

Детектирование насаждений цитрусовых культур в Сирии по спутниковым данным Landsat-8 OLI

С. Нассер¹, И. Ю. Савин²

¹ *Российский университет дружбы народов, Москва, 117198, Россия*

² *Почвенный институт им. В. В. Докучаева, Москва, 119017, Россия*
E-mail: nasser.nn988@gmail.com, savin_iyu@esoil.ru

Возделывание цитрусовых культур имеет большое экономическое и социальное значение для стран Средиземноморья. Продукция цитрусовых в данном регионе значительно варьирует от года к году в связи с метеорологическими условиями и динамикой площади насаждений. Это предопределяет высокую значимость мониторинга их состояния, который в настоящий момент вовсе не проводится или осуществляется на основе опросно-статистического метода с большой погрешностью. Целью исследований был анализ возможностей оценки площадей цитрусовых насаждений тестового участка в Сирии на основе временных рядов NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), вычисленных по спутниковым данным Landsat-8 OLI. Детектирование насаждений цитрусовых культур осуществлялось с использованием метода анализа сходства кривых NDVI. Для оценки точности детектирования привлекались данные полевых обследований, проведённых в 2016 г. Было установлено, что осреднённые кривые NDVI массивов цитрусовых насаждений надёжно отделяются от массивов других древесных культур. Менее надёжно, но также достаточно уверенно детектируются преобладающие виды цитрусовых культур (апельсин, лимон, клементин). Разделение массивов внутри видов по возрасту и сортам оказалось недостоверным. Предложенный подход показал высокий потенциал для организации системы спутникового мониторинга площади цитрусовых насаждений в Сирии.

Ключевые слова: NDVI, Landsat-8, спутниковый мониторинг растительности, цитрусовые культуры, Сирия, ILWIS

Одобрена к печати: 05.08.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-199-208

Введение

Возделывание плодовых культур имеет большое значение в обеспечении населения продовольствием во многих странах мира, особенно в странах тропического пояса. Причём в разных областях плодовые культуры возделываются не только для питания местного населения, но и как важная часть экспорта в другие страны, что значительно увеличивает значимость данной отрасли сельского хозяйства.

В разных государствах, особенно в странах Средиземноморья, большая часть сельскохозяйственного производства ориентирована на возделывание именно цитрусовых культур, чему способствуют природные условия и тысячелетние традиции населения (Ur Rehman et al., 2020).

Урожайность цитрусовых культур в Средиземноморье сильно варьирует от года к году из-за колебаний климата (количества осадков, низкой температуры воздуха), инвазий вредителей и болезней, а также из-за доступности и количества применяемых удобрений (Galvañ et al., 2022). Это существенно отражается на ценах цитрусовых на рынках в Европе и во всём мире. Поэтому мониторинг состояния и прогнозирование урожая цитрусовых становится в странах региона важной экономической задачей.

В настоящее время эта задача в Сирии решается традиционными методами сбора информации с землепользователей и формирования статистической отчётности выборочным опросным методом (Almohamed, Darwish, 2021; Salwa, Cheikh et al., 2021). Точность собираемой информации, как правило, невысока, и сроки её получения слишком длинны. В качестве альтернативы может рассматриваться использование спутниковой информации. Технологии,

базирующиеся на анализе спутниковых данных, показали достаточно хорошую эффективность при мониторинге лесной растительности (Atzberger et al., 2020), а также при мониторинге посевов однолетних сельскохозяйственных культур (Лупян и др., 2009). Причём данные технологии в настоящее время широко используются как на глобальном, так и на локальном уровне.

Научных исследований в области разработки технологий спутникового мониторинга многолетних плодовых насаждений гораздо меньше. Достаточно полный обзор исследований в данном направлении приведён в работе К. Usha и В. Singh (2013). Согласно ему большая часть исследований использует для решения задач мониторинга тропических плодовых культур спутниковые данные высокого и сверхвысокого пространственного разрешения на уровне отдельных полей или небольших регионов.

Ведутся исследования по разработке спутниковых методов оперативного мониторинга виноградников (Рыбалко и др., 2016; Толпин и др., 2017), насаждений яблони (Savin et al., 2020).

Исследований, посвящённых спутниковому мониторингу цитрусовых насаждений, ещё меньше. Последний обзор подобных публикаций был сделан А. Мусаидом с коллегами (Moussaid et al., 2021). Авторам удалось найти около 40 публикаций, большая часть из которых была посвящена использованию БПЛА (беспилотный летательный аппарат) или наземному спектрометрированию. Был сделан вывод, что спутниковые данные проигрывают в качестве мониторинга данным, получаемым с БПЛА, и что наиболее разработаны подходы для мониторинга отдельных садов или деревьев, а не насаждений на больших территориях.

По-видимому, это связано со спецификой цитрусовых насаждений как объектов спутникового мониторинга (зависимость надземной фитомассы от возраста, а не только от сезонного развития, растянутость фенофаз, отсутствие сплошной листопадности и многоярусности, соседство с другими многочисленными вечнозелёными плодовыми культурами и т. п.). Поэтому методы оперативного площадного спутникового мониторинга цитрусовых насаждений до сих пор остаются очень слабо разработанными.

В настоящей статье проведён анализ возможности использования индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) Landsat-8 для оценки площадей цитрусовых насаждений на территории одного из районов Сирийской Арабской Республики. Индекс NDVI был предложен уже более 40 лет назад (Rouse et al., 1974), но до сих пор активно используется для мониторинга как естественной, так и сельскохозяйственной растительности (Лупян и др., 2014).

Объект и методы исследования

Объект исследования

Административно территория исследований относится к муниципалитету Руиме в районе Мазира в провинции Латакия, Сирия (*англ.* Latakia Province, Syria). Она вписывается в прямоугольник с географическими координатами 35° 29' 31,01" с. ш., 35° 54' 56,02" в. д.; 35° 32' 8,28" с. ш., 35° 58' 28,66" в. д. (*рис. 1*, см. с. 201). Площадь территории составляет 644 га. Это наклонная к морю преимущественно равнинная местность с щебнистыми суглинистыми почвами, возвышающаяся над уровнем моря примерно на 50–100 м.

Регион сильно освоен в сельскохозяйственном отношении и густо населён. Специализируется на выращивании цитрусовых культур и оливок. В меньшей степени распространены насаждения других плодовых культур, овощей, пшеницы и табака. Из цитрусовых преобладают насаждения разного возраста, таких культур как апельсин (*Citrus × sinensis*) (красный апельсин, апельсин «Джаффа», апельсин «Валенсия», апельсин «Абусура», апельсин «Гриффон»), лимон (*Citrus × limon*) (лимон «Мейера»), клементин (*Citrus × clementina*).



Рис. 1. Географическое положение территории исследований

Методы исследования

На первом этапе исследований на основе изображений Google Earth™ 2020–2022 гг. для региона исследований были визуально обрисованы границы всех участков с плодовыми культурами, которые надёжно выделяются по регулярно-пятнистому изображению отдельных деревьев (рис. 2).



Рис. 2. Пример изображения плодовых насаждений на снимке из Google Earth™ за июль 2022 г. 1 — однолетние культуры, 2 — плодовые насаждения, 3 — естественная растительность

Таким образом была построена маска полей с плодовыми насаждениями, среди которых находятся и поля с цитрусовыми культурами. Всего было обрисовано 876 полей.

На основе полевых обследований 2016 г. были выделены поля, для которых априори известно, какой вид цитрусовых культур на них возделывается. Для каждого вида цитрусовых на первом этапе было отобрано по пять полей, которые использовались в качестве репрезентативных при анализе сходства (см. ниже).

На следующем этапе был создан архив безоблачных скорректированных на влияние атмосферы спутниковых изображений Landsat-8 OLI (пространственное разрешение 30 м на местности, периодичность съёмки один раз в 16 дней, восемь каналов съёмки в видимой и инфракрасной области спектра) на территорию исследований. Всего было отобрано 12 изображений для 2016 г.

Затем были посчитаны значения вегетационного индекса NDVI для всех отобранных изображений по стандартной формуле:

$$NDVI = (Band\ 5 - Band\ 4) / (Band\ 5 + Band\ 4),$$

где Band 4, Band 5 — спектральная яркость в 4-м и 5-м каналах съёмки Landsat-8 OLI соответственно.

Для каждого поля с плодовыми культурами было рассчитано среднее арифметическое NDVI для каждого отобранного спутникового изображения. По ним были построены временные профили осреднённых для каждого поля значений NDVI.

После этого была сформирована дендрограмма сходства всех полей по осреднённым временным профилям NDVI. В качестве меры сходства использовалось корреляционное расстояние $1 - r$, где r — коэффициент корреляции Пирсона. На первой итерации в кластеры объединялись поля с корреляционным расстоянием менее 0,1. На следующих этапах в качестве правила объединения для двух кластеров использовался метод Уорда (Ward, 1963). Метод минимизирует сумму квадратов расстояний до центров кластеров. Сначала во всех уже имеющихся кластерах рассчитываются средние значения переменных. Затем вычисляются квадраты евклидовых расстояний от отдельных представителей каждого кластера до этого кластерного среднего значения. Эти расстояния суммируются. В один новый кластер объединяются те кластеры, при объединении которых получается наименьший прирост общей суммы расстояний (Котович, 2008). Таким образом метод Уорда приводит к образованию кластеров с минимальной внутриклассовой дисперсией. Коэффициент корреляции Пирсона показывает степень корреляции между двумя переменными. Степень значимости корреляции проверялась на уровне 5%-й вероятности. Кластеризация признавалась успешной, когда для каждого из 10 рассматриваемых классов цитрусовых все 5 полей с известной принадлежностью, согласно наземному обследованию, попадали в один кластер. Считалось, что все остальные образовавшиеся кластеры объединяют поля с нецитрусовыми культурами.

То, что поля были отнесены к одному кластеру, служило основанием для того, чтобы считать, что на всех них возделывается одна культура (или группа культур).

Результаты кластеризации были визуализированы в виде карты в географической информационной системе (ГИС). После этого случайным образом было выбрано 150 полей для полевой проверки точности детектирования цитрусовых культур без их разделения на виды. Из этой выборки после полевой проверки и с учётом её результатов, были выбраны 76 полей с разными видами цитрусовых для тестирования возможности распознавания отдельных видов цитрусовых. В этой выборке наименьшая доля полей каждого вида цитрусовых составляла 25 %, а максимальная достигала 70 % от числа полей с конкретным видом цитрусовых. Для всех этих 76 полей была проведена дополнительная полевая проверка видов возделываемых цитрусовых культур на полях, и на её основе была оценена точность полученной карты размещения цитрусовых насаждений на территории исследований. Оценка точности карты проведена на основе метода построения матрицы ошибок (Амейзен, 2023). Была оценена также ошибка при различных группировках классов цитрусовых в разное количество классов.

Статистический анализ данных проводился с использованием пакета IBM SPSS (*англ.* Statistical Package for the Social Sciences) Statistics 26.0. Векторизация границ полей, картогра-

фическая визуализация результатов и работа со спутниковыми изображениями велась с использованием ГИС ILWIS v.3.3 (англ. Integrated Land and Water Information System).

Результаты и обсуждение

На рис. 3 показаны рассчитанные кривые NDVI для каждого учитываемого вида цитрусовых насаждений. Необходимо отметить, что простое осреднение, без сомнения, привело к достаточно грубым результатам. Но для анализа было важно отразить лишь большие и явные различия между кривыми, которые выражаются в значительном изменении их формы и положении экстремумов, что с нашей точки зрения вполне удалось достичь таким методом.

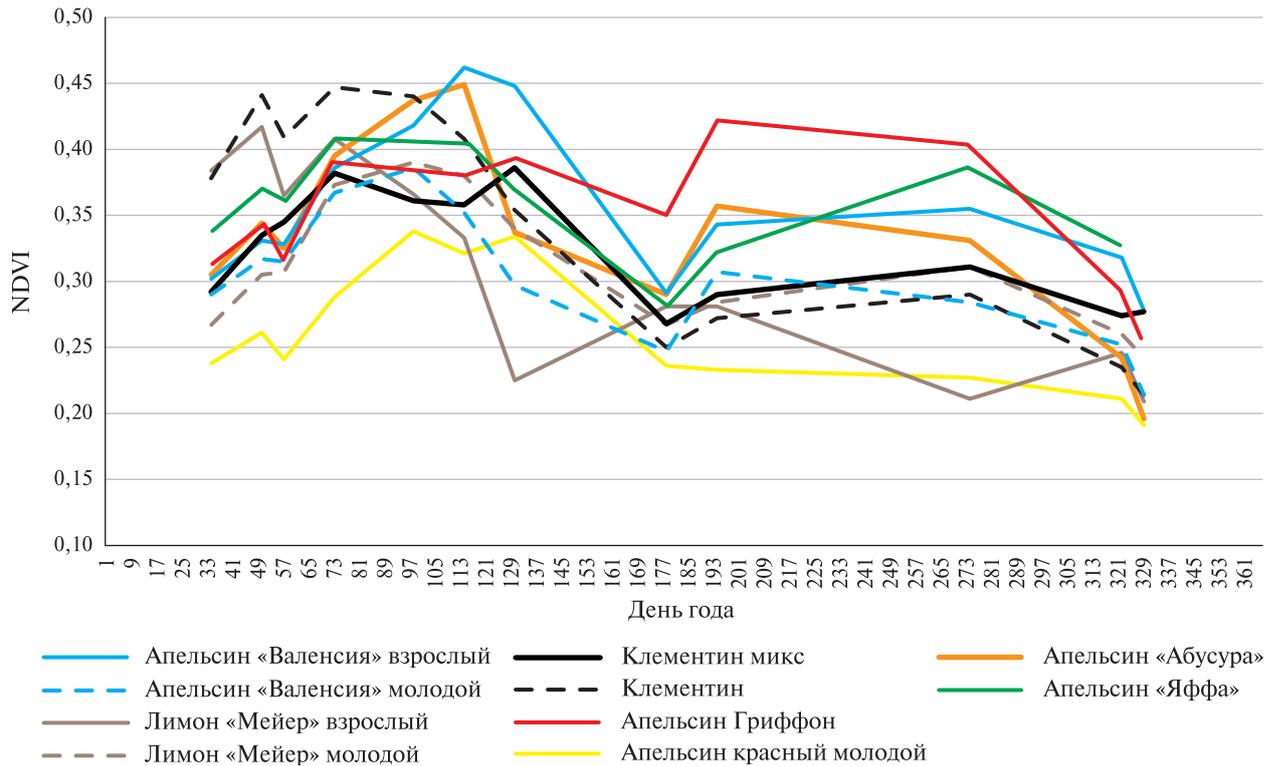


Рис. 3. Осреднённые временные профили NDVI для полей с разными видами цитрусовых

Как следует из рисунка, поля с разными сортами цитрусовых и с деревьями разного возраста характеризуются разными временными профилями NDVI. Графики NDVI отдельных видов цитрусовых характеризуются двухвершинностью, которая связана с периодом летнего иссушения. Но это иссушение по-разному сказывается на насаждениях разного типа и разного возраста, что проявляется для некоторых видов слабой выраженностью или полным отсутствием двухвершинности кривой (например, для апельсина красного). В отличие от подобных кривых, полученных для однолетних культур, для кривой NDVI массивов цитрусовых насаждений характерна растянутость сезона вегетации и слабая выраженность сезонного максимума. Кроме того, величина сезонного максимума для массивов цитрусовых насаждений почти в два раза ниже, чем для однолетних культур (Ronchetti et al., 2023) и чем для кривых NDVI массивов естественных лесов (Huang et al., 2020). Основной причиной этого, по-видимому, является разрежённость растительности в насаждениях цитрусовых и влияние на значения осреднённого NDVI почвенного фона (Prudnikova et al., 2019).

Значения NDVI для молодых насаждений, как правило, ниже, чем для взрослых, что вполне логично. Взрослые насаждения имеют больше надземной фитомассы и больше облиственны.

В результате кластерного анализа всех полей региона исследований по временному профилю NDVI было выделено 19 кластеров, в 10 из которых попали поля с известными видами цитрусовых культур.

То, что поля с одинаковыми видами цитрусовых попали в один кластер, позволяет предположить, что в данный кластер попали и другие поля с насаждениями такого же вида цитрусовых. На самом высоком уровне разделения (цитрусовые (без разделения на виды) и нецитрусовые древесные насаждения) оказалось, что массивы цитрусовых достаточно надёжно отделяются от массивов нецитрусовых древесных насаждений, что подтверждает результаты, полученные ранее другими авторами для другой территории (Ali, Imran, 2021). Общая точность разделения, рассчитанная по матрице ошибок, составила 95,33 %, что является достаточно хорошим результатом. Лишь небольшая часть полей с молодыми цитрусовыми была идентифицирована как нецитрусовые в связи с недостаточной развитостью кроны деревьев в этом возрасте. Подобные же результаты были ранее получены при изучении возможностей подсчёта количества деревьев в саду в рамках технологий точного земледелия (Santoro et al., 2013).

Разделение видов цитрусовых культур оказалось не столь успешным (табл. 1).

Таблица 1. Матрица ошибок при разделении видов цитрусовых культур по временному профилю NDVI

	Апельсин красный молодой	Лимон «Мейер» взрослый	Апельсин «Абусура»	Апельсин «Валенсия» молодой	Лимон «Мейер» молодой	Апельсин «Яффа»	Апельсин «Гриффон»	Клементин микс	Клементин	Апельсин «Валенсия» взрослый	
Апельсин красный молодой	2		1	1		1					5
Лимон «Мейер» взрослый		3	2	1							6
Апельсин «Абусура»	2		7						1		10
Апельсин «Валенсия» молодой			1	6		1					8
Лимон «Мейер» молодой			4		1	1		2	1		9
Апельсин «Яффа»	1	2		1		1					5
Апельсин «Гриффон»		1	1	1		1	2				6
Клементин микс	1	1	3	3				5			13
Клементин	2	1	2						5		10
Апельсин «Валенсия» взрослый										4	4
Всего	8	8	21	13	1	5	2	7	7	4	76
Точность производителя	0,25	0,38	0,33	0,46	1	0,2	1	0,71	0,71	1	
Точность пользователя	0,4	0,5	0,7	0,75	0,11	0,2	0,33	0,39	0,5	1	
Общая точность		0,47									

Оценка общей точности разделения составила 0,47. Причём лишь в одном случае (взрослые апельсины «Валенсия») все поля были отдетектированы правильно. Но этих полей было в выборке всего четыре.

Попытки группировки разных видов цитрусовых в несколько объединённых классов также не дали большого приращения в точности разделения. Не получилось достичь приращения точности и при группировке всех классов в два: молодые и взрослые насаждения. В этом случае общая точность разделения также составила 0,47. Самый хороший результат был получен при объединении всех цитрусовых насаждений в три класса без учёта возраста: апельсин, лимон и клементин. В этом случае общая точность возросла до 0,63 (табл. 2).

Таблица 2. Матрица ошибок при разделении групп видов цитрусовых культур по временному профилю NDVI

	Апельсин	Лимон	Клементин	Всего
Апельсин	34	3	1	38
Лимон	8	4	3	15
Клементин	11	2	10	23
	53	9	14	76
Точность производителя, пропуски	0,641509	0,444444	0,714	
Точность пользователя, переклассификация	0,894737	0,266667	0,435	
Общая точность				0,63157895

Результаты разделения на виды цитрусовых представлены в виде карты на *рис. 4*.

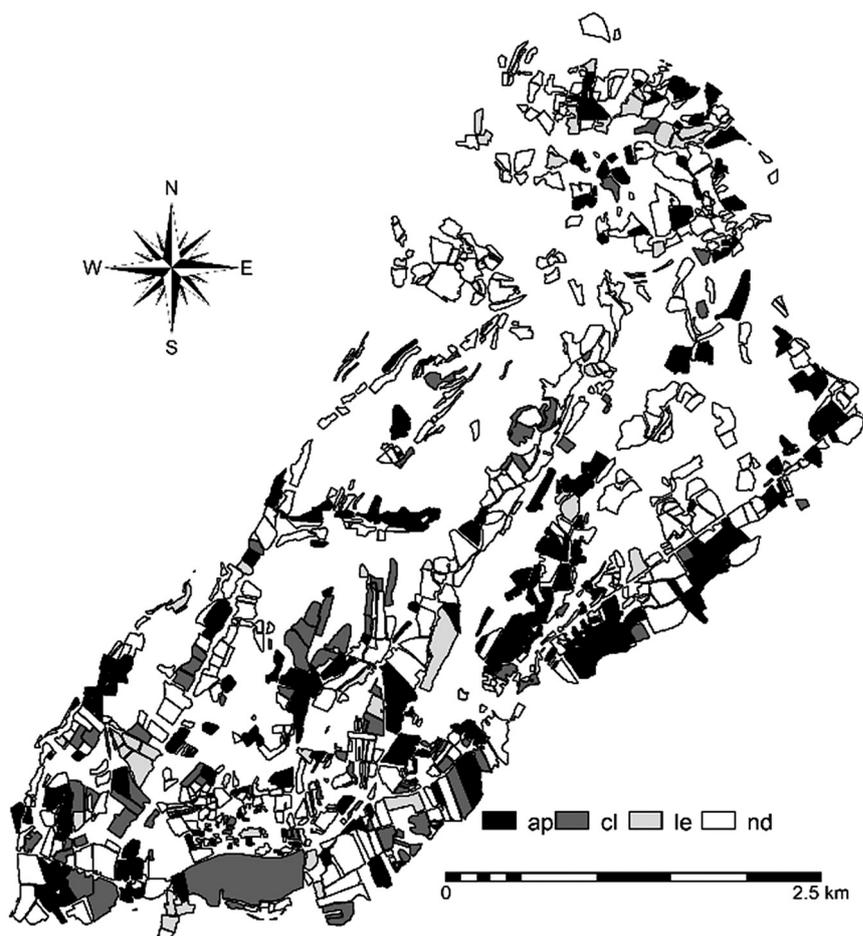


Рис. 4. Карта размещения полей с разными видами цитрусовых культур на территории исследований: ар — апельсины, кл — клементины, ле — лимоны, nd — нет данных или нет цитрусовых

Результаты работы позволяют получить информацию о пространственном размещении массивов цитрусовых культур в регионе исследований, что открывает возможности мониторинга их состояния на основе спутниковых данных и, в перспективе, ежегодной оценки их урожайности. В настоящее время такие сведения собираются в неполном виде и опросным методом, что не позволяет говорить об их надёжности.

Согласно построенной карте (рис. 4) площадь насаждений апельсина на территории исследований составляет 167,7 га, площадь насаждений клементина — 94,3 га и площадь под насаждениями лимона — 44,0 га. В настоящий момент нет статистики сопоставления с этими результатами, но подобная карта может служить отправной точкой для ежегодного мониторинга динамики площадей насаждений по единому подходу.

Заключение

Анализ сходства кривых индекса NDVI Landsat-8 OLI, осреднённых для массивов насаждений плодовых культур, позволил с достаточно хорошей точностью отделить массивы с насаждениями цитрусовых культур от массивов с древесными насаждениями на территории представленного тестового региона в Сирии, что может служить основанием для создания системы спутникового мониторинга их площади на территории страны.

Менее надёжно, но также достаточно уверенно среди массивов цитрусовых распознаются массивы апельсина, лимона и клементинов.

Разделение массивов отдельных видов цитрусовых насаждений по сортам и возрасту насаждений оказалось недостоверным.

Установленные закономерности могут служить основой для создания системы спутникового мониторинга площади цитрусовых насаждений и их видов на территории Сирии.

Литература

1. Амейзен Э. Создание приложений машинного обучения: от идеи к продукту / пер. с англ. СПб.: Питер, 2023. 272 с.
2. Котович Н. В. Алгоритмы кластеризации образов символов // Тр. Ин-та системного анализа РАН. 2008. Т. 38. С. 241 — 251.
3. Лупян Е. А., Барталев С. А., Савин И. Ю. Технологии спутникового мониторинга в сельском хозяйстве России // Аэрокосм. курьер. 2009. № 6. С. 47—49.
4. Рыбалко Е. А., Баранова Н. В., Лупян Е. А. и др. Организация работы с данными наземных и дистанционных наблюдений для решения задач дистанционного мониторинга виноградников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 79—92. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-79-92.
5. Толпин В. А., Рыбалко Е. А., Баранова Н. В. и др. Формирование информационной базы спутниковых и наземных данных для отработки методик дистанционного мониторинга виноградарства в Республике Крым // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 1. С. 101—110. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-101-110.
6. Ali A., Imran M. Remotely sensed real-time quantification of biophysical and biochemical traits of Citrus (*Citrus sinensis* L.) fruit orchards: A review // Scientia Horticulturae. 2021. V. 282. Article 110024. DOI: 10.1016/j.scienta.2021.110024.
7. Almohamed S., Darwish C. Review of the Syrian agriculture and future prospects for reconstruction // Jordan J. Agricultural Sciences. 2021. V. 15. No. 2. P. 35—49. DOI: 10.35516/jjas.v15i2.44.
8. Atzberger C., Zeug G., Defourny P. et al. Monitoring of forests through remote sensing: final report / Publications Office of the European Union. 2020. 149 p. DOI: 10.2779/175242.
9. Huang C., Zhang C., He Y. et al. Land cover mapping in cloud-prone tropical areas using Sentinel-2 data: Integrating spectral features with NDVI temporal dynamics // Remote Sensing. 2020. V. 12. Article 1163. DOI: 10.3390/rs12071163.
10. Galvañ A., Boughalleb-M'Hamdi N., Benfradj N. et al. Climate suitability of the Mediterranean Basin for citrus black spot disease (*Phyllosticta citricarpa*) based on a generic infection model // Scientific Reports. 2022. V. 12. Article 19876. DOI: 10.1038/s41598-022-22775-z.
11. Moussaid A., Fkihi S., Zennayi Y. Citrus orchards monitoring based on remote sensing and artificial intelligence techniques: A review of the literature // Proc. 2nd Intern. Conf. Advanced Technologies for Humanity (ICATH). 2021. P. 172—178. DOI: 10.5220/0010432001720178.
12. Prudnikova E., Savin I., Vindeker G. et al. Influence of soil background on spectral reflectance of winter wheat crop canopy // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 16. Article 1932. DOI: 10.3390/rs11161932.
13. Rehman S. U., Abbasi K., Qayyum A. et al., Comparative analysis of citrus fruits for nutraceutical properties // Food Science and Technology. 2020. V. 40. Suppl. 1. P. 153—157. DOI: 10.1590/fst.07519.

14. Ronchetti G., Manfron G., Weissteiner C. J. et al. Remote sensing crop group-specific indicators to support regional yield forecasting in Europe // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. V. 205. Article 107633. DOI: 10.1016/j.compag.2023.107633.
15. 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.
16. Salwa A., Cheikh D. Review of the syrian agriculture and future prospects for reconstruction // *Jordan J. Agricultural Sciences*. 2021. V. 15. No. 2. P. 35–49. DOI: 10.35516/jjas.v15i2.44.
17. Santoro F., Tarantino E., Figorito B. et al. A tree counting algorithm for precision agriculture tasks // *Intern. J. Digital Earth*. 2013. V. 6. No. 1. P. 94–102. DOI: 10.1080/17538947.2011.642902.
18. Savin I., Klyukina A., Dragavtseva I. About possibilities of apple trees flowering date detection based on MODIS data // *Proc. 20th Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM)*. 2020. V. 20. Article 2.2. P. 157–164. DOI: 10.5593/sgem2020/2.2/s10.019.
19. Usha K., Singh B. Potential applications of remote sensing in horticulture — A review // *Scientia Horticulturae*. 2013. V. 153. P. 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.01.008>.
20. Ward J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function // *J. American Statistical Association*. 1963. V. 58. No. 301. P. 236–244. DOI: 10.1080/01621459.1963.10500845.

Detection of citrus crop plantations in Syria using Landsat-8 OLI satellite data

S. Nasser¹, I. Yu. Savin²

¹ *RUDN University, Moscow 117198, Russia*

² *V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow 119017, Russia*
E-mail: 1042185120@rudn.ru, savin_iyu@esoil.ru

Citrus cultivation is of great economic and social importance for the Mediterranean countries. Citrus production in the region varies considerably from year to year due to meteorological conditions and the dynamics of the plantation area. This predetermines high importance of monitoring of their condition, which is currently not carried out at all or is carried out on the basis of a statistical survey method with a large error. The aim of the research was to analyse the possibilities of estimating citrus plantation areas of a test plot in Syria based on normalized difference vegetation index (NDVI) time series calculated from Landsat-8 OLI satellite data. Detection of citrus plantations was carried out using the NDVI curve similarity analysis method. Data from field surveys conducted in 2016 were used to assess the detection accuracy. It was found that the averaged NDVI curves of citrus plantations are reliably separated from those of other tree crops. The predominant species of citrus crops (orange, lemon, clementine) were also detected quite reliably. Separation of plantations within species by age and cultivar was not reliable. The proposed approach showed high potential for organizing a satellite-based monitoring system for citrus plantation acreage in Syria.

Keywords: NDVI, Landsat-8, satellite monitoring of vegetation, citrus, Syria, ILWIS

Accepted: 05.08.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-199-208

References

1. Ameisen E., *Building machine learning powered applications: Going from idea to product*, O'Reilly Media, Inc., 2020, 238 p.
2. Kotovich N. V., Algorithms for clustering of symbol's images, *Trudy ISA RAN*, 2008, Vol. 38, pp. 241–251 (in Russian).
3. Lupyan E. A., Bartalev S. A., Savin I. Yu., Satellite monitoring technologies in agriculture of Russia, *Aehro-kosmicheskii kur'er*, 2009, No. 6, pp. 47–49 (in Russian).

4. Rybalko E.A., Baranova N.V., Loupian E.A. et al., Management of ground data and remote observations data processing aimed at vineyards remote monitoring, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 79–92 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-79-92.
5. Tolpin V.A., Rybalko E.A., Baranova N.V. et al., Building a repository of satellite and ground data for the development of viticulture remote monitoring methods in the Republic of Crimea, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 1, pp. 101–110 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-101-110.
6. Ali A., Imran M., Remotely sensed real-time quantification of biophysical and biochemical traits of Citrus (*Citrus sinensis* L.) fruit orchards: A review, *Scientia Horticulturae*, 2021, Vol. 282, Article 110024, DOI: 10.1016/j.scienta.2021.110024.
7. Almohamed S., Darwish C., Review of the Syrian agriculture and future prospects for reconstruction, *Jordan J. Agricultural Sciences*, 2021, Vol. 15, No. 2, pp. 35–49, DOI: 10.35516/jjas.v15i2.44.
8. Atzberger C., Zeug G., Defourny P. et al., *Monitoring of forests through remote sensing: final report*, Publications Office of the European Union, 2020, 149 p., DOI: 10.2779/175242.
9. Huang C., Zhang C., He Y. et al., Land cover mapping in cloud-prone tropical areas using Sentinel-2 data: Integrating spectral features with NDVI temporal dynamics, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Article 1163, DOI: 10.3390/rs12071163.
10. Galvañ A., Boughalleb-M'Hamdi N., Benfradj N. et al., Climate suitability of the Mediterranean Basin for citrus black spot disease (*Phyllosticta citricarpa*) based on a generic infection model, *Scientific Reports*, 2022, Vol. 12, Article 19876, DOI: 10.1038/s41598-022-22775-z.
11. Moussaid A., Fkihi S., Zennayi Y., Citrus orchards monitoring based on remote sensing and artificial intelligence techniques: A review of the literature, *Proc. 2nd Intern. Conf. Advanced Technologies for Humanity (ICATH)*, 2021 pp. 172–178, DOI: 10.5220/0010432001720178.
12. Prudnikova E., Savin I., Vindeker G. et al., Influence of soil background on spectral reflectance of winter wheat crop canopy, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 16, Article 1932, DOI: 10.3390/rs11161932.
13. Rehman S. U., Abbasi K., Qayyum A. et al., Comparative analysis of citrus fruits for nutraceutical properties, *Food Science and Technology*, 2020, Vol. 40, Suppl. 1, pp. 153–157, DOI: 10.1590/fst.07519.
14. Ronchetti G., Manfron G., Weissteiner C.J. et al., Remote sensing crop group-specific indicators to support regional yield forecasting in Europe, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, Vol. 205, Article 107633, DOI: 10.1016/j.compag.2023.107633.
15. 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.
16. Salwa A., Cheikh D., Review of the syrian agriculture and future prospects for reconstruction, *Jordan J. Agricultural Sciences*, 2021, Vol. 15, No. 2, pp. 35–49, DOI: 10.35516/jjas.v15i2.44.
17. Santoro F., Tarantino E., Figorito B. et al., A tree counting algorithm for precision agriculture tasks, *Intern. J. Digital Earth*, 2013, Vol. 6, No. 1, pp. 94–102, DOI: 10.1080/17538947.2011.642902.
18. Savin I., Klyukina A., Dragavtseva I., About possibilities of apple trees flowering date detection based on MODIS data, *Proc. 20th Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConf. (SGEM)*, 2020, Vol. 20, Article 2.2, pp. 157–164, DOI: 10.5593/sgem2020/2.2/s10.019.
19. Usha K., Singh B., Potential applications of remote sensing in horticulture — A review, *Scientia Horticulturae*, 2013, Vol. 153, pp. 71–83, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.01.008>.
20. Ward J. H., Hierarchical grouping to optimize an objective function, *J. American Statistical Association*, 1963, Vol. 58, No. 301, pp. 236–244, DOI: 10.1080/01621459.1963.10500845.