

DOI: 10.17516/1999-494X-0393

УДК 528.8

Construction and Analysis of Crops Maps Based on Unmanned Survey Data in Different Vegetative Stages

Dmitrii V. Emelyanov^{*a}, Irina Yu. Botvich^a,
Vladimir K. Ivchenko^b and Anatolii P. Shevyrnogov^a

*^aInstitute of Biophysics SB RAS
Krasnoyarsk, Russian Federation*

*^bKrasnoyarsk State Agrarian University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 14.03.2022, received in revised form 18.04.2022, accepted 24.04.2022

Abstract. An assessment was made of changes in the height of vegetation of agricultural crops. The object of the study was agricultural crops – wheat and barley, located on the territory of the educational experimental farm “Minderlinskoe”, Sukhobuzimsky district, Krasnoyarsk region. The work was based on unmanned survey data. The measurements were taken with the ZENMUSE X5S camera mounted on the DJI Matrice 210 RTK V2 unmanned aerial vehicle. Maps of the spatial distribution of plant heights of barley and wheat crops was constructed. The spatial resolution of the obtained maps was 2.7 cm. An assessment of the growth dynamics of crop plants was carried out using remote sensing methods. The effectiveness of the use of unmanned aerial vehicles for determining the heights of agricultural crops is shown. The possibility of revealing intra-field heterogeneity of crops at various stages of growth was established.

Keywords: maps of plant heights, UAV, agricultural fields, ZENMUSE X5S.

Citation: Emelyanov, D.V., Botvich, I.Y., Ivchenko, V.K., Shevyrnogov, A. P. Construction and analysis of crops maps based on unmanned survey data in different vegetative stages. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(3), 308–317. DOI: 10.17516/1999-494X-0393.

Построение и анализ карт высот растительности агроценозов по данным беспилотной съемки в различные фазы вегетации

Д. В. Емельянов^а, И. Ю. Ботвич^а,
В. К. Ивченко^б, А. П. Шевырнов^а

^аИнститут биофизики СО РАН
Российская Федерация, Красноярск

^бКрасноярский государственный аграрный университет
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. В ходе проведенного исследования выполнена оценка изменений высоты растительности посевов сельскохозяйственных культур. Объектами исследования являлись яровая пшеница и ячмень, расположенные на территории учебно-опытного хозяйства “Миндерлинское” Сухобузимского района Красноярского края. Работа основывается на данных беспилотной съемки. Измерения выполнены камерой ZENMUSE X5S, установленной на беспилотном воздушном судне DJI Matrice 210 RTK V2. Построены карты пространственного распределения высот растений посевов ячменя и яровой пшеницы. Пространственное разрешение полученных карт составляет 2,7 см. Проведена оценка динамики роста и развития сельскохозяйственных культур методами дистанционного зондирования. Показана эффективность применения беспилотных воздушных судов для определения высоты сельскохозяйственных культур. Установлена возможность выявления внутривидовой неоднородности посевов на различных стадиях роста и развития культурных растений.

Ключевые слова: карта высот растений, БВС, сельскохозяйственные угодья, ZENMUSE X5S.

Цитирование: Емельянов, Д. В. Построение и анализ карт высот растительности агроценозов по данным беспилотной съемки в различные фазы вегетации / Д. В. Емельянов, И. Ю. Ботвич, В. К. Ивченко, А. П. Шевырнов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(3). С. 308–317. DOI: 10.17516/1999-494X-0393.

Введение

Оценка высоты растений сельскохозяйственных культур имеет большое значение для контроля как нормальной сезонной динамики, так и отклонений от нее в связи с негативным влиянием целого ряда факторов. Определение высоты растений на больших площадях наземным методом крайне затруднительно. Особенно трудновыполнима оценка внутривидовой неоднородности посевов. Картосхемы внутривидовой неоднородности могут эффективно использоваться при внедрении технологий точного земледелия, для определения локации и количества необходимой подкормки удобрениями, при оценке повреждений посевов вредителями, болезнями, сорняками и соответствующей корректировке технологических операций при возделывании культурных растений, оценке величины потерь будущего урожая из-за неблагоприятных погодных-климатических условий, наличии и местах расположения зон полегания посевов, что также необходимо учитывать при уборке урожая и т.д.

В течение вегетационного периода изменчивость высоты посевов дает важную информацию о здоровье растений, их росте и реакции на воздействие окружающей среды [1, 2]. Высо-

та растений как фактор оценки состояния посевов используется во множестве литературных источников, как отечественных, так и зарубежных [3–6]. В Xiongze Han и др. [3] показана возможность использования беспилотных воздушных судов (БВС) для оценки высоты растений с высокой точностью на относительно большом сельскохозяйственном поле. Корреляция между оценками, основанными на БВС, и контактными данными была сильной во все даты измерений ($R^2 > 0.80$). Однако было обнаружено, что возможно снижение среднеквадратичной ошибки (RMSE) оценок высоты объекта на основе данных БВС примерно на 20 % при использовании многоуровневых наземных контрольных точек (GCP). В Virginia E. [6] с помощью цифровой 3D-реконструкции растительного покрова показана разница в высоте растений при резких изменениях уклона, связанных с повреждениями. Показана возможность определения площадей поврежденных посевов. Предлагаемые методы могут быть использованы с применением БВС.

Цель исследований: изучение изменений высоты растений посевов сельскохозяйственных культур по данным беспилотных воздушных судов (БВС).

Задачи исследований:

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

Объект и методы исследований. Исследования проводились в учебно-опытном хозяйстве «Миндерлинское» Сухобузимского района Красноярского края в течение периода вегетации 2021 г. Опытное поле, состоящее из отдельных участков, представлено на рис. 1. Внесение удобрений производилось по северной части каждой полосы (шириной 10 м), южная оставалась без удобрений [7, 8]. Каждая полоса засеяна определенным видом сельскохозяйственных культур. В работе представлен анализ результатов обработки данных по полосе № 1, засеянной яровой пшеницей сорта «Новосибирская-15», № 2 – яровой пшеницей сорта «Новосибирская-15», № 3 – ячменем сорта «Ача». Все полосы разделены на варианты в соответствии с четырьмя видами обработки почв: «а» – вспашка (ПН-5–35 на 20–22 см); «б» – плоскорезная обработка (КПШК-3,8 на 20–22 см); «с» – поверхностная обработка (дискатор БДШ-5,6 на 8–10 см); «д» – прямой посев при нулевой обработке почвы (Агратор 4,8). В работе представлены данные по обработке «а» – вспашка.

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

Камера ZENMUSE X5S дает возможность получения цифровых изображений 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 информацию о высоте объектов (в том числе растений), состоянии рельефа и т.д.

Построение полетных заданий выполнялось в программном обеспечении DJI Pilot, поставляемом в комплекте с DJI Matrice 210 RTK V2. Высота полета от точки взлета 60 м. Каждая съемка проводилась в пять этапов и состояла из двух видов: надирная и наклонная. Во время первого этапа камера устанавливалась в надир. В последующие этапы наклон камеры состав-



Рис. 1. Месторасположение опытного поля учхоза “Миндерлинское” и его структура по видам обработки, культурам

Fig. 1. Study site (educational experimental farm “Minderlinskoe”) and its structure by types of treatment

лял 70° от вертикали, но менялось направление камеры: северное, восточное, южное, западное. Надирная съемка позволяет построить ортофотоплан и цифровую модель местности, однако для создания 3D-модели требуются измерения с наклоном камеры. Благодаря этому хорошо видны морфологические особенности растений. Также такие комбинированные съемки позволяют определять высоты объектов. Пространственное разрешение изображений составило 2,7 см.

Обработка полученных данных проводилась в специализированной программе AgisoftMetashape и QGIS.

Для построения карты высот растительности посевов (cropsurfacemodels – CSMs) использовались программы AgisoftMetashape и QGIS. В AgisoftMetashape после построения плотного облака точек вручную классифицировались участки с растительностью и незасеянной почвой. Далее отдельно строились цифровые модели местности (ЦММ) с использованием облака точек растительности (DSM – digitalsurfacemodel) и без нее (DTM – digitalterrainmodel). В итоге за каждую дату получено две ЦММ: с растительным покровом и без растительного покрова. В QGIS при помощи калькулятора растров из ЦММ с растительностью (DSM) вычиталась ЦММ без растительности (DTM) для получения растра со значениями высоты (CSMs).

CSM представляет собой множество параллелепипедов с одинаковым основанием, но разной высотой. Для вычисления занимаемого объема растительностью использовалась формула для расчета объема параллелепипеда

$$V = a * b * h,$$

где a – длина, b – ширина, h – высота параллелепипеда. Так как в данном случае длина и ширина параллелепипеда являются разрешением изображения – 2,7 см, площадь основания каждого параллелепипеда составляет 7,29 см². В программе QGIS при помощи инструмента «Калькулятор растра» растр CSM умножался на 7,29 для вычисления объема каждого параллелепипеда. Из полученного растра при помощи инструмента «Зональная статистика» извлекалась сумма значений по исследуемому участку.

Результаты исследований

На рис. 2 представлены карты пространственного распределения высот растений посевов пшеницы и ячменя в разные фазы вегетации (с 16 июня по 30 сентября 2021 г.) с пространственным разрешением 2.7 см. В начале периода вегетации, когда высота растений еще не достигла 10 см, затруднительно разделить растительного покрова от почвенного. По мере нарастания фитомассы расчет ЦММ происходит с наименьшей ошибкой, следовательно, ошибка определения высоты становится меньше. На рис. 2 видно, что на всех трех исследуемых полосах высота культур на удобренном фоне выше. Также отчетливо видны участки с высокими и низкими значениями высоты во все фазы вегетации.

На карте пространственного распределения высоты растений посевов от 30 сентября 2021 г. полосы оранжевого цвета показывают технологические участки уборки урожая комбайном Террион. Прямое комбайнирование Террионом проводится в 4–6-кратной повторности для учета урожая зерновых культур.

На рис. 2 хорошо видна изменчивость высот посевов в течение вегетационного периода. Карты пространственного распределения высоты растений позволяют оценивать внутрипольную неоднородность посевов. На полосе № 1 возрастает контрастность продольных полос к 9–27 августа 2021 г., на полосе № 2 ярче с 22.07.2021 по 27.08.2021 в восточной части участка проявляется устойчивая структура различных высот малого размера. На полосе № 3 структура, появившаяся 2.07.2021–22.07.2021 в период роста, к 9.08.2021, 27.08.2021 исчезает, что говорит о неравномерности темпов роста посевов ячменя на различных участках поля.

Расчет значений средней высоты растений по контурам 1, 2, 3 с учетом разделения на удобренный/неудобренный фон показал, что наибольшая высота растений зафиксирована 9 августа (рис. 3). Самые высокие значения зафиксированы на удобренных фонах: пшеница по кукурузе – 69 см, пшеница по пару – 66 см, ячмень – 68 см. В этот момент можно отследить разницу между удобренным и неудобренным фоном. Наибольшая разница зафиксирована на пшенице по кукурузе – 19 см, ячменю – 14 см, пшенице по пару – 5 см.

Использование карт высот растительности позволяет проводить расчет объема, занимаемого растительностью. Проведенные расчеты позволили установить объем, занимаемый растительностью, с учетом фона – удобренного (неудобренного) 9 августа 2021 г. (табл. 1).

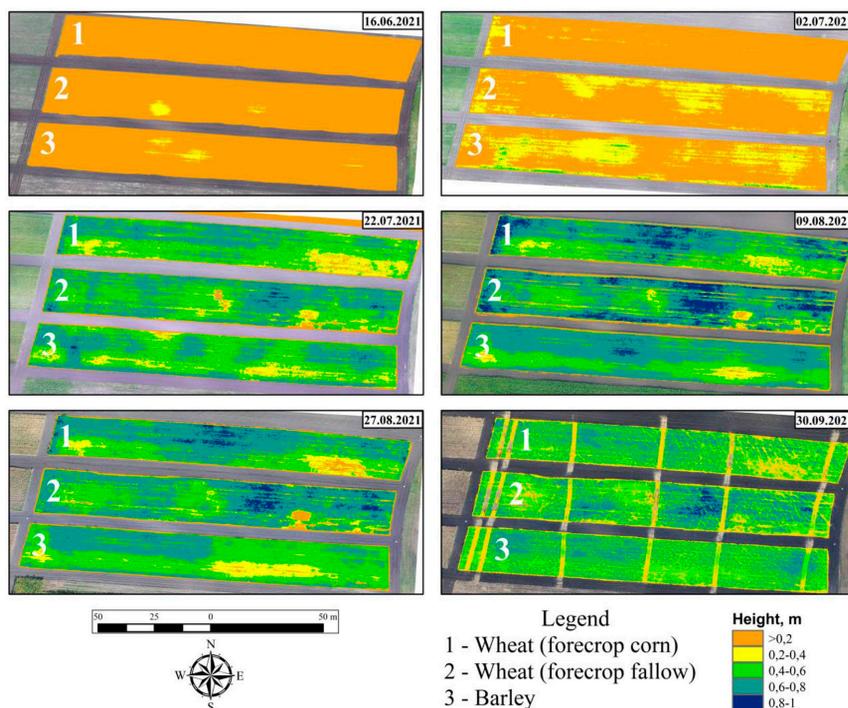


Рис. 2. Карта пространственного распределения высоты растений посевов сельскохозяйственных культур в разные фазы вегетации с пространственным разрешением 2.7 см. Периоды вегетации: 16.06.2021 – кушение, 02.07.2021 – начало выхода в трубку, 22.07.2021 – колошение, 09.08.2021, 27.08.2021, 30.09.2021 – созревание

Fig. 2. CSM map in different phase of vegetation with 2.7 cm spatial resolution. Vegetation stages: – 16.06.2021-tillering, 02.07.2021- stem elongation, 22.07.2021 – earing, 09.08.2021, 27.08.2021, 30.09.2021 – maturation

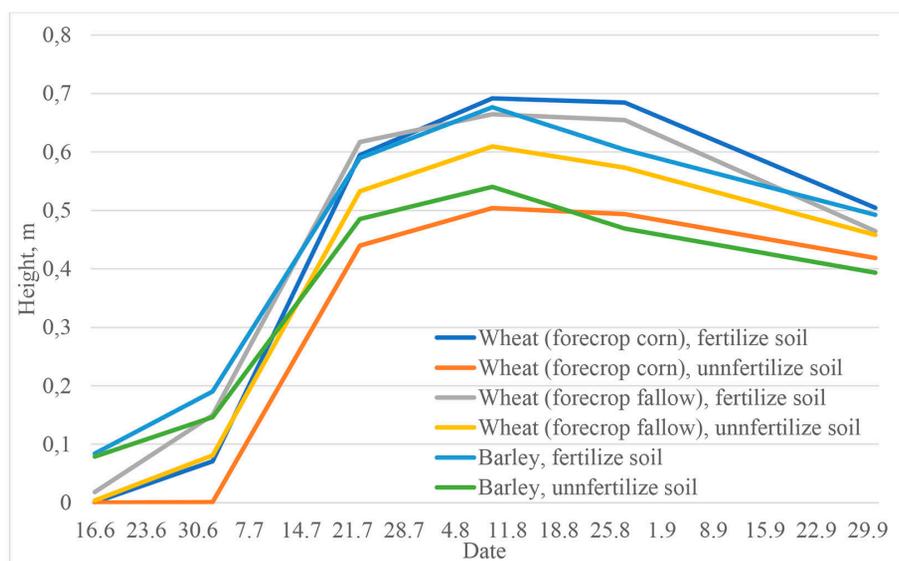


Рис. 3. Изменение высоты растений посевов зерновых культур в течение периода вегетации

Fig. 3. Change in cereal crops height during the vegetation season

Таблица 1. Объем, занимаемый растительностью 9 августа 2021 г.

Table 1. Volume occupied by vegetation on August 9, 2021

№ полоса	Объем, занимаемый растительностью (фон удобренный), м ³	Объем, занимаемый растительностью (фон неудобренный), м ³
1	918.2	644.4
2	979.7	836.2
3	938.4	814.7

Проведен анализ динамики высот растений на поперечных срезах полос 1–3 (рис. 4–6). Срезы выполнены на расстоянии 0,5 м от западного края посева. Установлено, что внутри срезов по полосам 1–3 наблюдается ряд особенностей, максимальные значения высот для различных посевов различны: полоса № 1 (пшеница по кукурузе) – 0,7–0,9 м; полоса № 2 (пшеница по пару) – 0,6–0,75 м; полоса № 3 (яровой ячмень) – 0,5–0,7 м. По приведенным срезам видно, что основной рост идет от 0 до максимума с 16 июня по 9 августа 2021 г. Наблюдаются устойчивые во времени участки с выпадением высот вниз (рис. 6, положение 14,6). Это может быть обусловлено свойствами почвы или локальными негативными условиями. На срезах такие особенности проявляются как точки, на картосхемах – как локальные участки. Отличия динамики высот по типам посевов показывает, что на полосе № 1 более высокое значение максимума; на полосе № 2 быстрее выходит на максимум (22 июля уже почти максимум). Динамика нарастания надземной фитомассы ячменя существенно отличается от таковой яровой пшеницы. Максимальные значения этого показателя синхронно меняются на фоне убранных растений, что может отражать уровень почвенного плодородия.

Установлена особенность влияния наличия удобренного фона на высоту растений. На полосах № 1 и 2, засеянных яровой пшеницей, различия на удобренном и неудобренном фоне незначительны. Максимальные отличия по средней высоте зафиксированы 16 июня во время кущения 46,4 и 38,6 % соответственно. В целом в период прохождения растениями таких фаз роста и развития, как выход в трубу, колошение и созревание, различие по высоте на разных фонах, не превышает 6 %.

Наиболее отличительным является изменение высоты растений на полосе № 3, засеянной ячменем. Во время кущения высота растений на разных фонах отличается незначительно (на 1,3 %). В последующие фазы роста и развития растений ячменя разница по высоте составляет от 15 до 61 %. Величина среднеквадратического отклонения на неудобренном фоне с 22 июля существенно не меняется и остается высокой.

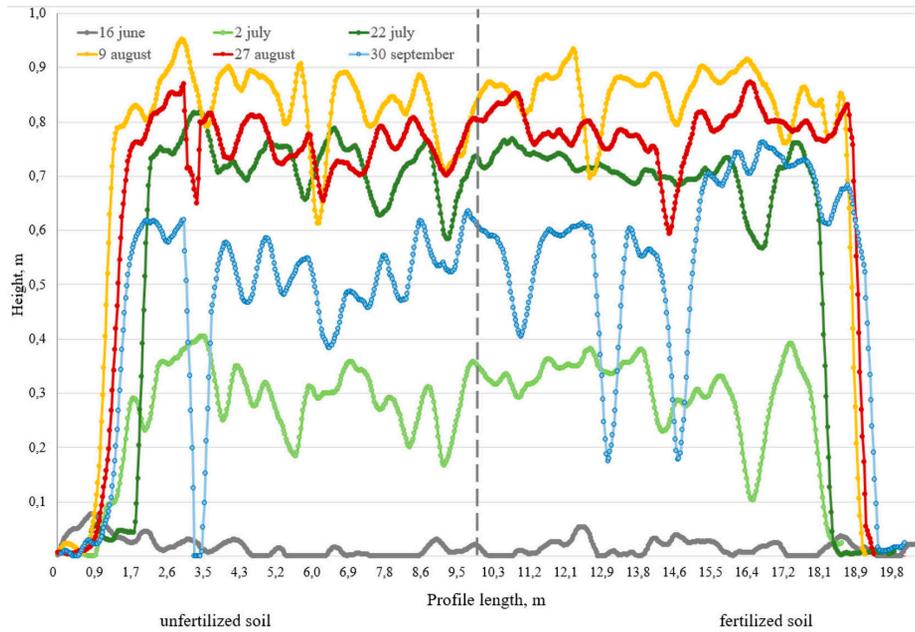


Рис. 4. Профиль высот поперечного среза посева яровой пшеницы, высеваемой после кукурузы, полоса № 1

Fig. 4. Height profile of a cross-section of wheat (forecrop corn), line 1

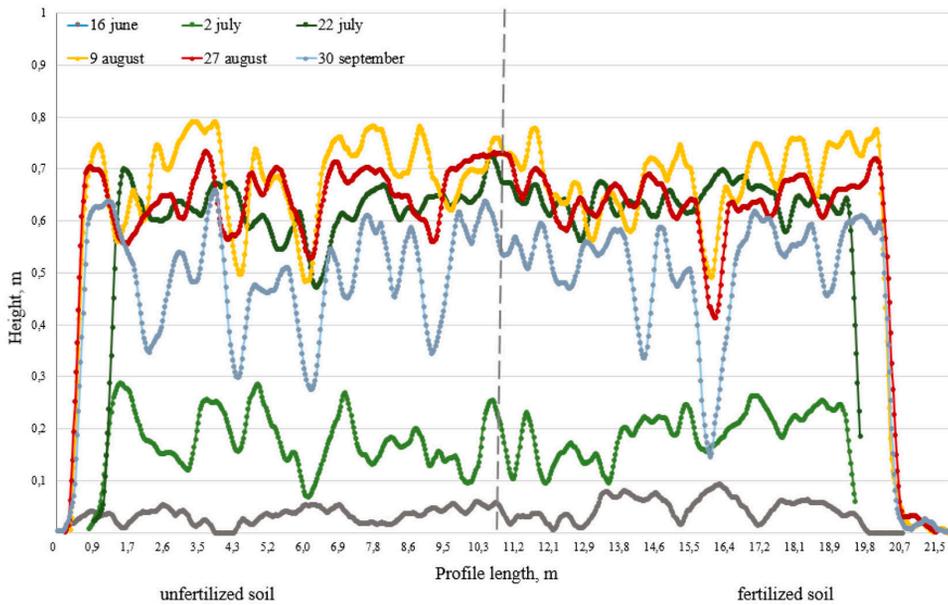


Рис. 5. Профиль высот поперечного среза посева яровой пшеницы, высеваемой после сидерального пара, полоса № 2

Fig. 5. Height profile of a cross-section of wheat (forecrop fallow), line 2

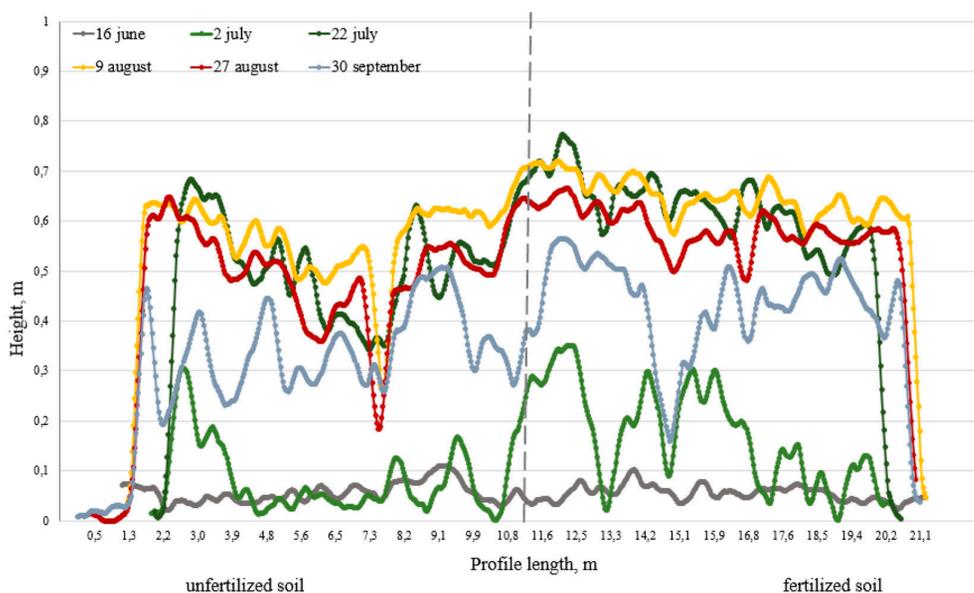


Рис. 6. Профиль высот поперечного среза посева ячменя, полоса № 3

Fig. 6. Height profile of a cross-section of barley, line 3

Выводы

В результате исследований проведено изучение изменений высоты растений посевов зерновых культур в течение периода вегетации. Построены карты пространственного распределения высоты растений посевов сельскохозяйственных культур в разные фазы вегетации. Представлена оценка динамики роста яровой пшеницы и ячменя методами дистанционного зондирования. Показана эффективность применения беспилотных летательных аппаратов для определения высот растений в посевах сельскохозяйственных культур. Установлена возможность выявления внутривольной неоднородности посевов на различных стадиях роста и развития сельскохозяйственных культур.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что разработанную методику можно использовать для мониторинговой оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур с целью дифференцированного внесения минеральных удобрений, выполнения некорневой подкормки посевов в период вегетации, а также для борьбы с вредителями, болезнями и сорняками, прогнозирования уровня урожайности.

Список литературы / References

- [1] Tianjin Xie, Jijun Li, Chenghai Yang, Zhao Jiang, Yahui Chen, Liang Guo, Jian Zhang Crop height estimation based on UAV images: Methods, errors, and strategies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 185, 106155
- [2] Juliane Bendig, Kang Yu, Helge Aasen, Andreas Bolten, Simon Bennertz, Janis Broscheit, Martin L. Gnyр, Georg Bareth 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, 39, 79–87

[3] Xiongzhe Han, J. Alex Thomasson, G. Cody Bagnall, N. Ace Pugh, David W. Horne, William L. Rooney, Jinha Jung, Anjin Chang, Lonesome Malambo, Sorin C. Popescu, Ian T. Gates and Dale A. Cope Measurement and Calibration of Plant-Height from Fixed-Wing UAV Images, *Sensors*. 2018. 18, 4092; doi:10.3390/s18124092

[4] Мальчиков Н.О., Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В., Ивченко В.К., Шевырнов А.П. Определение высоты растений сельскохозяйственных культур на основе данных измерений беспилотных воздушных судов, *Вестник КрасГАУ*, 2020, № 12 (165), 46–53 [Malchikov N.O., Botvich I. Yu., Emelyanov D.V., Ivchenko V.K., Shevyrnogov A.P. Determining the height of agricultural crops based on measurements of unmanned aircraft, *The Bulletin of KrasGAU*, 2020, No 12 (165), 46–53 (in Russian)]

[5] Campos, I.; González-Gómez, L.; Villodre, J.; Calera, M.; Campoy, J.; Jiménez, N.; Plaza, C.; Sánchez-Prieto, S.; Calera, A. Mapping within-field variability in wheat yield and biomass using remote sensing vegetation indices. *Precis. Agric.* 2019. 20. 214–236.

[6] Virginia E. Garcia Millan, Cassidy Rankine and G. Arturo Sanchez-Azofeifa Crop Loss Evaluation Using Digital Surface Models from Unmanned Aerial Vehicles Data, *Remote Sens.* 2020. 12. 981; doi:10.3390/rs12060981

[7] Ивченко В.К., Демьяненко Т.Н., Ильченко И.О., Шевырнов А.П., Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В., Ларько А.А., Мальчиков Н.О. 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 (154), 3–11 [Ivchenko V.K., Demyanenko T.N., Ilchenko I.O., Shevyrnogov A.P., Botvich I. Yu., Emelyanov D.V., Larko A.A., Malchikov N.O. The use of ground-based spectrophotometric measurements to identify the effect of basic tillage methods on the process of growth of above-ground phytomass of spring wheat in grain-crop rotation, *The Bulletin of KrasGAU*, 2020, No 1 (154), 3–11 (in Russian)]

[8] Ивченко В.К., Демьяненко Т.Н., Шевырнов А.П., Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В., Ларько А.А. Оценка агротехнических факторов возделывания ячменя по ресурсосберегающим технологиям с помощью наземной спектрометрии. *Вестник КрасГАУ*, 2019, № 5 (146), 86–93 [Ivchenko V.K., Demyanenko T.N., Shevyrnogov A.P., Botvich I. Yu., Emelyanov D.V., Larko A.A. The assessment of agrotechnical factors of barley cultivation on resource-saving technologies by means of land spectrometry, *The Bulletin of KrasGAU*, 2019, No 5 (146), 86–93 (in Russian)]