvel P., Todoroff P. Mapping Cropping Practices of a Sugarcane-Based Cropping System in Kenya Using Remote Sensing // Remote Sensing. 2015. V. 7. No. 11. P. 14428–14444.
15. Mulyono S., Nadirah. Identifying Sugarcane Plantation using LANDSAT-8 Images with Support Vector Machines // Earth and Environmental Science. 2016. V. 47. No. 1. P. 1–8.

16. Muñoz-Huerta R. F., Guevara-Gonzalez R. G., Contreras-Medina L. M., Torres-Pacheco I., Prado-Olivarez J., Ocampo-Velazquez R. V. A Review of Methods for Sensing the Nitrogen Status in Plants: Advantages, Disadvantages and Recent Advances // *Sensors*. 2013. No. 13. P. 10823–10843.
17. Rajeev R., Ankita J., Nain A. S. Remote sensing as a tool for discrimination and accuracy assessment of Sugarcane crop // *Intern. J. Basic and Applied Agricultural Research*. 2014. V. 12. No. 2. P. 173–177.
18. Schultz B., Immitzer M. Self-Guided Segmentation and Classification of Multi-Temporal Landsat 8 Images for Crop Type Mapping in Southeastern Brazil // *Remote Sensing*. 2015. No. 7. P. 14482–14508.
19. Sharma L. K., Bu H., Denton A., Franzen D. W. Active-optical sensors using red NDVI compared to red edge NDVI for prediction of corn grain yield in North Dakota, USA // *Sensors*. 2015. V. 15. No. 11. P. 27832–27853.
20. Steinhausen M. J., Wagner P. D., Balaji N., Waske B. Combining Sentinel-1 and Sentinel-2 data for improved land use and land cover mapping of monsoon regions // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2018. V. 7. P. 595–604.
21. Verma A. K., Garg P. K., Hari Prasad K. S. Sugarcane crop identification from LISS IV data using ISODATA, MLC, and indices based decision tree approach // *Arabian J. Geosciences*. 2017. V. 10. No. 1. P. 1–17.
22. Vicente L. E., Gomes D., Victoria D. d. C., Vicente A. K., Iwashita F. Evaluation of annual sugarcane monitoring using MODIS/EVI temporal series and spectral mixture analysis approach // *Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.: Proc.* 2013. P. 1–8.
23. Vikesh K., Vinod K., Jain K. Development of Spectral Signatures and Classification of Sugarcane using ASTER Data // *Intern. J. Computer Science and Communication*. 2010. V. 1. No. 1. P. 45–251.
24. Zhou Z., Huang J., Wang J., Zhang K., Kuang Z., Zhong S., Song X. Object-Oriented Classification of Sugarcane Using Time-Series Middle-Resolution Remote Sensing Data Based on AdaBoost // *PLoS ONE*. 2015. V. 10(11). P. 1–16.

Development of satellite monitoring methods for sugarcane crop condition assessment in Peninsular India

E. S. Elkina¹, V. A. Egorov¹, D. E. Plotnikov¹, E. V. Samofal¹,
S. A. Bartalev¹, V. C. Patil², J. K. Sunil², V. S. Chavan³

¹ *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: elkina@d902.iki.rssi.ru

² *K. J. Somaiya Institute of Applied Agricultural Research, Karnataka, India*
E-mail: patil.vc@somaiya.com

³ *K. J. Somaiya Institute of Engineering and Information Technology, Mumbai, India*
E-mail: vchavan@somaiya.edu

This study explores the possibilities of sugarcane identification on satellite imagery in Peninsular India and its crop condition assessment in terms of water and nitrogen nutrition status. Sugarcane monitoring is an important objective for a number of countries in the tropical and subtropical regions, however, there is no single set of methodological approaches to its solution. Progress in this field of research requires the studying of sugarcane spectral and biophysical characteristics and developing satellite data processing methods. The literature on the application of remote sensing to sugarcane monitoring is reviewed and the main difficulties and advantages for sugarcane satellite monitoring are highlighted. From preliminary experiments of sugarcane identification, it can be concluded that high-resolution satellite data give satisfactory results. The team of K. J. Somaiya Institute of Engineering and Information Technology conducted ground truth data collection in the test area as a preliminary step of the studies. The data collected on different crops were used for creating training and validation sets. Time-series of optical (Sentinel-2) and radar (Sentinel-1) vegetation indices were created to perform temporal-spectral analysis of sugarcane crops in comparison with other major crops in the region. Studies of phenological and spectral temporal sugarcane crops characteristics showed that the length of vegetation period and the level of the accumulated biomass may be the informative metrics for sugarcane discrimination from other crops in satellite imagery. For the crop condition assessment in terms of water and nitrogen nutrition status, ground experiments are proposed with further evaluation

of information value of satellite crop condition indicators. Web-based vegetation monitoring service Vega-GEOGLAM, developed at the Space Research Institute RAS, is viewed as a technical platform for the studies.

Keywords: sugarcane, satellite monitoring, Sentinel, crop identification, crop condition assessment, Vega-GEOGLAM, vegetation indices

Accepted: 28.06.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-159-173

References

1. 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., Tsentrikol'ektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovyykh dannyykh 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), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
2. Tolpin V. A., Bartalev S. A., Elkina E. S., Kashnitskiy A. V., Konstantinova A. M., Loupian E. A., Marchenkov V. V., Plotnikov D. E., Informatsionnaya sistema Vega-GEOGLAM — instrument razrabotki metodov i podkhodov ispol'zovaniya dannyykh sputnikovogo distantsionnogo zondirovaniya v interesakh resheniya zadach global'nogo sel'skokhozyaistvennogo monitoringa (Geoinformatic system Vega-GEOGLAM as a tool for development of methods for global agricultural monitoring), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 183–197.
3. Abdel-Rahman E. M., Ahmed F. B., The application of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum spp. hybrid*) production: a review of the literature, *Intern. J. Remote Sensing*, 2008, Vol. 29, pp. 3753–3767.
4. Abdelrahim E., Abdelaziem A., Monitoring and Yield Estimation of Sugarcane Using Remote Sensing and IS, *American J. Engineering Research*, 2018, Vol. 7, Issue 1, pp. 170–179.
5. Allen R. G., Tasumi M., Morse A., Trezza R., Wright J. L., Bastiaanssen W., Kramber W., Lorite I., Robinson C. W., Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) — Applications, *J. Irrigation and Drainage Engineering*, 2007, Vol. 133(4), pp. 395–406.
6. Baghdadi N., Cresson R., Todoroff P., Moinet S., Multitemporal Observations of Sugarcane by TerraSAR-X Images, *Sensors*, 2010, No. 10, pp. 8899–8919.
7. Cleveland W. S., Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots, *J. American Statistical Association*, 1979, Vol. 74(368), pp. 829–836.
8. Delegido J., Verrelst J., Meza C., Rivera J., Alonso L., Moreno J., A red-edge spectral index for remote sensing estimation of green LAI over agroecosystems, *European J. Agronomy*, 2013, Vol. 46, pp. 42–52.
9. Formaggio A. R., Vieira M. A., Rennó C. D., Mello M. P., Object-Based Image Analysis and Data Mining for mapping sugarcane with Landsat imagery in Brazil, *The Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2010, Vol. XXXVIII-4/C7.
10. Fortes C., Dematee J. A. M., Discrimination of sugarcane varieties using Landsat 7 ETM+ spectral data, *Intern. J. Remote Sensing*, Vol. 27, 2006, No. 7–8, pp. 1395–1412.
11. Junior C. C., Johann J. A., Antunes J. F. G., Mapping of sugarcane crop area in the Paraná State using Landsat/TM/OLI and IRS/LISS-3 images, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2017, Vol. 21, No. 6, pp. 427–432.
12. Lin H., Chen J., Liang S., Li Q., Sugarcane Mapping in Tillering Period by Quad-Polarization TerraSAR-X Data, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 993–997.
13. Lisboa I. P., Damian J. M., Cherubin M. R., Barros P. P. S., Fiorio P. R., Cerri C. C., Pellegrino C. E., Prediction of Sugarcane Yield Based on NDVI and Concentration of Leaf-Tissue Nutrients in Fields Managed with Straw Removal, *Agronomy*, 2018, No. 8, 196 p.
14. Mulianga B., Bégué A., Clouvel P., Todoroff P., Mapping Cropping Practices of a Sugarcane-Based Cropping System in Kenya Using Remote Sensing, *Remote Sensing*, 2015, No. 7(11), pp. 14428–14444.
15. Mulyono S., Nadirah, Identifying Sugarcane Plantation using LANDSAT-8 Images with Support Vector Machines, *Earth and Environmental Science*, 2016, Vol. 47, No. 1, pp. 1–8.
16. Muñoz-Huerta R. F., Guevara-Gonzalez R. G., Contreras-Medina L. M., Torres-Pacheco I., Prado-Olivarez J., Ocampo-Velazquez R. V., A Review of Methods for Sensing the Nitrogen Status in Plants: Advantages, Disadvantages and Recent Advances, *Sensors*, 2013, No. 13, pp. 10823–10843.

17. Rajeev R., Ankita J., Nain A. S., Remote sensing as a tool for discrimination and accuracy assessment of Sugarcane crop, *Intern. J. Basic and Applied Agricultural Research*, 2014, Vol. 12, No. 2, pp. 173–177.
18. Schultz B., Immitzer M., Self-Guided Segmentation and Classification of Multi-Temporal Landsat 8 Images for Crop Type Mapping in Southeastern Brazil, *Remote Sensing*, 2015, No. 7, pp. 14482–14508.
19. Sharma L. K., Bu H., Denton A., Franzen D. W., Active-optical sensors using red NDVI compared to red edge NDVI for prediction of corn grain yield in North Dakota, USA, *Sensors*, 2015, Vol. 15, No. 11, pp. 27832–27853.
20. Steinhausen M. J., Wagner P. D., Balaji N., Waske B., Combining Sentinel-1 and Sentinel-2 data for improved land use and land cover mapping of monsoon regions, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, pp. 595–604.
21. Verma A. K., Garg P. K., Hari Prasad K. S., Sugarcane crop identification from LISS IV data using ISODATA, MLC, and indices based decision tree approach, *Arabian J. Geosciences*, 2017, No. 10(1), pp. 1–17.
22. Vicente A. K., Gomes D., Victoria D. d. C., Vicente A. C. Iwashita F., Evaluation of annual sugarcane monitoring using MODIS/EVI temporal series and spectral mixture analysis approach, *Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp., Proc.*, 2013, pp. 1–8.
23. Vikesh K., Vinod K., Jain K., Development of Spectral Signatures and Classification of Sugarcane using ASTER Data, *Intern. J. Computer Science and Communication*, 2010, Vol. 1, No. 1, pp. 245–251.
24. Zhou Z., Huang J., Wang J., Zhang K., Kuang Z., Zhong S., Song X., Object-Oriented Classification of Sugarcane Using Time-Series Middle-Resolution Remote Sensing Data Based on AdaBoost, *PLoS ONE*, 2015, No. 10, pp. 1–16.