

Никита Олегович Мальчиков

Институт биофизики СО РАН, ведущий инженер лаборатории экологической информатики, Россия, Красноярск

E-mail: show.mno@mail.ru

Ирина Юрьевна Ботвич

Институт биофизики СО РАН, младший научный сотрудник лаборатории экологической информатики Россия, Красноярск

E-mail: irina.pugacheva@mail.ru

Дмитрий Владимирович Емельянов

Институт биофизики СО РАН, ведущий инженер лаборатории экологической информатики, Россия, Красноярск

E-mail: dima9526@gmail.com

Владимир Кузьмич Ивченко

Красноярский государственный аграрный университет, заведующий кафедрой общего земледелия и защиты растений, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Россия, Красноярск

E-mail: v.f.ivchenko@mail.ru

Анатолий Петрович Шевырнов

Институт биофизики СО РАН, заведующий лабораторией экологической информатики, доктор технических наук, Россия, Красноярск

E-mail: ap_42@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТЫ РАСТЕНИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Цель исследований – апробация и оценка эффективности метода определения высоты растений посевов сельскохозяйственных культур по данным беспилотных воздушных судов. Задачи исследований: проведение измерения высоты растений контактными и дистанционными методами; построение карты пространственного распределения высоты растений посевов ячменя и пшеницы. Исследования проводились на землях в учебно-опытном хозяйстве «Миндерлинское» Сухобузимского района Красноярского края 22 июля 2020 г. В работе представлен анализ результатов обработки данных по полосам № 1, 3 – засеянной пшеницей сорта Новосибирская-15, № 2 – ячменем сорта Ача. Исследование основывается на данных с DJI Matrice 210 RTK V2 (камера ZENMUSE X5S) – произведено построение 3D-модели местности; DJI Phantom 4 Multispectral – получена карта пространственного распределения NDVI. Выполнены измерения высоты растений посевов яровой пшеницы и ячменя контактными и дистанционными методами. Установлена ошибка определения высоты растений по данным дистанционных измерений. Наибольшая величина ошибки 12,9 % получена на посевах ячменя. Ошибка определения высоты растений яровой пшеницы составляет от 2,9 и до 3,8 % для полос с различными видами обработки. Установлено, что величина ошибки обусловлена морфологическими особенностями растений ячменя. Получены карты пространственного распределения высоты растений посевов яровой пшеницы и ячменя. Проведена оценка неоднородности посевов зерновых культур. Установлена возможность оценки площади полегания зерновых культур по данным о пространственном распределении высоты растений. Установлено, что наиболее эффективным подходом для выявления полегания посевов является совместное использование карт высот растений и NDVI.

Ключевые слова: зерновые культуры, карта высот растений, ZENMUSE X5S, беспилотные воздушные суда, БПЛА, точное земледелие.

Nikita O. Malchikov

Institute of Biophysics SB RAS, leading engineer of the laboratory of ecological informatics, Russia, Krasnoyarsk

E-mail: show.mno@mail.ru

Irina Yu. Botvich

Institute of Biophysics SB RAS, junior staff scientist of the laboratory of ecological informatics Russia, Krasnoyarsk

E-mail: irina.pugacheva@mail.ru

Dmitry V. Emelyanov

Institute of Biophysics SB RAS, leading engineer of the laboratory of ecological informatics, Russia, Krasnoyarsk

E-mail: dima9526@gmail.com

Vladimir K. Ivchenko

Krasnoyarsk State Agrarian University, head of the chair of general agriculture and protection of plants, doctor of agricultural sciences, professor, Russia, Krasnoyarsk

E-mail: v.f.ivchenko@mail.ru

Anatoly P. Shevyrnogov

Institute of Biophysics SB RAS, head of the laboratory of ecological informatics, doctor of engineering, Russia, Krasnoyarsk

E-mail: ap_42@mail.ru

DETERMINING THE HEIGHT OF AGRICULTURAL CROPS BASED ON MEASUREMENTS OF UNMANNED AIRCRAFT

The purpose of the research was approbation and evaluation of the effectiveness of the method for determining the plant height of agricultural crops based on unmanned aerial vehicles data. The research objectives were measuring plant height by contact and remote methods; creating the map of spatial distribution of the plant height in barley and wheat. The studies were carried out on the lands of educational and experimental farm "Minderlinskoe", Sukhobuzimo district, Krasnoyarsk region on July, 22, 2020. The paper presented the analysis of the data processing results for line 1, 3 – sown with wheat "Novosibirskaya-15", 2 – with barley "Acha". The study was based on the data from a DJI Matrice 210 RTK V2 (ZENMUSE X5S camera) – a 3D terrain model was built; DJI Phantom 4 Multispectral – NDVI spatial distribution map was obtained. The plant height measurements of spring wheat and barley crops by contact and remote methods were carried out. The largest error value, 12.9 %, was obtained for barley crops. The error in determining the height of spring wheat crops ranged from 2.9 % to 3.8 % with different types of processing. It was found that the error magnitude had been caused by morphological characteristics of barley plants. The plant height spatial distribution maps of spring wheat and barley were obtained. The assessment of heterogeneity of crops of grain crops was carried out. The possibility of assessing the area of grain crops lodging based on the plant height spatial distribution data had been established. It was found that the most effective approach for identifying crop lodging is the combined use of the plant height maps and NDVI.

Keywords: crops, plant elevation map, ZENMUSE X5S, unmanned aerial vehicles, UAVs, precision farming.

Введение. Высота растений является одним из важнейших свойств, характеризующих биологические особенности сорта. Она изменяется под действием целого ряда агротехнических факторов. Применительно к сельскому хозяйству это свойство может быть использовано для оценки состояния посевов. На высоту растений

влияют такие факторы, как фаза развития, недостаток или избыток биогенных элементов в почве, повреждение вредителями, погодные условия и т.д.

Для мониторинга и обработки информации о сельскохозяйственных объектах достаточно давно стали применяться аэрометоды. Однако в

последнее десятилетие, в связи с бурным развитием беспилотных воздушных судов (БВС) и информационных технологий, все более актуальным становится их применение в сельском хозяйстве.

Именно в сельском хозяйстве беспилотные воздушные суда (БВС) нашли одно из самых широких и экономически выгодных применений:

- построение цифровых моделей местности. Построение 3D-моделей сельскохозяйственных посевов позволяет дистанционно получать данные о высоте растительности, которые, в свою очередь, важны при расчете урожайности [1];

- экспертный осмотр сельскохозяйственных земель, оценка состояния растительности. Замена традиционных методов осмотра земель и растительности (объезд территорий на автотранспорте) на анализ изображений БВС позволяет не только сократить экономические и временные затраты, но и получать более подробную картину состояния посевов. Это, в свою очередь, дает возможность принимать своевременные оперативные решения [2–4];

- подсчет площади используемых земель. Детальные карты земель сельскохозяйственного назначения, получаемые с помощью БВС, позволяют выполнять высокоточные измерения площадей, что дает полную картину о рациональности использования земельных ресурсов;

- дифференцированное внесение удобрений. Проблема неоднородности состояния растительности влечет за собой большие экономические потери. При традиционных способах внесения удобрений не учитываются существующие локальные неоднородности и в пределах поля вносится одинаковое количество удобрений. В свою очередь, применение БВС с мультиспектральными камерами позволяет строить карты состояния растительности на основе вегетационных индексов. Эти карты с высокой точностью выявляют всю неоднородность состояния растительности, что становится основой для дифференцированного внесения удобрений и, как следствие, влечет за собой экономическую выгоду (исключает излишний расход удобрений) [5].

Перечисленные преимущества применения БВС в сельском хозяйстве показывают актуальность применения данной технологии, ее новиз-

ну и эффективность. Экономия бюджета сельхозпроизводителей возникает из-за снижения количества вносимых минеральных удобрений, топливных, временных и прочих расходов.

Высокое пространственное разрешение получаемых данных и точность расположения беспилотного летательного аппарата в пространстве позволяют получать оценку высоты сельскохозяйственной растительности. Это напрямую снижает трудозатраты агрономов.

Наиболее подробно описано применение беспилотных технологий в сельском хозяйстве в работе [6], в которой приводятся преимущества применения данной технологии в сельском хозяйстве. В частности, упоминается о том, что высокая скорость полета беспилотных летательных аппаратов (до 75 км/ч) в так называемых спортивных режимах позволяет обследовать в день по 8000 га. Имеются статистические данные, что внедрение БВС в сельское хозяйство может сократить общие расходы на 20–30 %. А это десятки и сотни тысяч рублей в реальном выражении.

В работе Guijun Yang [7] отмечается, что с помощью беспилотного летательного аппарата DJI S 1000+ с полезной нагрузкой в виде гиперспектральной камеры Cubert UHD 185 возможно построение ортофотоплана и цифровой модели сельскохозяйственного поля. Такая информация позволила выявить зависимости спектров отражения растительности от высоты посевов.

Исследованиями А.П. Шевырногова с соавт. также доказана возможность использования БВС для съемки микрорельефа при мониторинге агроценозов [8]. В ходе проведенного исследования описывается зависимость изменения значения NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [9] от микрорельефа сельскохозяйственного поля. Стоит отметить, что до применения технологии БВС не было объяснения резкому повышению показателя NDVI в конкретных точках поля. Стало понятным, что существенное влияние оказывает микрорельеф и, как следствие, накопление влаги в ранневесенний период, а это, в свою очередь, влияет на развитие посевов.

А.Ю. Астапов, Ю.А. Рязанова [10] описывают преимущества проведения мультиспектральной съемки сельскохозяйственных полей с помощью БВС в сравнении с аналогичными методами, проводимыми с помощью спутниковых технологий.

С учетом уже полученного мирового опыта становится понятным, что применение беспилотных технологий в сельском хозяйстве носит не только научный, но и практический характер. Использование БВС позволяет снижать экономические затраты предприятий и при этом повышать показатели урожайности за счет принятия своевременных управленческих решений.

Цель исследований. Апробация и оценка эффективности метода определения высоты растений посевов сельскохозяйственных культур по данным беспилотных воздушных судов.

Задачи исследований:

- проведение измерения высоты растений контактными и дистанционными методами;
- построение карты пространственного распределения высоты растений посевов ячменя и пшеницы.

Объект и методы исследований. Исследования проводились на землях в учебно-опытном хозяйстве «Миндерлинское» Сухобузимского района Красноярского края 22 июля 2020 г. Опытное поле состоит из отдельных полос. Внесение удобрений производилось по северной части каждой полосы (шириной 10 м), южная оставалась без удобрений. Каждая полоса засеяна определенным видом сельскохозяйственных культур. В работе представлен анализ результатов обработки данных по полосе № 1 – засеянной пшеницей сорта Новосибирская-15, № 2 – ячменем сорта Ача, № 3 – пшеницей сорта Новосибирская-15. Все полосы разделены на 4 тестовых участка в соответствии с четырьмя видами обработки почв: *a* – вспашка (ПН-5-35 на 20–22 см); *b* – плоскорезная обработка (КПШК-3,8 на 20–22 см); *c* – поверхностная обработка (дискатор БДШ-5,6 на 8-10 см); *d* – прямой посев при нулевой обработке почвы (Агратор 4,8) [11, 12].

Исследование основывается на данных с беспилотного воздушного судна DJI Matrice 210 RTK V2 с полезной нагрузкой в виде камеры ZENMUSE X5S. БВС имеет систему RTK, которая позволяет достигать точности географической привязки до 2 см.

Камера ZENMUSE X5S дает возможность получать цифровые изображения с разрешением 5120x2880 пикселей, что приводит к достижению высокой детализации изображения с больших высот. На основе полученных данных

произведено построение 3D-модели местности. Данная возможность позволяет получать такую информацию, как высота объектов (в том числе, растений), состояние рельефа и т.д.

Карта пространственного распределения NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) была получена по данным съемки беспилотного воздушного судна DJI Phantom 4 Multispectral. Пространственное разрешение полученной карты составило 5,3 см.

Для получения качественного ортофотоплана и 3-D модели съемка проводилась в надир с соблюдением продольного и поперечного перекрытия в 80 %, а также под углом в 70° при наклонной съемке.

Построение полетных заданий выполнялось в программном обеспечении DJI Pilot, поставляемом в комплекте с DJI Matrice 210. Высота полета от точки взлета – 50 м, время полета заняло 55 минут, в результате чего получено 1207 снимков. Пространственное разрешение изображений составило 1,1 см.

Обработка полученных данных проводилась в специализированной программе Agisoft Metashape. Процесс обработки занял более 22 часов, в результате которого получены ортофотоплан и 3-D модель исследуемых участков.

Контроль дистанционных измерений обеспечивается контактными методами. Учетные растения (48 штук) располагались по углам тестовых площадок для облегчения их идентификации по 3-D модели. Измерение высоты растений проводилось с помощью измерительной ленты. Высота растений замерялась от точки выхода из земли до конца самого высокого колоса.

Высота растений в построенной 3-D модели измерялась в программе Agisoft Metashape при помощи инструмента «Линейка» в тех же точках, в которых проводились наземные измерения на исследуемых участках. Для получения достоверных результатов высота измерялась 3 раза и рассчитывалось среднее значение для каждой точки.

Результаты исследований и их обсуждение. Применение специализированного программного обеспечения Agisoft Metashape позволило произвести построение 3-D модели посевов пшеницы и ячменя. На рисунке 1 представлен фрагмент результата построения 3-D модели посева ячменя.

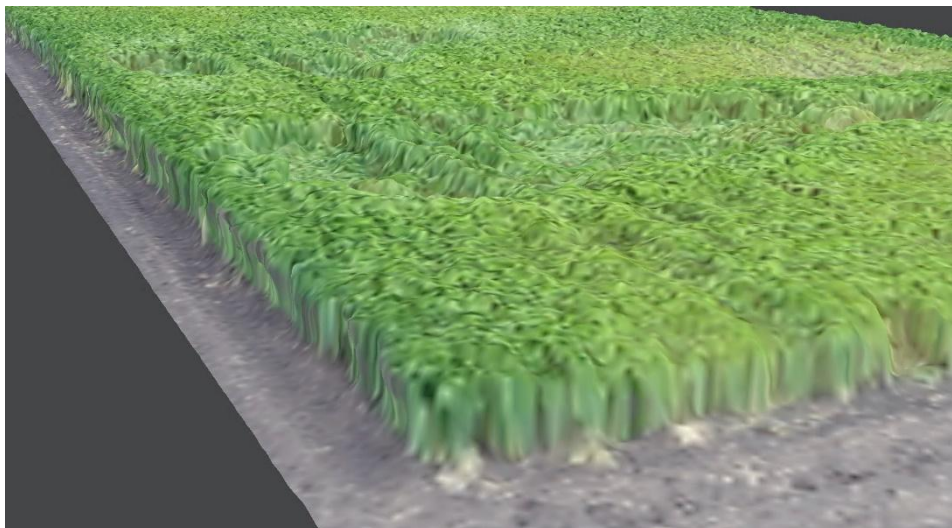


Рис. 1. Построенная 3-D модель посева ячменя

Точность работы метода дистанционного определения высоты растений посевов определена по данным наземных контактных измерений. В таблице и на рисунке 2 представлены сред-

ние значения высот растений и ошибок их определения. Расчет значений произведен отдельно для каждого вида обработки и в среднем для полосы (без учета вида обработки).

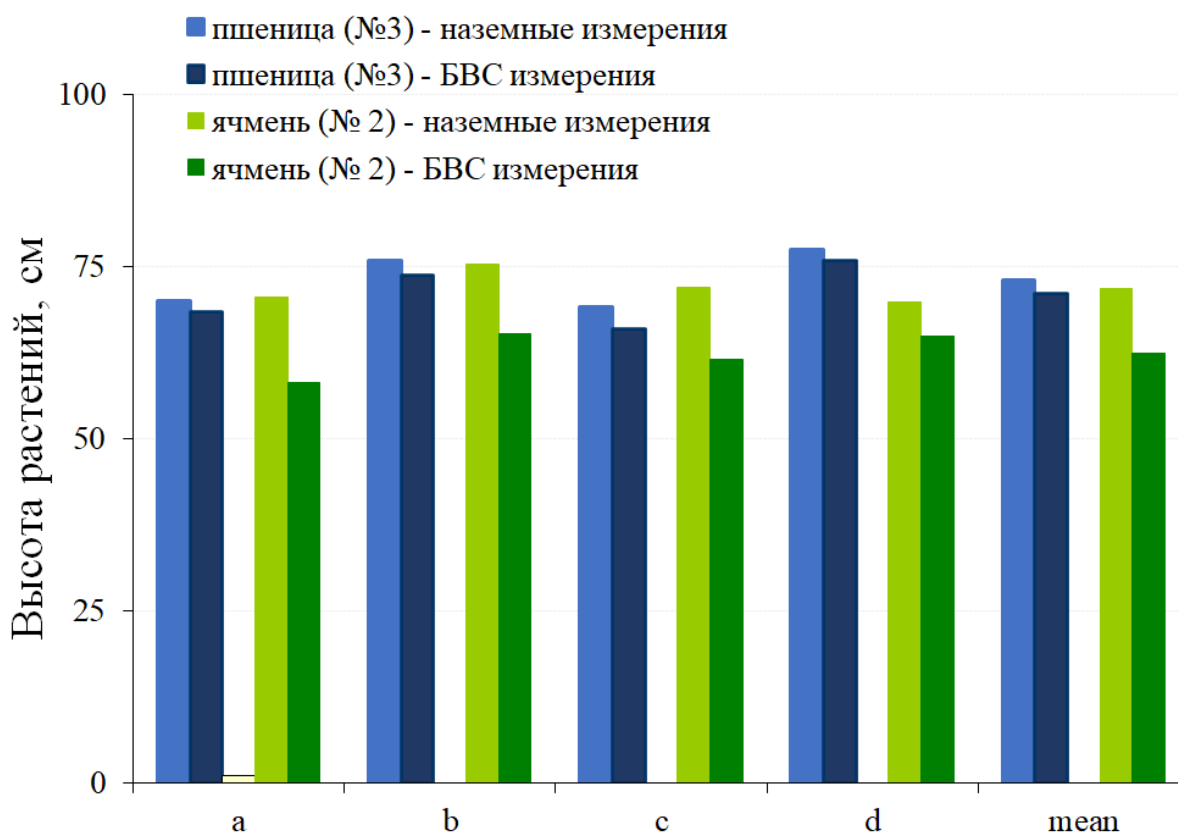


Рис. 2. График средних значений высот растений посевов пшеницы (№ 3) и ячменя (№ 2), измеренных контактными и дистанционными (БВС) методами (по видам обработок – a, b, c, d; mean – среднее по посеву)

Ошибка определения значений высот растений посевов, измеренных по данным БВС (среднее для каждого вида обработки и среднее по посеву), %

Вид обработки почвы	Полоса №1 (пшеница)	Полоса №2 (ячмень)	Полоса №3 (пшеница)
Вспашка – а	2,5	17,6	2,4
Плоскорезная обработка – b	1,5	13,5	2,7
Поверхностная обработка – с	0	14,8	4,4
Прямой посев при нулевой обработке почвы – d	10,3	7,0	2,1
Среднее по посеву	3,8	12,9	2,9

Установлено, что величина наибольшей ошибки определения высоты растений получена для данных по полосе № 2, засеянной ячменем. Величина средней ошибки по полю составила 12,9 %. Тогда как ошибка определения высоты растений пшеницы – 3,8 и 2,9 % для 1-й и 3-й полос соответственно. На момент измерений посева пшеницы и ячменя находились в фазе колошения. В фазе плодоношения, по ме-

ре созревания зерна, величина наклона колоса у ячменя увеличивается значительно больше, чем у пшеницы.

В ходе контактных измерений замеры проводились от точки выхода стебля из земли (почвы) и до самого высокого колоса у пшеницы и конца остей у ячменя. Перечисленные факты обусловили наибольшую ошибку данных измерений БВС по ячменю.

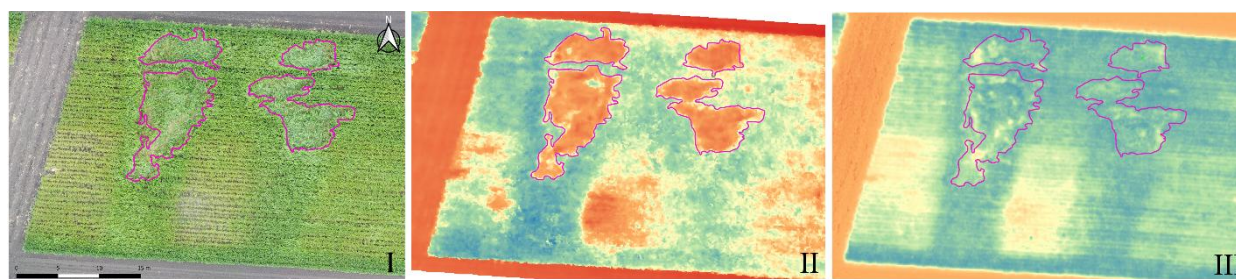


Рис. 3. Ортофотоплан (I), карта пространственного распределения высоты растений (II), карта NDVI (III) тестового участка посева ячменя. Ярко-розовым контуром выделены области полегания ячменя

Использование данных о высоте растений позволяет оценивать степень их полегания. Яровой ячмень относится к культуре, имеющей невысокую устойчивость к полеганию. Полегание отмечается в основном в период колошения и приводит к значительным потерям урожая. На рисунке 3 представлены ортофотоплан (I), пространственное распределение высот (II), пространственное распределение NDVI (III) растений ячменя, расположенного на обработке вида а – вспашка. Ярко-розовым контуром выделены области полегания ячменя. Площадь представленного на рисунке участка составляет 0,045 га, из них площадь полегания – 14,7 %. Установлено, что в области полегания ячменя средняя высота растений составила 48 см, тогда как высота растений на смежных участках была 78 см. Значения NDVI на участках с полеганием были наиболее высокими – 0,81. На смежных участ-

ках средняя величина NDVI – 0,71. Более высокие значения NDVI объясняются увеличением площади проективного покрытия почвы полегающими растениями.

На рисунке 3, II выделяются и другие области красного цвета, значения высоты растений на данных участках тоже более низкие, чем на смежных, – 60 см. Но данные участки не могут быть отнесены к области полегания, так как значения NDVI на них также достаточно низкие – 0,63. На ортофотоплане видна изреженность растений на данных участках. Стоит отметить, что подобные области наиболее характерны для участков с неудобренным фоном.

Таким образом, установлено, что области полегания ячменя можно визуальнo оценить по ортофотоплану данной территории, так как они отличаются по цвету и структуре полегания. Однако наиболее эффективным подходом яв-

ляется совместное использование карт высот и NDVI. Отдельное использование карт высот и NDVI не дает достоверной информации о полегании посевов. Совместное использование карт высот и NDVI растений посевов позволяет проводить оценку полегания посевов в автоматическом режиме и оценивать их площади.

Выводы. Проведено исследование эффективности применения 3D-моделей местности по данным, полученным с БВС, с целью получения пространственного распределения высоты растений посевов яровой пшеницы и ячменя на опытном поле.

Выполнены измерения высоты растений посевов яровой пшеницы и ячменя контактными и дистанционными методами. Установлена ошибка определения высоты растений по данным дистанционных измерений. Наибольшая величина ошибки (12,9 %) получена на посевах ячменя. Ошибка определения высоты растений яровой пшеницы составляет от 2,9 до 3,8 % для полос с различными видами обработки. Установлено, что величина ошибки обусловлена морфологическими особенностями растений ячменя.

Получены карты пространственного распределения высоты растений посевов яровой пшеницы и ячменя. Проведена оценка неоднородности посевов зерновых культур.

Установлена возможность оценки площади полегания зерновых культур по данным о пространственном распределении высоты растений.

Установлено, что наиболее эффективным подходом для выявления полегания посевов является совместное использование карт высот растений и NDVI.

Литература

1. *Juliane Bendig, Kang Yu, Helge Aasen, Andreas Bolten, Simon Bennertz, Janis Broscheit, Martin L. Gnyр, Georg Baretha* Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2015. V. 39. P. 79–87.
2. *Danyang Yu, Yuanyuan Zha, Liangsheng Shi, Xiuliang Jin, Shun Hu, Qi Yang, Kai Huang, Wenzhi Zeng* Improvement of sugarcane yield estimation by assimilating UAV-derived plant height observations // *European Journal of Agronomy*. 2020. V. 121. 126159.
3. *Xiuliang Jin, Shouyang Liu, Frédéric Baret, Matthieu Hemerlé, Alexis Comar* Estimates of plant density of wheat crops at emergence from very low altitude UAV imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2017. V. 198. P. 105–114.
4. *Sylvain Jay, Frédéric Baret, Dan Dutartre, Ghislain Malatesta, Stéphanie Héno, Alexis Comar, Marie Weiss, Fabienne Maupas* Exploiting the centimeter resolution of UAV multi-spectral imagery to improve remote-sensing estimates of canopy structure and biochemistry in sugar beet crops // *Remote Sensing of Environment*. 2019. V. 231. 110898.
5. *Yan Pang, Yeyin Shid, Shancheng Gao, Feng Jiang, Arun-Narenthiran Veeranampalayam-Sivakumar, Laura Thompson, Joe Luck, Chao Liu* Improved crop row detection with deep neural network for early-season maize stand count in UAV imagery // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. V. 178. 105766.
6. *Мальчиков Н.О., Пускорская С.Ю.* Продвижение беспилотных летательных аппаратов для нужд сельского хозяйства // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики: мат-лы междунар. науч. конф. Красноярск: СибГУ, 2019. С. 832–833.*
7. *Guijun Yang, Changchun Li, Yanjie Wang, Huanhuan Yuan, Haikuan Feng, Bo Xu, Xiaodong Yang.* The DOM Generation and Precise Radiometric Calibration of a UAV-Mounted Miniature Snapshot Hyperspectral Imager // *Remote Sensing*. 2017. N 9(7). P. 642.
8. *Шевырногов А.П., Мальчиков Н.О., Ботвич И.Ю.* [и др.]. Использование беспилотных летательных аппаратов для съемки микрорельефа при мониторинге агроценозов // *Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов: мат-лы междунар. науч. конф. Бердск, 2019. С. 485–490.*
9. *Deering D.W.* Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors // *Ph. D. Dissertation. Texas A & M University. College Station. 1978. TX. 338 pp.*
10. *Астанов А.Ю., Рязанова Ю.А.* Применение беспилотных летательных аппаратов в садоводстве // *Наука и образование*. 2019. № 2(4).
11. *Шевырногов А.П., Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В.* [и др.]. Возможность распознавания почвенного покрова опытного поля с использованием наземных и спутниковых

- данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 150–160.
12. *Ивченко В.К., Демьяненко Т.Н., Ильченко И.О.* [и др.]. Использование наземных спектрофотометрических измерений для выявления влияния приемов основной обработки почвы на процесс нарастания надземной фитомассы яровой пшеницы в зернопаропропашном севообороте // Вестник КрасГАУ. 2020. № 1. С. 3–11.
6. *Mal'chikov N.O., Piskorskaja S.Ju.* Prodvizhenie bespilotnyh letatel'nyh apparatov dlja nuzhd sel'skogo hozjajstva // Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavtiki: mat-ly mezhdunar. nauch. konf. Krasnojarsk: SibGU, 2019. S. 832–833.
7. *Guijun Yang, Changchun Li, Yanjie Wang, Huanhuan Yuan, Haikuan Feng, Bo Xu, Xiaodong Yang.* The DOM Generation and Precise Radiometric Calibration of a UAV-Mounted Miniature Snapshot Hyperspectral Imager // Remote Sensing. 2017. N 9(7). P. 642.
8. *Shevymogov A.P., Mal'chikov N.O., Botvich I.Ju.* [i dr.]. Ispol'zovanie bespilotnyh letatel'nyh apparatov dlja s'emki mikrorel'efa pri monitoringe agrocenozov // Obrabotka prostranstvennyh dannyh v zadachah monitoringa prirodnyh i antropogennyh processov: mat-ly mezhdunar. nauch. konf. Berdsk, 2019. S. 485–490.
9. *Deering D.W.* Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors // Ph. D. Dissertation. Texas A & M University. College Station. 1978. TX. 338 pp.
10. *Astapov A.Ju., Rjzanova Ju.A.* Primenenie bespilotnyh letatel'nyh apparatov v sadovodstve // Nauka i obrazovanie. 2019. № 2(4).
11. *Shevymogov A.P., Botvich I.Ju., Emel'janov D.V.* [i dr.]. Vozmozhnost' raspoznaniya pochvennogo pokrova opytного polja s ispol'zovaniem nazemnyh i sputnikovyh dannyh // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa. 2019. T. 16. № 4. S. 150–160.
12. *Ivchenko V.K., Dem'janenko T.N., Il'chenko I.O.* [i dr.]. Ispol'zovanie nazemnyh spektrofotometricheskikh izmerenij dlja vyjavlenija vlijanija priemov osnovnoj obrabotki pochvy na process narastanija nadzemnoj fitomassy jarovoj pshenicy v zernoparopashnom sevooborote // Vestnik KrasGAU. 2020. № 1. С. 3–11.

Literatura

1. *Juliane Bendig, Kang Yu, Helge Aasen, Andreas Bolten, Simon Bennertz, Janis Broscheit, Martin L. Gnyp, Georg Baretha* Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2015. V. 39. P. 79–87.
2. *Danyang Yu, Yuanyuan Zha, Liangsheng Shi, Xiuliang Jin, Shun Hu, Qi Yang, Kai Huang, Wenzhi Zeng* Improvement of sugarcane yield estimation by assimilating UAV-derived plant height observations // European Journal of Agronomy. 2020. V. 121. 126159.
3. *Xiuliang Jin, Shouyang Liu, Frédéric Baret, Matthieu Hemerlé, Alexis Comar* Estimates of plant density of wheat crops at emergence from very low altitude UAV imagery // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 198. P. 105–114.
4. *Sylvain Jay, Frédéric Baret, Dan Dutartre, Ghislain Malatesta, Stéphanie Héno, Alexis Comar, Marie Weiss, Fabienne Maupas* Exploiting the centimeter resolution of UAV multispectral imagery to improve remote-sensing estimates of canopy structure and biochemistry in sugar beet crops // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 231. 110898.
5. *Yan Pang, Yeyin Shid, Shancheng Gao, Feng Jiang, Arun-Narenthiran Veeranampalayam-Sivakumar, Laura Thompson, Joe Luck, Chao Liu* Improved crop row detection with deep

Исследование выполнено при поддержке Красноярского краевого фонда науки в рамках реализации проекта «Разработка и внедрение метода раннего прогнозирования урожайности зерновых культур в Сибирском регионе по данным дистанционного зондирования Земли».