

Возможности оценки состояния деревьев в яблонево́м саду на основе данных дистанционного зондирования

И. Ю. Савин^{1,2}, С. Н. Коновалов³, Е. Ю. Прудникова^{1,2},
Ю. И. Вернюк¹, П. Г. Грубина¹, С. Нассер²

¹ Почвенный институт им. В. В. Докучаева, Москва, 119017, Россия

² Институт экологии Российского университета дружбы народов
Москва, 117198, Россия

³ Всероссийский селекционно-технологический институт садоводства
и питомниководства, Москва, 115598, Россия
E-mail: savin_iyu@esoil.ru

Проведён анализ возможностей использования спутниковых данных Sentinel-2 и изображений, получаемых с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), для оперативной оценки состояния деревьев яблони. Исследования проведены на примере тестового участка возле пос. Михнево (Ступинский муниципалитет Московской обл.). Было проведено сопоставление сведений о состоянии деревьев яблони, полученных в поле, с параметрами, рассчитанными по данным дистанционного зондирования. Установлено, что на данный момент дистанционный мониторинг состояния деревьев в саду может осуществляться на качественном и полуколичественном уровне. Попытка построения количественных оценок не привела к положительному результату. Для построения количественных зависимостей параметров, получаемых по спутниковым данным и БПЛА, с параметрами состояния деревьев необходимо углублённое изучение динамики спектральной отражательной способности наземных объектов в саду в течение всего сезона вегетации. Кроме того, необходимо внедрение дополнительных параметров состояния деревьев, которые в настоящий момент не используются в практике плодоводства, но которые могут дать ключ к пониманию того, за счёт каких свойств растительности и плодовых деревьев формируется дистанционное изображение в разные периоды сезона вегетации.

Ключевые слова: Sentinel-2, беспилотный летательный аппарат, мониторинг растительности, цифровая модель местности, состояние деревьев, яблоневый сад

Одобрена к печати: 14.07.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-153-167

Введение

В России развитие плодоводства имеет приоритетное значение, особенно в южных и центральных регионах страны (Драгавцева и др., 2016). Для принятия своевременных управленческих решений в процессе возделывания плодовых культур, а также при сельскохозяйственном планировании и прогнозировании большое значение имеет точная и оперативная информация об их состоянии (Егоров и др., 2001).

Технологическое развитие и всё большее внедрение в сельское хозяйство цифровых технологий приводят к росту исследований в области использования данных дистанционного зондирования для оценки состояния и мониторинга растительности на сельскохозяйственных угодьях. Основное количество публикаций посвящено созданию систем оперативного спутникового мониторинга полевых однолетних культур, пастбищ и сенокосов на больших территориях на основе спутниковых данных высокого и среднего пространственного разрешения (Лупян и др., 2009; Савин, 2015; Atzberger, 2013; Corgne et al., 2016; Rembold et al., 2013). Также большое внимание уделяется разработке методов использования спутниковых данных на локальном уровне (Weiss et al., 2020), которые позволяют получать более точную информацию, но не с такой оперативностью, как это можно делать по данным среднего пространственного разрешения.

Современное техническое усовершенствование спутниковой орбитальной группировки позволяет получать в данный момент как минимум несколько изображений любой территории земной поверхности за сезон вегетации. Так, в настоящее время в таком режиме бесплатно доступны мультиспектральные спутниковые изображения с пространственным разрешением 10–20 м (https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2). Конечно, такое пространственное разрешение не позволяет осуществлять регулярный мониторинг каждого плодового дерева так, как это может быть сделано на основе данных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Но большим плюсом этой информации представляется её мультиспектральность, которая позволяет проводить оценку вегетации растительности на основе спектральных вегетационных индексов. Большой опыт подобных оценок накоплен как для естественной растительности, так и для посевов однолетних сельскохозяйственных культур. Многочисленные исследования показывают возможность оперативной оценки и мониторинга состояния растительности, предсказания урожайности культур, их повреждения болезнями и вредителями (Лупян и др., 2009; Савин, 2015; Atzberger, 2013; Corgne et al., 2016; Rembold et al., 2013). В области подобного мониторинга плодовых насаждений опыта до сих пор очень мало (Savin et al., 2020; Usha, Singh, 2013).

В последние годы также делаются попытки совместного использования для мониторинга полей как спутниковых данных, так и данных, получаемых с БПЛА (Maimaitijiang et al., 2020).

Дистанционный мониторинг многолетних плодовых культур существенно отличается от мониторинга посевов однолетних культур, а также от мониторинга естественной растительности. Плодовые культуры десятки лет развиваются на одном и том же участке. Количество их надземной фитомассы изменяется не только в сезонном цикле, но и в многолетнем. Очень часто участки многолетних плодовых культур совмещаются с посевами трав или однолетних культур в междурядьях. Они также значительно отличаются от естественной лесной растительности регулярностью в пространстве, отсутствием многоярусности и сильным воздействием человека на их состояние (состояние междурядий, обрезки, формирование крон и т. п.). В связи с этим дистанционные методы оперативного площадного мониторинга однолетних культур или лесов не могут быть без адаптации использованы для мониторинга плодовых насаждений. Как результат этого, научные публикации, посвящённые вопросам разработки методов оперативного спутникового мониторинга плодовых насаждений, до сих пор остаются малочисленными (Ampatzidis et al., 2019; Ok, Ozdarici-Ok, 2018; Zhang et al., 2021).

Обзор возможностей использования спутниковых данных для мониторинга тропических плодовых культур представлен в работе (Usha, Singh, 2013). Авторы обобщили примеры использования спутниковых данных разных типов и разного пространственного разрешения для распознавания плодовых культур, определения площади их плантаций, дат уборки плодов, оценки урожайности, повреждения болезнями и вредителями.

В публикации (Savin et al., 2020) приведены результаты анализа возможностей использования спутниковых данных MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) для детектирования фенофазы цветения яблони.

Отдельные исследования посвящены теме использования данных дистанционного зондирования для оценки потребности плодовых культур (в том числе и яблони) в орошении (Alvino, Marino, 2017; Casa et al., 2009; Mushtaq, Asima, 2014; Pujar et al., 2017).

Некоторые исследователи анализируют возможности оперативного мониторинга виноградников на основе спутниковых данных (Рыбалко и др., 2016; Толпин и др., 2017).

Несмотря на наличие подобных публикаций, возможности использования спутниковых данных для оперативного площадного мониторинга плодовых культур до сих пор недостаточно изучены.

Цель исследования — анализ возможностей совместного применения спутниковых данных и изображений, полученных с БПЛА, для оперативной оценки состояния деревьев яблони, а именно: идентификации отдельных деревьев, оценки проективного покрытия крон деревьев, анализа урожайности, оценки показателей прироста веток и высоты деревьев.

Объект и методы

Работу выполняли на тестовом участке, расположенном на землях Всероссийского селекционно-технологического института садоводства и питомниководства возле пос. Михнево (Ступинский муниципалитет Московской обл., координаты центра участка: $55^{\circ}7,339'$ с. ш., $38^{\circ}0,729'$ в. д.). Площадь тестового участка составляет около 2,5 га. Участок является частью яблоневого сада, заложенного 11 лет назад. Преобладают деревья яблони (*Malus sylvestris* (L.) Mill.) сорта Имрус на карликовом подвое. Это зимний, иммунный к парше (с геном Vf) сорт яблони Всероссийского научно-исследовательского института селекции плодовых культур (Антоновка обыкновенная \times OR18T13). Высота деревьев не превышает 2–3 м. Участок характеризуется волнистым рельефом с перепадом высот до 3–4 м. С изменением абсолютной высоты меняются и почвы на участке от дерново-подзолистых тяжелосуглинистых в наиболее возвышенной части до луговых в краевых понижениях участка. Всё это предопределяет во многом и состояние деревьев яблони на участке. Междурядья представляют собой травянистую растительность.

Обследования участка проведены в конце октября 2021 г. На деревьях отсутствовали плоды и частично или полностью была сброшена листва. Молодая поросль на отдельных пеньках яблонь имела зелёные листья. Оставшаяся на других деревьях яблони листва имела пёструю окраску (от зелёных до жёлтых и красных тонов).

Для детектирования состояния плодовых деревьев использовался подход, представленный на (рис. 1).

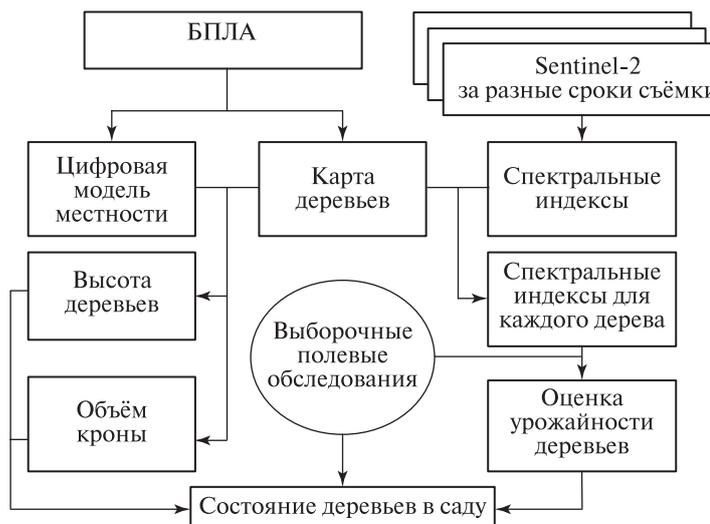


Рис. 1. Последовательность анализа данных дистанционного зондирования

Территория исследований была отснята с использованием БПЛА. Также были собраны все спутниковые изображения Sentinel-2, полученные на территорию исследований в течение 2021 г. По данным БПЛА была построена карта отдельных деревьев на тестовом участке сада, а также цифровая модель местности. На основе геоинформационного анализа цифровой модели местности построена карта высоты отдельных деревьев. Затем в ГИС (геоинформационные системы) по изображению, полученному с БПЛА, определена площадь проективного покрытия кроны каждого дерева. После этого, умножая площадь проективного покрытия кроны на высоту, получали величину условного объёма кроны каждого дерева.

Одновременно по спутниковым данным Sentinel-2 были рассчитаны величины отражения электромагнитных волн в каждом канале съёмки спутника, а также наиболее распространённые спектральные вегетационные индексы. Эти данные были агрегированы для кроны каждого дерева.

Также проведено выборочное полевое обследование деревьев. Определялась их урожайность (подсчёт количества плодов на каждом дереве и общая масса всех плодов на дереве), прирост веток (линейкой в 5-кратной повторности), оценивалась их высота (метром) и общее состояние (нормальное развитие, повреждение кроны, спиленное дерево с побегами).

После этого была сделана попытка установления зависимости состояния деревьев от параметров, полученных по спутниковым данным и данным с БПЛА, на основе регрессионного анализа.

Таблица 1. Спутниковые параметры, использованные для анализа

№	Спутниковый параметр	Формула	Ссылка
1	b1 (0,443), 60 м	Значение яркости в канале съёмки Sentinel (указана центральная длина волны и пространственное разрешение для каждого канала)	https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2
2	b2 (0,490), 10 м		
3	b3 (0,560), 10 м		
4	b4 (0,665), 10 м		
5	b5 (0,705), 20 м		
6	b6 (0,740), 20 м		
7	b7 (0,783), 20 м		
8	b8 (0,842), 10 м		
9	b8A (0,865), 20 м		
10	b9 (0,945), 60 м		
11	b11 (1,610), 60 м		
12	b12 (2,190), 60 м		
13	BWDRVI	$(0,1 \times B8 - B2) / (0,10 \times B8 + B2)$	(Hancock, Dougherty, 2007)
14	CCCI	$((B8 - B5) / (B8 + B5)) / ((B8 - B4) / (B8 + B4))$	(Calera et al., 2017)
15	CI	$B4 - B2 / B4$	(Escadafal et al., 1994)
16	CVI	$B8 \times B4 / (B3^2)$	(Vincini et al., 2008)
17	DVI	$2,4 \times B8 - B4$	(Escadafal, Huete, 1991)
18	NDVI	$(B8 - B4) / (B8 + B4)$	(Escadafal et al., 1994)
19	EVI	$2,5 \times ((B8 - B4) / ((B8 + 6 \times B4) - (7,5 \times B1) + 1))$	(Dorigo et al., 2007)
20	GDVI	$B8 - B3$	(Tucker et al., 1979)
21	GLI	$(2,0 \times B3 - B4 - B2) / (2,0 \times B3 + B4 + B2)$	(Gobron et al., 2000)
22	GOSAVI	$(B8 - B3) / (B8 + B3 + 0,16)$	(Capolupo et al., 2020)
23	RVI	$B8 / B4$	(Broge, Leblanc, 2001)
24	GRVI	$B8 / B3$	(Gitelson et al., 2002)
25	GVM1	$((B8 + 0,1) - (B12 + 0,02)) / ((B8 + 0,1) + (B12 + 0,02))$	(Ceccato et al., 2002; Glenn et al., 2010)
26	NDRE	$(B8 - B5) / (B8 + B5)$	(Barnes et al., 2000)
27	NGRDI	$(B3 - B4) / (B3 + B4)$	(Gitelson et al., 2002)
28	TDI	$B12 / B8$	(Pinder, McLeod, 1999)
29	RGR	$B4 / B3$	(Gamon, Surfus, 1999)
30	SLAVI	$B8 / (B4 + B12)$	(Lymburner et al., 2000)
31	CIGREEN	$(B8 / B3) - 1$	(Gitelson et al., 2003)
32	CIREDEGE	$(B8 - B5) - 1$	(Gitelson et al., 2003)
33	RI	$(B4 - B3) / (B4 + B3)$	(Escadafal, Huete, 1991)
34	GARI	$B8 - (B3 - (B2 - B4)) / B8 - (B3 + (B2 - B4))$	(Gitelson et al., 1996)

Примечание: *bn* – каналы съёмки Sentinel-2

Обследуемая территория отснята с использованием БПЛА DJI Matrice 200 с установленной на гиросtabilизируемой подвеске камерой. Для предполётной настройки коптера и камеры использовали приложение DJI GO 4, для автоматизированного построения маршрута полёта и осуществления аэрофотосъёмки — приложение DroneDeploy. Обработку данных аэрофотосъёмки проводили с использованием программного обеспечения Agisoft Metashape Professional (https://www.geoscan.aero/ru/software/agisoft/metashape_pro).

Съёмку тестового участка проводили 19 октября 2021 г. с высоты 100 м. В результате получены RGB-изображение (R — *англ.* red, красный; G — *англ.* green, зелёный; B — *англ.* blue, синий) тестового участка и цифровая модель местности с пространственным разрешением 3 см.

Для анализа также были отобраны четыре безоблачных изображения, полученных со спутника Sentinel-2 (уровень обработки 2A) в 12 каналах съёмки в следующие даты: 11 мая 2021 г., 18 июня 2021 г., 13 июля 2021 г., 8 октября 2021 г. Использовались изображения, прошедшие атмосферную и радиометрическую коррекцию. В качестве спутниковых параметров в анализ включались величины отражения в отдельных каналах съёмки, а также наиболее широко используемые спектральные вегетационные индексы (*табл. 1*).

Все спутниковые данные были приведены к пространственному разрешению данных, полученных с использованием БПЛА, путём прямого перепроецирования.

Для определения высоты деревьев по цифровой модели местности (ЦММ), полученной с использованием БПЛА, использовался следующий подход. На первом этапе исходная ЦММ с размером пикселя 10 см была сглажена широким минимальным фильтром, размер окна которого составил 10×10 м на местности. После этого полученная карта была ещё раз сглажена осредняющим фильтром размером 5×5 пикселей с целью элиминировать влияние шумов, создаваемых неоднородной высотой травянистой растительности между рядами. Затем была вычислена разница между исходной ЦММ и картой, полученной в результате фильтрации. По сути, эта разница представляет собой относительную высоту объектов над поверхностью с минимальной относительной высотой и может быть условно интерпретирована как высота наземных объектов.

Дешифрирование проективного покрытия крон деревьев осуществлялось по RGB-изображениям, полученным по данным съёмки с БПЛА, визуально, путём ручной отрисовки в ГИС ILWIS 3.3 выделов по изображению на экране монитора.

В полевых условиях был проведён полный учёт урожая плодов, а также определены показатели прироста яблони с представительных деревьев на тестовом участке и проведён учёт прироста яблони. Всего была собрана информация по урожайности для 123 деревьев (масса яблок с одного растения, количество яблок с одного растения, средняя масса одного яблока) и по приросту для 182 деревьев (сумма длины побегов, количество побегов на одном растении, средняя длина одного побега).

Осуществлён регрессионный анализ между дистанционно определёнными параметрами и урожайностью плодов на дереве и показателями прироста. Для этого сначала рассчитывался коэффициент корреляции между показателями, измеренными в поле, и параметрами, рассчитанными по спутниковым данным и по ЦММ. Затем для каждого показателя проводилось регрессионное моделирование. В анализ включались только те параметры, коэффициент корреляции между которыми не превышал 0,6. Отбор проводился в программе R с помощью пакета *usdm* и функции *vifcor* (<https://cran.r-project.org/web/packages/usdm/index.html>). Для моделирования использовалась функция *lm* пакета *stats* программы R. Предварительно до моделирования данные были разделены на обучающую и тестовую выборки в соотношении 70/30. Основными параметрами для оценки качества моделей по результатам валидации были следующие: коэффициент детерминации (R^2 val), среднеквадратическая ошибка предсказания (RMSEval — *англ.* root mean square error) и отношение межквартильного размаха (IQR — *англ.* interquartile range) к среднеквадратической ошибке предсказания (RPIQ — *англ.* ratio of performance to interquartile range).

Пространственное моделирование и анализ изображений проводили с использованием пакета прикладных программ ILWIS 3.3 (<https://www.itc.nl/ilwis/>).

Результаты

Дешифрирование крон деревьев по данным, полученным с БПЛА, показало, что на тестовом участке изначально было высажено 2340 деревьев. Из них на момент обследования сохранилось во взрослом состоянии (без учёта пеньков и посаженных позднее деревьев) 1991 дерево.

На *рис. 2* представлены результаты подсчёта проективного покрытия кроны каждого дерева на момент съёмки с БПЛА. Пространственное распределение деревьев разной высоты показано на *рис. 3*. Обобщённая характеристика на всём тестовом участке представлена в *табл. 2*.



Рис. 2. Площадь проективного покрытия деревьев тестового участка (м²)

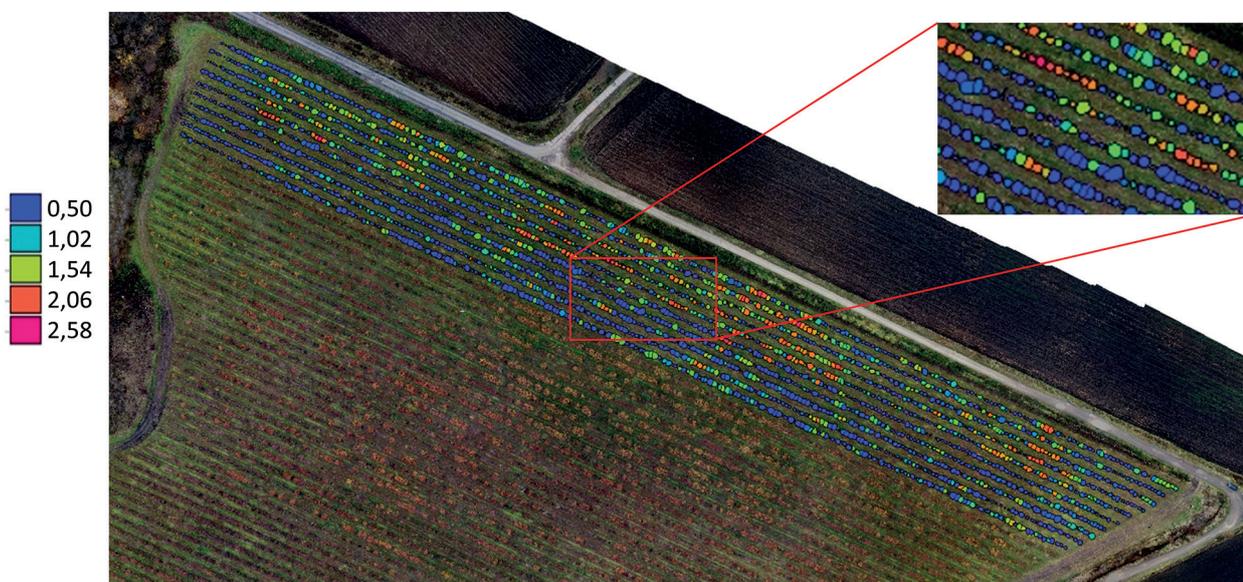


Рис. 3. Условная высота деревьев тестового участка (м)

Таблица 2. Результаты оценки высоты деревьев и проективного покрытия кроны по данным БПЛА

Параметр	Среднее	Максимум	Минимум	Стандартное отклонение
Проективное покрытие кроны, м ²	1,81	10,29	0,32	1,95
Высота деревьев, м	0,81	2,58	0,52	0,48

В результате условный объём кроны деревьев (рис. 4) также значительно варьирует на участке. Чётко выделяются минимальными значениями объёма кроны дерева краевых частей рядов. Средний условный объём кроны составляет $2,64 \text{ м}^3$ при максимальном значении $14,7 \text{ м}^3$.

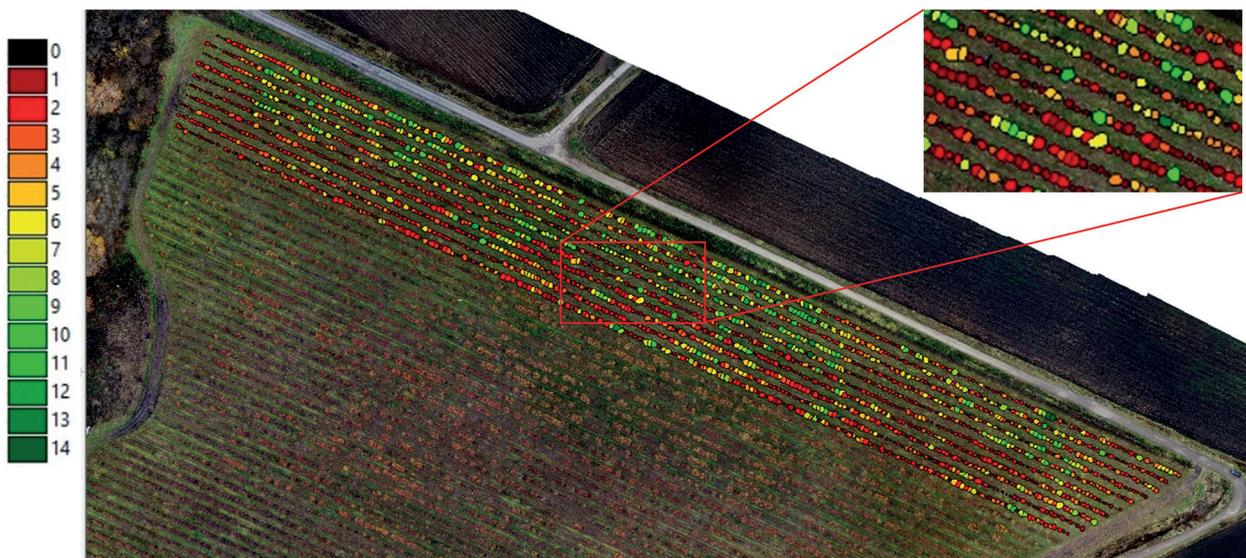


Рис. 4. Условный относительный объём кроны деревьев тестового участка. Показаны классы: красный — самый маленький объём кроны; тёмно-зелёный — самый большой объём кроны

Основные индикаторы состояния деревьев, полученные по спутниковым данным, были рассчитаны для каждого дерева. Примеры их визуализации представлены на рис. 5.

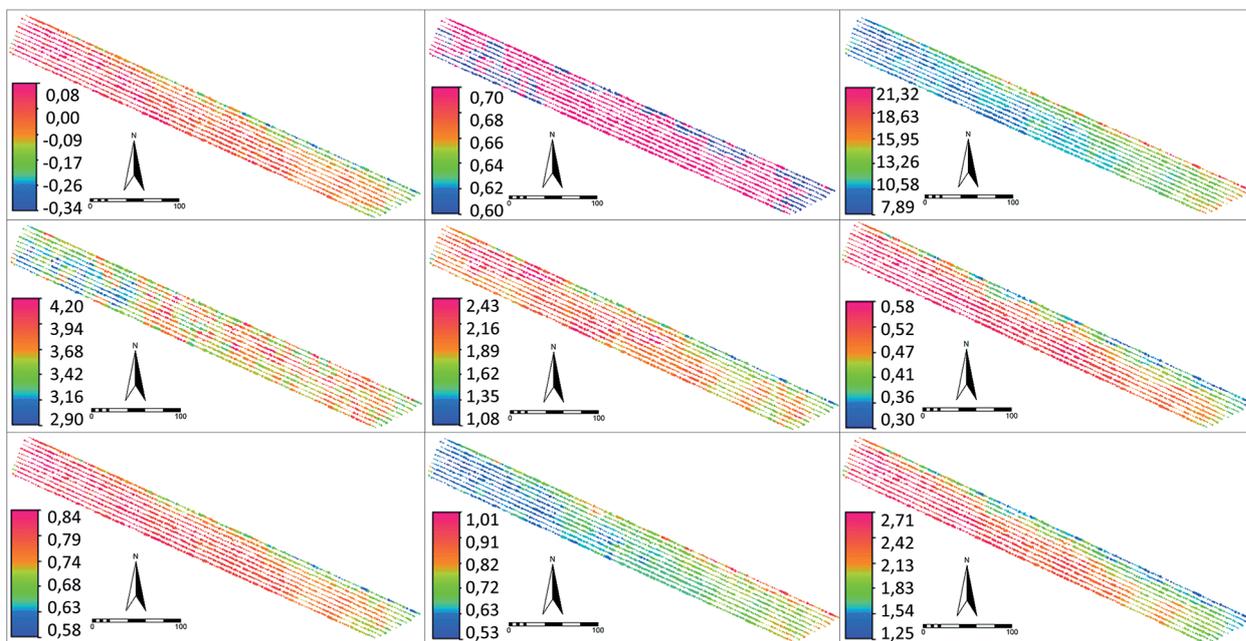


Рис. 5. Примеры индикаторов состояния деревьев (вегетационные индексы), полученные по спутниковым данным Sentinel-2 в июле 2021 г.

Корреляционный анализ между параметрами, измеренными в поле, и спутниковыми показателями выявил, что максимальный коэффициент корреляции не превышает 0,5 по абсолютному значению. Наименьшие значения коэффициента отмечаются для таких

показателей, как средняя длина побега и площадь проективного покрытия кроны дерева, наибольшие — для количества побегов и плодов на дереве (рис. 6). По результатам моделирования и валидации моделей лучшая модель на основе спутниковых данных была получена для количества плодов: коэффициент детерминации по результатам валидации составил 0,37, среднеквадратическая ошибка предсказания по результатам валидации — 89,23, RPIQ — 1,8. Для остальных параметров коэффициент детерминации по результатам валидации не превышал 0,12.

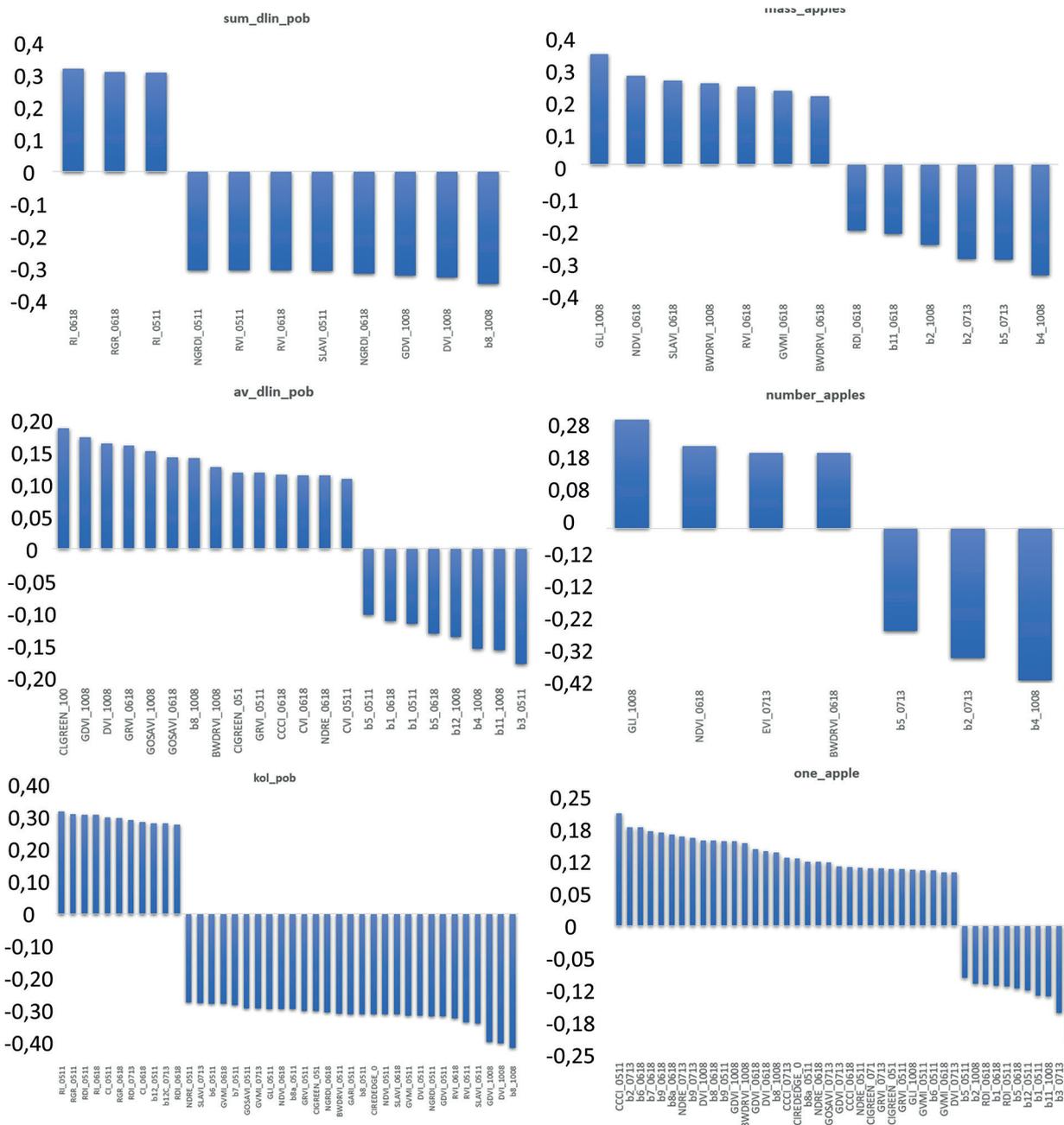


Рис. 6. Корреляция между показателями, измеренными в поле, и параметрами, рассчитанными по спутниковым данным. Полевые данные: one_apple — масса одного плода; number_apples — количество плодов на дереве; mass_apples — масса всех плодов на дереве; kol_pob — количество побегов на дереве; av_dlin_pob — средняя длина побегов; sum_dlin_pob — сумма длин всех побегов на дереве. По оси X показаны спутниковые индикаторы, с которыми установлена наиболее высокая корреляция (наименование параметра соответствует табл. 1, после нижнего подчёркивания указана дата получения изображения в формате ммдд)

Обсуждение

Анализ полученных результатов показал, что данные дистанционного зондирования могут быть использованы для мониторинга общего состояния плодовых деревьев в саду. Причём наиболее перспективным представляется совместное использование данных с БПЛА и спутниковых данных высокого пространственного разрешения, что подтвердило аналогичные выводы, полученные другими авторами для других типов плодовых насаждений (Maimaitijiang et al., 2020; Usha, Singh, 2013).

Использование результатов съёмки с БПЛА на обычную фотокамеру позволило провести инвентаризацию практически всех деревьев на ключевом участке и сформировать ГИС-базу данных отдельных деревьев.

На основе съёмки с БПЛА интерактивно были отдешифрированы кроны всех деревьев и определена величина относительного проективного покрытия кроны.

Другим важным продуктом съёмки с БПЛА стала карта относительной высоты деревьев. На основе этой карты и карты проективного покрытия кроны была рассчитана карта относительного объёма кроны деревьев.

Необходимо отметить, что данные параметры состояния деревьев (высота, площадь кроны и её объём) вряд ли будут точно соответствовать параметрам, измеренным в полевых условиях по стандартным методикам (Гегечкори и др., 2008). Это связано с тем, что стандартные методики базируются на учёте отдельных, иногда очень тонких веток. Например, высота дерева в полевых условиях определяется до кончика самой высокой ветви. При определении проективного покрытия кроны также принимаются во внимание (игнорируются) отдельно выступающие из кроны ветви. При использовании данных БПЛА поступить точно так же не представляется возможным. На данных съёмки с БПЛА многие тонкие ветви (тоньше 3 см) не изображаются (из-за генерализации или раскачивания ветвей ветром), а при определении проективного покрытия кроны дерева учитываются все облиственные ветви без игнорирования выступающих из кроны. Похожие выводы были сделаны ранее для оливковых деревьев и цитрусовых (Panda et al., 2010; Zhang et al., 2016).

Именно поэтому, чтобы подчеркнуть данное отличие от измерения параметров по стандартным методикам, мы используем термины «относительная высота» и «относительное проективное покрытие». Также при перемножении этих относительных параметров получается достаточно абстрактный показатель «относительного объёма кроны дерева», который, конечно же, не отражает реальный объём, а выступает лишь неким приближением, но, с нашей точки зрения, может быть использован для качественной и более точной, чем при традиционных подходах, оценке реального объёма кроны дерева. Таким методом проективное покрытие кроны может быть определено с погрешностью в несколько квадратных сантиметров, что сделать традиционными методами не представляется возможным.

Таким образом, получаемые по данным БПЛА сведения о высоте деревьев заведомо занижены (из-за невозможности учёта самых высоких тонких веток), а данные об объёме кроны завышены, так как не учитывают реальную (не цилиндрическую) вертикальную форму кроны. Так, сопряжённый выборочный анализ полевых измерений и оценки по фотографиям высоты 26 деревьев и результатов высоты, определённой по данным БПЛА, показывает, что последние занижают оценки для территории тестового участка в среднем на 16,8 % (с размахом от 8,4 до 29,8 %). Теоретически самые тонкие ветви деревьев могут быть отдешифрированы по данным БПЛА визуально, а не автоматизированно. Но в этом случае теряются такие важные преимущества дистанционного мониторинга, как оперативность и технологичность (воспроизводимость результатов). При этом необходимо учитывать, что подобные задачи (определение высоты деревьев) чаще решаются с использованием лидаров, установленных на БПЛА. Погрешность определения высоты деревьев в этом случае составляет 5–10 % (Jimenez-Brenes et al., 2017; Torres-Sanchez et al., 2015). Но оборудование для лидарной съёмки в разы превышает стоимость использованной нами камеры.

Несмотря на подобную специфику, на основе данных параметров возможно организовать регулярный дистанционный мониторинг состояния деревьев в яблоневом саду. Результаты могут быть отражены как в виде карт этих параметров, так и в виде оценочных классов.

Созданная инвентаризационная ГИС деревьев сада также может служить в качестве основы для спутникового мониторинга состояния деревьев.

Проведённые нами исследования показали, что использование спутниковых вегетационных индексов, без сомнения, позволяет получать информацию о пространственных неоднородностях состояния растительности в яблоневом саду. Причём неоднородности на изображениях разного срока съёмки оказались разными, что, скорее всего, связано с сезонным развитием растительности в саду.

Но нам не удалось построить статистически достоверные регрессионные модели между использованными спектральными индексами и измеренными в полевых условиях параметрами состояния деревьев (см. *рис. 6*). По-видимому, это связано с тем, что на формирование спутникового изображения оказывают влияние многие другие параметры состояния плодовых деревьев, а не только те, которые определялись при полевых обследованиях и которые используются традиционно. Кроме того, большое влияние на специфику спутникового изображения может оказывать состояние травянистой растительности в междурядьях, а также почвенный фон (Prudnikova et al., 2019).

Выводы

Проведённые исследования показали, что данные дистанционного зондирования могут служить основой для построения оперативной системы мониторинга плодовых деревьев с точностью, потенциально удовлетворяющей требования специалистов по плодоводству. Наиболее оптимальным выглядит совместное использование данных, получаемых с БПЛА, и спутниковых мультиспектральных изображений.

На данный момент дистанционный мониторинг состояния деревьев в саду может осуществляться на качественном и полуколичественном уровне. Попытка построения количественных оценок не привела к положительному результату. Для построения количественных зависимостей параметров, получаемых по спутниковым данным и БПЛА, с параметрами состояния деревьев необходимо углублённое изучение динамики спектральной отражательной способности наземных объектов в саду в течение всего сезона вегетации. Кроме того, требуется внедрение дополнительных параметров состояния деревьев, которые в настоящий момент не используются в практике плодоводства, но которые могут дать ключ к пониманию того, за счёт каких свойств растительности и плодовых деревьев формируется дистанционное изображение в разные периоды сезона вегетации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российской Федерации (соглашение с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2020-805 от 2 октября 2020 г.)

Литература

1. Гегечкори Б. С., Кладь А. А., Дорошенко Т. Н. Практикум по плодоводству. Краснодар: КГАУ, 2008. 345 с.
2. Драгавцева И. А., Савин И. Ю., Загиров Н. Г., Казиев М. Р. А., Ахматова З. П., Моренец А. С., Батталов С. Б. Ресурсный потенциал земель Северного Кавказа для плодоводства. Краснодар, Махачкала: ДагНИИСХ, 2016. 138 с.
3. Егоров Е. А., Фисенко А. Н., Дорошенко Т. Н., Хвостова И. В., Теренько Г. Н., Попова В. П., Смольякова В. М., Сторчевая Е. М., Черкезова С. Р., Драгавцева И. А., Артюх С. Н., Можар Н. В., Алехина Е. М., Заремук Р. Ш., Причко Т. Г., Лопатина Л. М., Савин И. Ю., Святкина О. А. Системообразующие экологические факторы и критерии зон устойчивого развития плодоводства на Северном Кавказе. Краснодар: СКЗНИИСиВ, 2001. 284 с.

4. *Лупян Е. А., Барталев С. А., Савин И. Ю.* Технологии спутникового мониторинга в сельском хозяйстве России // *Аэрокосмический курьер*. 2009. № 6. С. 47–49.
5. *Рыбалко Е. А., Баранова Н. В., Лупян Е. А., Толпин В. А., Кашицкий А. В., Уваров И. А., Крашенинникова Ю. С., Иванченко В. И.* 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.
6. *Савин И. Ю.* Современный спутниковый мониторинг почв и посевов: достижения и проблемы // *Применение средств дистанционного зондирования земли в сельском хозяйстве*. М.: Почвенный институт им. В. В. Докучаева, 2015. С. 29–32.
7. *Толпин В. А., Рыбалко Е. А., Баранова Н. В., Кашицкий А. В., Лупян Е. А., Уваров И. А.* 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.
8. *Alvino A., Marino S.* Remote Sensing for Irrigation of Horticultural Crops // *Horticulturae*. 2017. V. 3. Art. No. 40. 36 p. <https://doi.org/10.3390/horticulturae3020040>.
9. *Ampatzidis Y., Partel V., Meyering B., Albrecht U.* Citrus rootstock evaluation utilizing UAV-based remote sensing and artificial intelligence // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. V. 164. 9 p. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104900>.
10. *Atzberger C.* Advances in remote sensing of agriculture: context description, existing operational monitoring systems and major information needs // *Remote Sensing*. 2013. V. 5. P. 949–981. DOI: 10.3390/rs5020949.
11. *Barnes E., Clarke T. R., Richards S. E., Colaizzi P., Haberland J., Kostrzewski M., Waller P., Choi C., Riley E., Thompson T. L.* Coincident detection of crop water stress, nitrogen status, and canopy density using ground based multispectral data // 5th Intern. Conf. Precision Agriculture. Bloomington. 2000. P. 1–15.
12. *Broge N. H., Leblanc E.* Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density // *Remote Sensing of Environment*. 2000. No. 76. P. 156–172.
13. *Calera A., Campos I., Osann A., D’Urso G., Menenti M.* Remote Sensing for Crop Management: from ET Modelling to Services for the End Users // *Sensors*. 2017. No. 17(5). Art. No. 1104. 25 p. <https://doi.org/10.3390/s17051104>.
14. *Capolupo A., Monterisi C., Tarantino E.* Landsat Images Classification Algorithm (LICA) to Automatically Extract Land Cover Information in Google Earth Engine Environment // *Remote Sensing*. 2020. No. 12. Art. No. 1201. 28 p. <https://doi.org/10.3390/rs12071201>.
15. *Casa R., Rossi M., Sappa G., Trotta A.* Assessing Crop Water Demand by Remote Sensing and GIS for the Pontina Plain, Central Italy // *Water Resources Management*. 2009. V. 23. P. 1685–1712. DOI: 10.1007/s11269-008-9347-4.
16. *Ceccato P., Gobron N., Flasse S., Pinty B., Tarantola S.* Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Pt. 1: Theoretical approach // *Remote Sensing of Environment*. 2002. No. 82. P. 188–197. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00037-8.
17. *Corgne S., Hubert-Moy L., Betbeder J.* Monitoring of Agricultural Landscapes Using Remote Sensing Data // *Land Surface Remote Sensing in Agriculture and Forest*. 2016. P. 221–247.
18. *Dorigo W. A., Zurita-Milla R., Wit A., Brazile J., Singh R., Schaepman M. E.* A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2007. No. 9. P. 165–193. DOI: 10.1016/j.jag.2006.05.003.
19. *Escadafal R., Huete A.* Improvement in remote sensing of low vegetation cover in arid regions by correcting vegetation indices for soil “noise” // *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences. Série 2*. 1991. No. 312. P. 1385–1391.
20. *Escadafal R., Belghit A., Ben-Moussa A.* Indices spectraux pour la télédétection de la dégradation des milieux naturels en Tunisie aride // *Actes du 6eme Symp. Intern. sur les mesures physiques et signatures en télédétection / réd de G. Guyot*. 17–24 Janvier, Val d’Isère, France, 1994. No. 17. P. 253–259.
21. *Gamon J. A., Surfus J. S.* Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer // *New Phytologist*. 1999. No. 143. P. 105–117. DOI: 10.1046/j.1469-8137.1999.00424.x.
22. *Gitelson A. A., Kaufman Y. J., Merzlyak M. N.* Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS // *Remote Sensing of Environment*. 1996. No. 58. P. 289–298. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00072-7.
23. *Gitelson A., Kaufman Y., Stark R., Rundquist D.* Novel Algorithms for Remote Estimation of Vegetation Fraction // *Remote Sensing of Environment*. 2002. No. 80. P. 76–87.
24. *Gitelson A. A., Viña A., Arkebauer T. J., Rundquist D. C., Keydan G., Leavitt B.* Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies // *Geophysical Research*. 2003. V. 30. Iss. 5. Art. No. 1248. 4 p. <https://doi.org/10.1029/2002GL016450>.

25. Glenn E. P., Nagler P. L., Huete A. R. Vegetation Index Methods for Estimating Evapotranspiration by Remote Sensing // *Surveys Geophysics*. 2010. No. 31. P. 531–555. DOI: 10.1007/s10712-010-9102-2.
26. Gobron N., Pinty B., Verstraete M. M., Widlowski J. Advanced vegetation indices optimized for up-coming sensors: Design, performance, and applications // *Geoscience and Remote Sensing*. 2000. No. 38. P. 2489–2505.
27. Hancock D. W., Dougherty C. T. Relationships between blue- and red-based vegetation indices and leaf area and yield of alfalfa // *Crop Science*. 2007. No. 47. P. 2547–2556. DOI: 10.2135/cropsci2007.01.0031.
28. Jimenez-Brenes F. M., Lopez-Granados F., de Castro A. I., Torres-Sanchez J., Serrano N., Pena J. M. Quantifying pruning impacts on olive tree architecture and annual canopy growth by using UAV-based 3D modelling // *Plant Methods*. 2017. V. 13. Art. No. 55. 15 p. DOI: 10.1186/s13007-017-0205-3.
29. Lymburner L., Beggs P. J., Jacobson C. R. Estimation of canopy-average surface-specific leaf area using Landsat TM data // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2000. No. 66. P. 183–191.
30. Maimaitijiang M., Sagan V., Sidike P., Daloye A. M., Erkbol H., Fritschi F. B. Crop Monitoring Using Satellite/UAV Data Fusion and Machine Learning // *Remote Sensing*. 2020. V. 12(9). Art. No. 1357. 23 p. <https://doi.org/10.3390/rs12091357>.
31. Mushtaq G., Asima N. Estimation of apple orchard using remote sensing and agro-meteorology land-based observation in Pulwama district of Kashmir valley // *Intern. J. Remote sensing and Geoscience*. 2014. V. 3(6). P. 2319–3484.
32. Ok A. O., Ozdarici-Ok A. 2-D delineation of individual citrus trees from UAV-based dense photogrammetric surface models // *Intern. J. Digital Earth*. 2018. V. 11(6). P. 583–608. DOI: 10.1080/17538947.2017.1337820.
33. Panda S. S., Hoogenboom G., Paz J. O. Remote sensing and geospatial technological applications for site-specific management of fruit and nut crops: a review // *Remote Sensing*. 2010. V. 2(8). P. 1973–1997. DOI: 10.3390/rs2081973.
34. Pinder J. E., McLeod K. W. Indications of relative drought stress in longleaf pine from Thematic Mapper data // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1999. No. 65. P. 495–501.
35. Prudnikova E., Savin I., Vindeker G., Grubina P., Shishkonakova E., Sharychev D. Influence of Soil Background on Spectral Reflectance of Winter Wheat Crop Canopy // *Remote Sensing*. 2019. No. 11(16). Art. No. 1932. 25 p. <https://doi.org/10.3390/rs11161932>.
36. Pujar D. U., Pujar U. U., Shruthi C. R., Wadagave A., Chulaki M. Remote sensing in fruit crops // *J. Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2017. V. 6(5). P. 2479–2484.
37. Rembold F., Atzberger C., Savin I., Rojas O. Using Low Resolution Satellite Imagery for Yield Prediction and Yield Anomaly Detection // *Remote Sensing*. 2013. V. 5(4). P. 1704–1733. DOI: 10.3390/rs5041704.
38. 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. Book No. 2.2. P. 157–164. DOI: 10.5593/sgem2020/2.2/s10.019.
39. Torres-Sanchez J., Lopez-Granados F., Serrano N., Arquero O., Pena J. M. High-Throughput 3-D Monitoring of Agricultural-Tree Plantations with Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Technology // *PLoS ONE*. 2015. V. 10(6). Art. No. e0130479. 20 p. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130479>.
40. Tucker C. J., Elgin J. H., McMurtrey J. E., Fan C. J. Monitoring corn and soybean crop development with hand-held radiometer spectral data // *Remote Sensing of Environment*. 1979. No. 8. P. 237–248. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90004-X.
41. Usha K., Singh B. Potential applications of remote sensing in horticulture — A review // *Scientia Horticulturae*. 2013. V. 153. P. 71–83. DOI: 10.1016/j.scienta.2013.01.008.
42. Vincini M., Frazzi E., D'Alessio P. A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale // *Precision Agriculture*. 2008. No. 9. P. 303–319. DOI: 10.1007/s11119-008-9075-z.
43. Weiss M., Jacob F., Duveiller G. Remote sensing for agricultural applications: A metareview // *Remote Sensing of Environment*. 2020. V. 236. 19 p. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111402.
44. Zhang C., Valente J., Kooistra L., Guo L., Wang W. Orchard management with small unmanned aerial vehicles: a survey of sensing and analysis approaches // *Precision Agriculture*. 2021. No. 22. P. 2007–2052. DOI: 10.1007/s11119-021-09813-y.
45. Zhang P., Deng L., Lyu Q., He S. L., Yi S. L., Liu Y. Effects of citrus tree-shape and spraying height of small unmanned aerial vehicle on droplet distribution // *Intern. J. Agricultural and Biological Engineering*. 2016. V. 9. P. 45–52. DOI: 10.3965/j.ijabe.20160904.2178.

Possibilities of tree status inventory in an apple orchard based on remote sensing data

I. Yu. Savin^{1,2}, S. N. Konovalov³, E. Yu. Prudnikova^{1,2},
Yu. I. Vernyuk¹, P. G. Grubina¹, S. Nasser²

¹ V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow 119017, Russia

² Institute of Environmental Engineering, RUDN University, Moscow 117198, Russia

³ Federal Horticultural Center for Breeding, Agrotechnology and Nursery
Moscow 115598, Russia

E-mail: savin_iyu@esoil.ru

We analyzed the possibilities of using Sentinel-2 satellite data and data obtained from unmanned aerial vehicle (UAV) for rapid assessment of the state of apple trees. The research was carried out on the example of the test site near the settlement of Mikhnevo (Stupino municipality of Moscow region). The data on the apple-tree condition obtained in the field were compared with the parameters calculated from the remote sensing data. It was found that at the moment, remote monitoring of orchard tree condition can be performed on qualitative and semi-quantitative levels. The attempt to construct quantitative assessments did not lead to a positive result. In order to build quantitative dependencies of parameters obtained from satellite data and UAV with tree condition parameters, it is necessary to study in-depth the dynamics of spectral reflectivity of ground objects in an orchard during the whole vegetation season. Besides, it is necessary to introduce additional tree state parameters, which are not currently used in fruit growing practice, but which may give a clue to understanding what properties of vegetation and fruit trees are used to form a remote image during different periods of vegetation season.

Keywords: Sentinel-2, apple orchard, unmanned aerial vehicle, vegetation monitoring, digital elevation model, tree's status

Accepted: 14.07.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-153-167

References

1. Gegechkori B. S., Klav' A. A., Doroshenko T. N., *Praktikum po plodovodstvu* (Fruit growing workshop), Krasnodar: KGAU, 2008, 345 p. (in Russian).
2. Dragavtseva I. A., Savin I. Yu., Zagirov N. G., Kaziev M. R. A., Akhmatova Z. P., Morenets A. S., Battalov S. B., *Resursnyi potentsial zemel' Severnogo Kavkaza dlya plodovodstva* (Resource potential of lands in the North Caucasus for fruit farming), Krasnodar, Makhachkala: DagNIISKh, 2016, 138 p. (in Russian).
3. Egorov E. A., Fisenko A. N., Doroshenko T. N., Khvostova I. V., Teren'ko G. N., Popova V. P., Smol'yakova V. M., Storchevaya E. M., Cherkezova S. R., Dragavtseva I. A., Artyukh S. N., Mozhar N. V., Alekhina E. M., Zaremuk R. Sh., Prichko T. G., Lopatina L. M., Savin I. Yu., Svyatkina O. A., *Sistemoobrazuyushchie ekologicheskie faktory i kriterii zon ustoychivogo razvitiya plodovodstva na Severnom Kavkaze* (System-forming ecological factors and criteria for sustainable development zones of fruit farming in the North Caucasus), Krasnodar: SKZNIISiV, 2001, 284 p. (in Russian).
4. Loupian E. A., Bartalev S. A., Savin I. Yu., *Satellite monitoring technologies in agriculture in Russia, Aerokosmicheskii kur'er*, 2009, No. 6, pp. 47–49 (in Russian).
5. Rybalko E. A., Baranova N. V., Loupian E. A., Tolpin V. A., Kashnitskiy A. V., Uvarov I. A., Krasheninnikova Yu. S., Ivanchenko V. I., *Management of ground data and remote observations data processing aimed at vineyards remote monitoring, Sovremennye 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.
6. Savin I. Yu., *Modern satellite monitoring of soils and crops: achievements and problems*, In: *Primenenie sredstv distantsionnogo zondirovaniya Zemli v sel'skom khozyaistve* (Application of remote sensing in agriculture), Moscow: Pochvennyi institut im. V. V. Dokuchaeva, 2015, pp. 29–32.
7. Tolpin V. A., Rybalko E. A., Baranova N. V., Kashnitskiy A. V., Loupian E. A., Uvarov I. A., *Formation of an information base of satellite and ground data for testing methods of remote monitoring of viticulture in the Republic of Crimea, Sovremennye 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.

8. Alvino A., Marino S., Remote Sensing for Irrigation of Horticultural Crops, *Horticulturae*, 2017, Vol. 3, Art. No. 40, 36 p., <https://doi.org/10.3390/horticulturae3020040>.
9. Ampatzidis Y., Partel V., Meyering B., Albrecht U., Citrus rootstock evaluation utilizing UAV-based remote sensing and artificial intelligence, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, Vol. 164, 9 p., <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104900>.
10. Atzberger C., Advances in remote sensing of agriculture: context description, existing operational monitoring systems and major information needs, *Remote Sensing*, 2013, Vol. 5, pp. 949–981, DOI: 10.3390/rs5020949.
11. Barnes E., Clarke T. R., Richards S. E., Colaizzi P., Haberland J., Kostrzewski M., Waller P., Choi C., Riley E., Thompson T. L., Coincident detection of crop water stress, nitrogen status, and canopy density using ground based multispectral data, *5th Intern. Conf. Precision Agriculture*, Bloomington, 2000, pp. 1–15.
12. Broge N. H., Leblanc E., Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density, *Remote Sensing of Environment*, 2000, No. 76, pp. 156–172.
13. Calera A., Campos I., Osann A., D’Urso G., Menenti M., Remote Sensing for Crop Management: from ET Modelling to Services for the End Users, *Sensors*, 2017, No. 17, Art. No. 1104, 2 p., <https://doi.org/10.3390/s17051104>.
14. Capolupo A., Monterisi C., Tarantino E., Landsat Images Classification Algorithm (LICA) to Automatically Extract Land Cover Information in Google Earth Engine Environment, *Remote Sensing*, 2020, No. 12, Art. No. 1201, 28 p., <https://doi.org/10.3390/rs12071201>.
15. Casa R., Rossi M., Sappa G., Trotta A., Assessing Crop Water Demand by Remote Sensing and GIS for the Pontina Plain, Central Italy, *Water Resources Management*, 2009, Vol. 23, pp. 1685–1712, DOI: 10.1007/s11269-008-9347-4.
16. Ceccato P., Gobron N., Flasse S., Pinty B., Tarantola S., Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1: Theoretical approach, *Remote Sensing of Environment*, 2002, No. 82, pp. 188–197, DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00037-8.
17. Corgne S., Hubert-Moy L., Betbeder J., Monitoring of Agricultural Landscapes Using Remote Sensing Data, *Land Surface Remote Sensing in Agriculture and Forest*, 2016, pp. 221–247.
18. Dorigo W. A., Zurita-Milla R., Wit A., Brazile J., Singh R., Schaepman M. E., A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2007, No. 9, pp. 165–193, DOI: 10.1016/j.jag.2006.05.003.
19. Escadafal R., Huete A., Improvement in remote sensing of low vegetation cover in arid regions by correcting vegetation indices for soil “noise”, *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences, Série 2*, 1991, No. 312, pp. 1385–1391.
20. Escadafal R., Belghit A., Ben-Moussa A., Indices spectraux pour la télédétection de la dégradation des milieux naturels en Tunisie aride, *Actes du 6eme Symp. Intern. sur les mesures physiques et signatures en télédétection*, de G. Guyot (réd), Val d’Isère, France, 1994, No. 17, pp. 253–259.
21. Gamon J. A., Surfus J. S., Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer, *New Phytologist*, 1999, No. 143, pp. 105–117, DOI: 10.1046/j.1469-8137.1999.00424.x.
22. Gitelson A. A., Kaufman Y. J., Merzlyak M. N., Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 1996, No. 58, pp. 289–298, DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00072-7.
23. Gitelson A., Kaufman Y., Stark R., Rundquist D., Novel Algorithms for Remote Estimation of Vegetation Fraction, *Remote Sensing of Environment*, 2002, No. 80, pp. 76–87.
24. Gitelson A. A., Viña A., Arkebauer T. J., Rundquist D. C., Keydan G., Leavitt B., Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies, *Geophysical Research*, 2003, Vol. 30, Issue 5, Art. No. 1248, 4 p., <https://doi.org/10.1029/2002GL016450>.
25. Glenn E. P., Nagler P. L., Huete A. R., Vegetation Index Methods for Estimating Evapotranspiration by Remote Sensing, *Surveys Geophysics*, 2010, No. 31, pp. 531–555, DOI: 10.1007/s10712-010-9102-2.
26. Gobron N., Pinty B., Verstraete M. M., Widlowski J., Advanced vegetation indices optimized for upcoming sensors: Design, performance, and applications, *Geoscience and Remote Sensing*, 2000, No. 38, pp. 2489–2505.
27. Hancock D. W., Dougherty C. T., Relationships between blue- and red-based vegetation indices and leaf area and yield of alfalfa, *Crop Science*, 2007, No. 47, pp. 2547–2556, DOI: 10.2135/cropsci2007.01.0031.
28. Jimenez-Brenes F. M., Lopez-Granados F., de Castro A. I., Torres-Sanchez J., Serrano N., Pena J. M., Quantifying pruning impacts on olive tree architecture and annual canopy growth by using UAV-based 3D modelling, *Plant Methods*, 2017, Vol. 13, Art. No. 55, 15 p., DOI: 10.1186/s13007-017-0205-3.
29. Lymburner L., Beggs P. J., Jacobson C. R., Estimation of canopy-average surface-specific leaf area using Landsat TM data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2000, No. 66, pp. 183–191.
30. Maimaitijiang M., Sagan V., Sidike P., Daloye A. M., Erkbol H., Fritschi F. B., Crop Monitoring Using Satellite/UAV Data Fusion and Machine Learning, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12(9), Art. No. 1357, 23 p., <https://doi.org/10.3390/rs12091357>.

31. Mushtaq G., Asima N., Estimation of apple orchard using remote sensing and agro-meteorology land-based observation in Pulwama district of Kashmir valley, *Intern. J. Remote Sensing and Geoscience*, 2014, Vol. 3(6), pp. 2319–3484.
32. Ok A.O., Ozdarici-Ok A., 2-D delineation of individual citrus trees from UAV-based dense photogrammetric surface models, *Intern. J. Digital Earth*, 2018, Vol. 11(6), pp. 583–608, DOI: 10.1080/17538947.2017.1337820.
33. Panda S.S., Hoogenboom G., Paz J.O., Remote sensing and geospatial technological applications for site-specific management of fruit and nut crops: a review, *Remote Sensing*, 2010, Vol. 2(8), pp. 1973–1997, DOI: 10.3390/rs2081973.
34. Pinder J.E., McLeod K.W., Indications of relative drought stress in longleaf pine from Thematic Mapper data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1999, No. 65, pp. 495–501.
35. Prudnikova E., Savin I., Vindeker G., Grubina P., Shishkonakova E., Sharychev D., Influence of Soil Background on Spectral Reflectance of Winter Wheat Crop Canopy, *Remote Sensing*, 2019, No. 11(16), Art. No. 1932, 25 p., <https://doi.org/10.3390/rs11161932>.
36. Pujar D.U., Pujar U.U., Shruthi C.R., Wadagave A., Chulaki M., Remote sensing in fruit crops, *J. Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2017, Vol. 6(5), pp. 2479–2484.
37. Rembold F., Atzberger C., Savin I., Rojas O., Using Low Resolution Satellite Imagery for Yield Prediction and Yield Anomaly Detection, *Remote Sensing*, 2013, Vol. 5(4), pp. 1704–1733, DOI: 10.3390/rs5041704.
38. 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, Book No. 2.2, pp. 157–164, DOI: 10.5593/sgem2020/2.2/s10.019.
39. Torres-Sanchez J., Lopez-Granados F., Serrano N., Arquero O., Pena J.M., High-Throughput 3-D Monitoring of Agricultural-Tree Plantations with Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Technology, *PLoS ONE*, 2015, Vol. 10(6), Art. No. e0130479, 20 p., <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130479>.
40. Tucker C.J., Elgin J.H., McMurtrey J.E., Fan C.J., Monitoring corn and soybean crop development with hand-held radiometer spectral data, *Remote Sensing of Environment*, 1979, No. 8, pp. 237–248, DOI: 10.1016/0034-4257(79)90004-X.
41. Usha K., Singh B., Potential applications of remote sensing in horticulture — A review, *Scientia Horticulturae*, 2013, Vol. 153, pp. 71–83, DOI:10.1016/j.scienta.2013.01.008.
42. Vincini M., Frazzi E., D'Alessio P., A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale, *Precision Agriculture*, 2008, No. 9, pp. 303–319, DOI: 10.1007/s11119-008-9075-z.
43. Weiss M., Jacob F., Duveiller G., Remote sensing for agricultural applications: A metareview, *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, 2020, Vol. 236, 19 p., DOI: 10.1016/j.rse.2019.111402.
44. Zhang C., Valente J., Kooistra L., Guo L., Wang W., Orchard management with small unmanned aerial vehicles: a survey of sensing and analysis approaches, *Precision Agriculture*, 2021, No. 22, pp. 2007–2052, DOI:10.1007/s11119-021-09813-y.
45. Zhang P., Deng L., Lyu Q., He S.L., Yi S.L., Liu Y., Effects of citrus tree-shape and spraying height of small unmanned aerial vehicle on droplet distribution, *Intern. J. Agricultural and Biological Engineering*, 2016, Vol. 9, pp. 45–52, DOI: 10.3965/j.ijabe.20160904.2178.