

Т. Н. Мыслыва¹, Б. В. Шелюто¹, П. П. Надточий², О. А. Куцаева¹¹Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, Горки, Могилевская область, Беларусь²Институт сельского хозяйства Полесья Национальной академии аграрных наук Украины, Житомир, Украина**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ С БЛА, ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОДУКТИВНОСТИ БИОМАССЫ *SILPHIUM PERFOLIATUM***

Аннотация: Агромониторинг является одним из важнейших источников получения актуальной и оперативной информации о состоянии сельскохозяйственных культур. Ускорить и удешевить процесс его проведения возможно посредством использования данных дистанционного зондирования (ДДЗ), получаемых с помощью беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Оценка возможности использования ДДЗ сверхвысокого разрешения для определения продуктивности биомассы *Silphium perfoliatum* выполнялась с использованием БЛА Phantom-4ProV 2.0. Съемку проводили в режиме RGB, высота съемки – 50 м, пространственное разрешение – 2,5 см. По результатам съемки создавались карта высот и ортомозаика, используемые в дальнейшем для оценки продуктивности растений. Для получения значений высоты растений находили разницу между высотами растительного покрова, полученными из раstra модели поверхности, и минимальной высотой, определенной в пределах раstra. Фактическую высоту растений, измеренную в полевых условиях, сравнивали с данными, полученными с помощью БЛА, затем определяли продуктивность биомассы, рассчитанную по фактической и прогнозной высотам. Коэффициент детерминации для уравнения парной линейной регрессии между фактическим и прогнозным значениями продуктивности составил 0,97, а величина средней ошибки аппроксимации – 3,3 %. Для верификации полученных результатов в пределах территории исследования в полевых условиях отбирали 60 образцов биомассы, длину растений в которых определяли с помощью рулетки, а места отбора образцов координировали с помощью GPS-позиционирования. По откалиброванной ортомозаике на пиксельной основе по нормализованным RGB-каналам определяли 13 вегетационных индексов, из которых четыре (ExG, VARI, WI и EXGR) оказались пригодными для создания прогнозной модели множественной линейной регрессии, позволяющей осуществлять оценку и прогноз продуктивности биомассы *Silphium perfoliatum* в фазу стеблевания с ошибкой, не превышающей 2 %. Результаты исследования могут быть полезны как при разработке методики прогнозирования, так и при непосредственном прогнозировании продуктивности биомассы *Silphium perfoliatum* и других кормовых культур, в частности *Helianthus annuus* и *Helianthus tuberosus*. **Благодарности.** Работа выполнена в рамках ГПНИ «Качество и эффективность агропромышленного комплекса».

Ключевые слова: агромониторинг, сельскохозяйственные культуры, моделирование, прогнозирование, регрессионные модели, дистанционное зондирование, БЛА, вегетационный индекс, продуктивность, биомасса, *Silphium perfoliatum*

Для цитирования: Использование данных дистанционного зондирования, полученных с БЛА, для оценки продуктивности биомассы *Silphium perfoliatum* / Т. Н. Мыслыва, Б. В. Шелюто, П. П. Надточий, О. А. Куцаева // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2021. – Т. 59, №2. – С. 186–197. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-2-186-197>

Tamara N. Myslyva¹, Branislava V. Sheliuta¹, Petr P. Nadtochyj², Alesia A. Kutsayeva¹¹Belarusian State Agricultural Academy, Gorki, Mogilev Region, Republic of Belarus²Institute of Agriculture of Polesie NAAS of Ukraine, Kiev highway, Zhytomyr, Zhytomyr Region, Ukraine**USE OF REMOTE SENSING DATA OBTAINED FROM UAVS TO ASSESS THE BIOMASS PRODUCTIVITY OF *SILPHIUM PERFOLIATUM***

Abstract: Agromonitoring is one of the most important sources of obtaining up-to-date and timely information about the state of agricultural crops. It is possible to speed up and reduce the cost of its implementation process using remote sensing data (RSD) obtained with the help of unmanned aerial vehicles (UAVs). Possibility of using ultra-high-resolution remote sensing to determine productivity of *Silphium perfoliatum* biomass has been evaluated using Phantom-4ProV 2.0 UAV. The shooting was carried out in RGB mode, the shooting height was 50 m, the spatial resolution was 2.5 cm. Based on the results of the survey, a height map and orthomosaic were created, which were later used to assess productivity of plants. To obtain the plant height values, the difference between the vegetation cover heights obtained from the surface model raster and the minimum height determined within the raster has been calculated. The actual height of plants measured in the field was compared with the data obtained using the UAV, and after the biomass productivity calculated from the actual and predicted heights was determined. The determination coefficient for equation of paired linear regression between the actual and predicted values of productivity made 0.97, and the value of the average approximation error was 3.3 %. To verify the results obtained, 60 samples of biomass were taken in the field within the study area, with the length of the plants determined using a tape measure,

and the sampling sites coordinated using GPS positioning. 13 vegetation indices have been determined using pixel-based calibrated orthomosaic and normalized RGB channels, four of which (ExG, VARI, WI, and EXGR) showed to be suitable for creating a predictive model of multiple linear regression, which allows estimating and predicting the productivity of *Silphium perfoliatum* biomass during stemming phase with an error not exceeding 2 %. The results of the study can be useful both in development of prediction methods and in the direct prediction of *Silphium perfoliatum* biomass and other forage crops productivity, in particular *Helianthus annuus* and *Helianthus tuberosus*. Acknowledgments. The research was carried out as part of the state scientific and technical program “Quality and Efficiency of Agroindustrial Complex”.

Keywords: agromonitoring, crops, simulation, prediction, regression models, remote sensing, UAV, vegetation index, productivity, biomass, *Silphium perfoliatum*

For citation: Myslyva T. N., Sheliuta B. V., Nadochjy P. P., Kutsayeva A. A. Use of remote sensing data obtained from UAVs to assess the biomass productivity of *Silphium perfoliatum*. *Vesti Natsyyanal'nay akademii navyk Belarusi. Seryya agrarnykh navyk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2021, vol. 59, no 2, pp. 186-197 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-2-186-197>

Введение. Вследствие глобализации мировой экономики сельское хозяйство как развитых, так и развивающихся стран сталкивается с рядом серьезных проблем [1]. Одной из них является поиск путей увеличения экономической эффективности аграрного производства в условиях удорожания энергоресурсов, сырья для производства минеральных удобрений, дефицита органических удобрений и сокращения площади сельскохозяйственных угодий, которое в странах Европы в последние десять лет составляет в среднем 0,7 % в год [2], а в Беларуси достигает 0,1–0,4 %¹. Действенным способом успешного решения данной проблемы является внедрение точного земледелия – современной концепции управления сельским хозяйством, использующей цифровые технологии для мониторинга и оптимизации процессов сельскохозяйственного производства [3, 4]. Геоинформационные технологии и дистанционное зондирование являются неотъемлемой составляющей системы точного земледелия, позволяющей использовать цифровые методы для мониторинга и оптимизации процессов в агросфере [5, 6].

Агромониторинг – один из важнейших источников получения актуальной и оперативной информации о состоянии сельскохозяйственных культур, позволяющий своевременно выявить отклонения в росте и развитии растений, определить их причины и принять оперативные управленческие решения по минимизации негативных воздействий. Однако это довольно трудоемкий процесс, требующий значительных затрат сил, средств и времени. Ускорить и удешевить проведение мониторинга состояния сельскохозяйственных культур возможно посредством использования данных дистанционного зондирования Земли, получаемых с помощью беспилотных летательных аппаратов (БЛА), используемых в коммерческих целях с начала 1980-х годов. Возможности их практического применения постоянно расширяются, а мировой рынок, согласно прогнозам, к 2020 г. возрастет до 9,5 млрд долларов [7–9].

Несмотря на то, что использование БЛА для целей аграрного производства довольно распространено в странах Западной Европы, США, Китае, в сельскохозяйственной отрасли Беларуси данное оборудование все еще не нашло широкого применения, однако постепенно внедряется в практику. Перспективным направлением является использование данных дистанционного зондирования сверхвысокого разрешения, полученных с БЛА, для мониторинга и прогноза продуктивности кормовых и зерновых культур [10, 11]. Однако методика выполнения такого вида работ различается в разрезе отдельных культур, в частности, относящихся к нетрадиционным кормовым, и нуждается в усовершенствовании и адаптации к конкретным экономическим и агроэкологическим условиям. Так, требует дополнительного изучения возможность использования данных о высоте растений и различных вегетационных индексов, рассчитанных по результатам RGB-съемки, для оперативной оценки продуктивности биомассы сельскохозяйственных растений.

Цель исследования – оценить возможность использования данных дистанционного зондирования сверхвысокого разрешения, полученных с помощью БЛА, для оценки продуктивности биомассы *Silphium perfoliatum*.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: 1) установить возможность использования цифровой модели поверхности растительного покрова, созданной по результатам аэрофотосъемки, для определения продуктивности биомассы; 2) построить ортомозаику,

¹ Сельское хозяйство Республики Беларусь : стат. сб. / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, Минск. 2019. 212 с.

рассчитать величину вегетационных индексов и определить возможность их использования для оценки продуктивности биомассы; 3) создать прогнозную модель, позволяющую определять продуктивность биомассы *Silphium perfoliatum* по данным дистанционного зондирования сверхвысокого разрешения.

Объекты и методы исследований. Исследования выполнялись в 2020 г. на территории Горецкого района Могилевской области Республики Беларусь на базе кафедр геодезии и фотограмметрии, кормопроизводства и хранения продукции растениеводства УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия». На рис. 1. представлены сведения о расположении объекта исследований в пределах опытного поля УО БГСХА «Тушково» (Могилевская область, Горецкий район, пос. Гошч-Чарны).

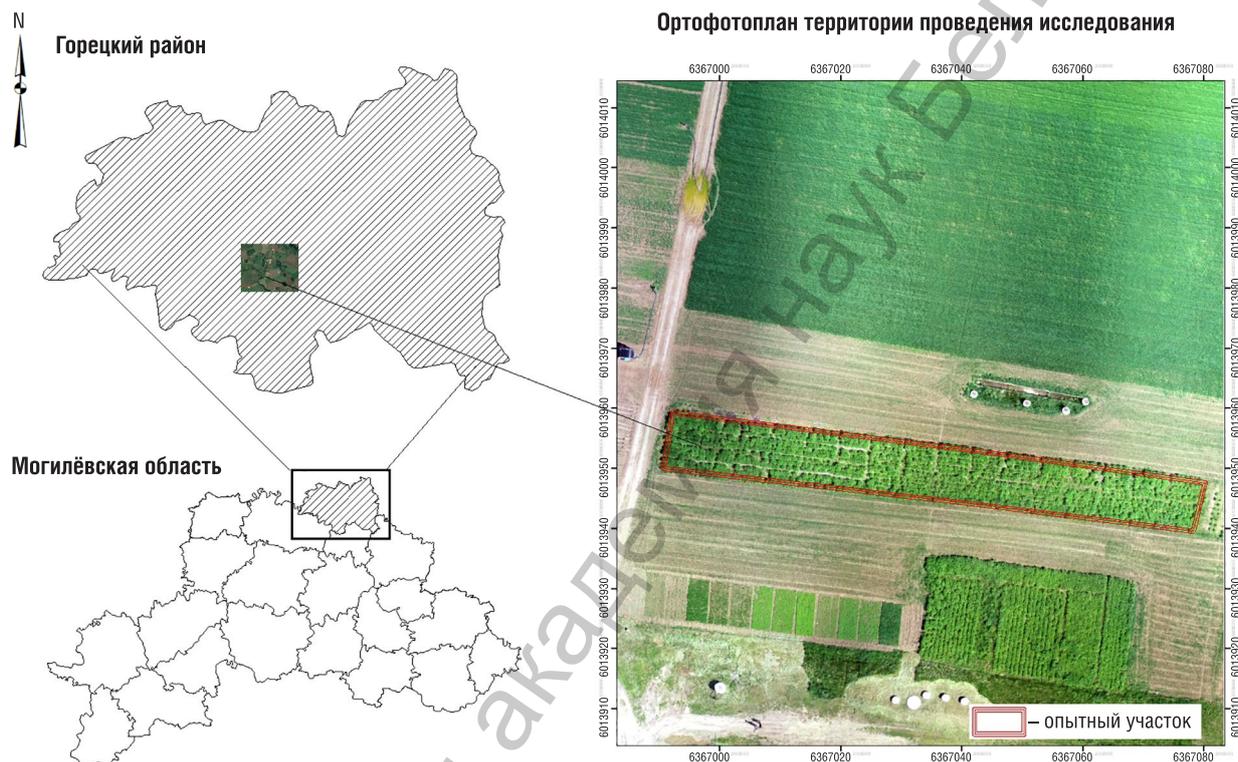


Рис. 1. Расположение объекта исследований – опытное поле УО «БГСХА» «Тушково», пос. Гошч-Чарны, Горецкий район, Могилевская область, 2020 г.

Fig. 1. Location of the research facility - experimental field of EI “BSAA” “Tushkovo”, v. Goshch-Charny, Goretzky district, Mogilev region, 2020

Почва опытного участка – дерново-подзолистая, слабо- и среднесуглинистая (Umbric Retisols, WRB, 2014; Eutric Podzoluvisols, FAO, 1988). Агротехнические показатели пахотного слоя 0–20 см следующие: pH_{KCl} 6,0–6,6; гидролитическая кислотность – 1,17–0,86 мг-экв. на 100 г почвы; степень насыщенности основаниями – 91–96 %; содержание гумуса (по Тюрину) – 0,73–1,65 %; подвижных соединений P_2O_5 и K_2O – 97–181 и 164–192 мг на 1 кг почвы соответственно.

Объектом исследования являлась продуктивность биомассы *Silphium perfoliatum* сорта Овари гигант (Венгрия), возраст посадки – 6 лет, фаза развития – полное стеблевание.

Площадь опытного участка – 980 м², площадь учетного участка с вегетирующими растениями *Silphium perfoliatum* составила 788 м² (по периметру участка оставались буферные зоны для предотвращения зашумления полученного изображения).

Оценку возможности использования данных дистанционного зондирования сверхвысокого разрешения для определения продуктивности биомассы *Silphium perfoliatum* выполняли с использованием беспилотного летательного аппарата Phantom-4ProV 2.0, камера которого оснащена CMOS-матрицей размером 1 дюйм, позволяющей получать фотоизображения с разрешением 20 Мп. Камера была откалибрована с помощью программного продукта DJI Assistant,

ее выдержка составляла $1/400$ с, а диафрагма – $f/2,8$. Съемку проводили в однородных и стабильных погодных и радиационных условиях в режиме RGB, высота съемки составляла 50 м, пространственное разрешение – 2,5 см. Продольное и поперечное перекрытие съемки составляло 80 %, количество полученных снимков – 236 шт., дата съемки – 6 июня 2020 г.

Для выполнения аэрофотосъемки и обработки полученных результатов использовали следующее программное обеспечение: 1) полетное задание формировали с использованием программного продукта Drone Deploy; 2) обработку данных аэрофотосъемки, построение карты высот и создание ортомозаики выполняли с использованием программного продукта Agisoft PhotoScan Professional; 3) расчет вегетационных индексов производили с использованием программного продукта QGIS версии 3.12; 4) выполнение геопространственного и геостатистического анализа – с использованием программного продукта ArcGIS версии 10.5.

Для вычисления величин вегетационных индексов использовали функциональные возможности инструмента «Калькулятор растра» программного продукта QGIS версии 3.12, а для вычисления площади растений с той либо иной величиной индекса – функциональные возможности набора инструментов «Зональные» программного продукта ArcGIS версии 10.5. Для верификации полученных результатов в день съемки в пределах территории исследования в полевых условиях рендомизированно было отобрано 60 образцов биомассы *Silphium perfoliatum*, длину растений в которых определяли рулеткой, а места отбора координировали с помощью спутникового приемника Javad Triumph-LS GPS методом RTK GNSS с точностью до 1,5 см. Для каждого отобранного образца определяли также его массу (кг) и объемную массу ($\text{кг}/\text{м}^3$). На рис. 2 показаны места локализации отобранных образцов растений *Silphium perfoliatum*, которые координировали с помощью с помощью GNSS-позиционирования.



Рис. 2. Расположение мест отбора контрольных образцов фитомассы, опытное поле УО БГСХА «Тушково», пос. Гошч-Чарны, Горецкий район, Могилевская область, 2020 г.

Fig. 2. Location of control sampling sites of phytomass reference samples, experimental field of EI “BSAA” “Tushkovo”, v. Goshch-Charny, Goretsky district, Mogilev region, 2020

Статистическую обработку полученных результатов, построение регрессионных моделей и их кросс-валидацию выполняли в программе Statistica 13.0.

Результаты и их обсуждение. Оценку продуктивности биомассы растений *Silphium perfoliatum* выполняли в несколько этапов, первым из которых являлось построение цифровой модели поверхности растительного покрова. Модель создавали посредством выполнения обработки результатов аэрофотосъемки с помощью функциональных возможностей Agisoft PhotoScan Professional, в результате чего была получена карта высот растительного покрова в tif-формате с разрешением 2,5 см. Минимальная высота построенной поверхности составила 143,64 см, максимальная – 144,66 см, средняя – 144,17 см, среднеквадратическое отклонение – 0,18 см. Из полученной карты высот было извлечено облако, состоящее из 364987 точек высот, представляющих территорию выполнения исследования. Для получения значений высоты растений модель поверхности без растительного покрова вычитали из цифровой модели поверхности растительного покрова, определенной в пределах растра [11, 12] (рис. 3).



Рис. 3. Карта высот растительного покрова, полученная по результатам съемки с БЛА (беспилотные летательные аппараты), опытное поле УО БГСХА «Тушково», пос. Гошч-Чарны, Горецкий район, Могилевская область, 2020 г.

Fig. 3. Map of vegetation cover heights obtained from the results of the survey from the UAV (unmanned aerial vehicles), experimental field of EI “BSAA” “Tushkovo”, v. Goshch-Charny, Goretsky district, Mogilev region, 2020

Растровое изображение поверхности высоты растительного покрова переклассифицировали на 11 классов с шагом 0,1 м, поскольку минимальная идентифицированная высота растений составила 0,1 м, а максимальная – 1,1 м. Такое колебание высот связано с тем, что в пределах исследуемого участка размещались варианты с различными схемами и способами посадки растений. Далее с использованием функциональных возможностей набора инструментов «Зональные» модуля «Пространственный анализ» ArcGIS 10.5 определяли площадь (зону), занимаемую в пределах территории исследования растениями с той или иной высотой, и вычисляли среднюю продуктивность биомассы *Silphium perfoliatum* в фазу стеблевания для каждой из зон (табл. 1).

Минимальная урожайность сырой биомассы *Silphium perfoliatum* составила 1,49 т/га, максимальная – 1,64 т/га, а средневзвешенная урожайность – 8,63 т/га, тогда как для сухой биомассы минимальная, максимальная и средневзвешенная урожайность достигали 0,29, 3,15 и 1,72 т/га соответственно. При этом максимальная площадь в пределах исследуемого участка – 469,16 м² оказалась занята растениями высотой 0,5–0,7 м.

Таблица 1. Продуктивность биомассы *Silphium perfoliatum* в фазу стеблевания, определенная по данным съемки БЛА, опытное поле УО БГСХА «Тушково», пос. Гошч-Чарны, Горецкий район, Могилевская область, 2020 г.

Table 1. Productivity of *Silphium perfoliatum* biomass in the stalking phase, determined based on data of UAV survey, experimental field of EI “BSAA” “Tushkovo”, v. Goshch-Charny, Goretsky district, Mogilev region, 2020

| Высота растения, м | Площадь, занимаемая растениями, м ² | Объем биомассы, м ³ | Продуктивность биомассы | | | |
|--------------------|--|--------------------------------|-------------------------|-------|-------------------|------|
| | | | сырой | | сухой | |
| | | | кг/м ² | т/га | кг/м ² | т/га |
| 0,1 | 5,53 | 0,55 | 0,83 | 1,49 | 0,16 | 0,29 |
| 0,2 | 24,76 | 4,95 | 7,393 | 2,99 | 1,42 | 0,57 |
| 0,3 | 55,15 | 16,54 | 24,71 | 4,48 | 4,74 | 0,86 |
| 0,4 | 99,22 | 39,67 | 59,25 | 5,97 | 11,38 | 1,15 |
| 0,5 | 149,43 | 74,72 | 111,57 | 7,47 | 21,42 | 1,43 |
| 0,6 | 172,10 | 103,26 | 154,20 | 8,96 | 29,61 | 1,72 |
| 0,7 | 147,63 | 103,34 | 154,32 | 10,45 | 29,63 | 2,01 |
| 0,8 | 92,83 | 74,26 | 110,89 | 11,95 | 21,29 | 2,29 |
| 0,9 | 35,16 | 31,65 | 47,26 | 13,44 | 9,07 | 2,58 |
| 1,0 | 6,05 | 6,05 | 9,04 | 14,93 | 1,74 | 2,87 |
| 1,1 | 0,07 | 0,08 | 0,13 | 16,43 | 0,02 | 3,15 |

Для определения достоверности выполнения оценки продуктивности биомассы с использованием данных аэрофотосъемки фактическую высоту растений, измеренную в полевых условиях, сравнивали с данными, полученными с помощью БЛА, и определяли продуктивность растений, рассчитанную по фактической и прогнозной высотам. Полученные результаты довольно хорошо соотносятся между собой, а их взаимосвязь описывается линейной зависимостью. Коэффициент корреляции между фактическим и прогнозным значениями продуктивности биомассы составил 0,97, а величина средней ошибки аппроксимации – 3,3 %, что свидетельствует о высокой достоверности установленной зависимости (рис. 4).

Однако необходимо отметить тот факт, что точность прогнозирования зависит как от условий полета и выбранных параметров съемки, так и от вида и степени развития самой культуры. В нашем случае высокая точность обусловлена прежде всего тем, что растения сальфии на момент съемки были достаточно хорошо сформированными и практически образовали

сплошной покров. Представленные результаты хорошо соотносятся с данными, полученными другими исследователями, которыми установлено, что для ячменя ярового коэффициент корреляции между фактическим и прогнозным значениями продуктивности, определенным по данным высоты растений, полученным с БЛА, составляет 0,83–0,91 [11, 13], для пшеницы яровой – 0,89–0,98 в зависимости от фазы развития [14], для кукурузы на зерно колеблется от 0,89 до 0,93 [15], для пастбищных трав достигает 0,57 [16].

При проведении мониторинга сельскохозяйственных культур важным является получение информации не только о величине сформированной на единицу площади биомассы, но и об общем состоянии вегетирующих растений, наступлении той либо иной фазы их роста, степени развития болезней, эффективности применения средств защиты, масштабах воздействия неблагоприятных природных факторов. Источником получения такой информации служат различные вегетационные индексы, рассчитываемые по результатам спутниковой либо аэрофотосъемки.

С целью установления возможности использования данных о величине вегетационных индексов для оценки продуктивности биомассы *Silphium perfoliatum* по откалиброванной ортомозаике на пиксельной основе по нормализованным RGB-каналам определяли следующие вегетационные индексы (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Вегетационные индексы, определяемые на базе съемки БЛА в режиме RGB, 2020 г.
Table 2. Vegetation indices determined based on UAV images in RGB mode, 2020

| Вегетационный индекс | Формула для определения вегетационного индекса | Источник информации |
|--|---|---|
| Красный-зеленый-синий вегетационный индекс (RGBVI) | $\frac{((R_G R_G) - (R_R R_B))}{((R_G R_G) + (R_R R_B))}$ | Bendig et al., 2015 [11] Lussem et al., 2018 [17] Barbosa et al., 2019 [18] |
| Индекс зеленых листьев (GLI) | $\frac{(2R_G - R_R - R_B)}{(2R_G + R_R + R_B)}$ | Louhaichi et al., 2001 [19] Hunt et al., 2013 [20] Bendig et al., 2015 [11] |
| Видимый атмосфероустойчивый индекс (VARI) | $\frac{(R_G - R_R)}{(R_G + R_R - R_B)}$ | Gitelson et al., 2002 [21] Hunt et al., 2013 [20] Bendig et al., 2015 [11] |
| Нормализованный разностной зеленый/красный индекс (NGRDI) | $\frac{(R_G - R_R)}{(R_G + R_R)}$ | Tucker, 1979 [22] Hunt et al., 2013 [20] Bendig et al., 2015 [11] |
| Избыточный зеленый индекс (ExG) * | $2 R_G - R_R - R_B$ | Woebbecke et al., 1995 [23] Beniaich et al., 2019 [24] |
| Индекс Веббеке (WI)* | $\frac{(R_G - R_B)}{(R_R - R_G)}$ | Woebbecke et al., 1995 [23] Beniaich et al., 2019 [24] |
| Разность избыточного зеленого и избыточного красного индексов (EXGR) * | $ExG - 1,4R_R - R_G$ | Meyer and Netto, 2008 [25] Beniaich et al., 2019 [24] |
| Цветовой индекс растительности (CIVE) * | $0,441 R_R - 0,881 R_G + 0,385 R_B + 18,78745$ | Kataoka et al., 2003 [26] Beniaich et al., 2019 [24] |
| Вегетативный индекс (VEG) | $R_G / R_R^a * R_B^{(1-a)}$, где $a = 0,667$ | Marchant and Onyango, 2000 [27] Hague et al., 2006 [28] |

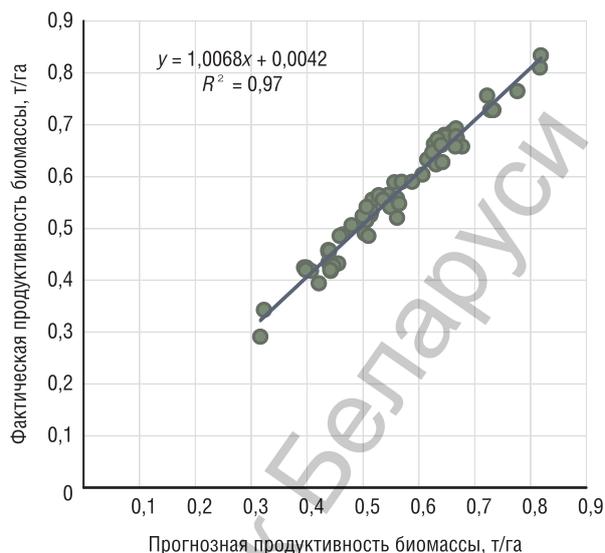


Рис. 4. Зависимость между фактической и прогнозной продуктивностью биомассы *Silphium perfoliatum*, 2020 г.

Fig. 4. Correlation of actual and predicted productivity of the *Silphium perfoliatum* biomass, 2020

| Вегетационный индекс | Формула для определения вегетационного индекса | Источник информации |
|--|--|--|
| Комбинированный вегетационный индекс 1 (COMB1) | $0,25ExG + 0,3EXGR + 0,33CIVE + 0,12VEG$ | Guijarro et al., 2011 [29] Beniaich et al., 2019 [24] |
| Комбинированный вегетационный индекс 2 (COMB2) | $0,36ExG + 0,47CIVE + 0,17VEG$ | Guijarro et al., 2011 [29] Beniaich et al., 2019 [25] |
| Соотношение зеленый/красный (GR) | R_R / R_G | Beniaich et al., 2019 [24] |
| Почвенный скорректированный растительный индекс (SAVI) | $1,5*(R_G - R_R) / (R_G + R_R + 0,5)$ | Li et al., 2010 [30] Beniaich et al., 2019 [24] |

П р и м е ч а н и е. R_R – красный канал съемки; R_G – зеленый канал съемки; R_B – синий канал съемки; «*» – для расчетов использовали нормализованные RGB-каналы.

Отметим, что все вегетационные индексы рассчитывались с использованием только трех видимых каналов спектра, а их величина прямо пропорционально зависит от содержания в зеленых растениях хлорофилла, являющегося важной переменной для оценки состояния сельскохозяйственных культур из-за его непосредственной связи с содержанием в листьях азота [14].

Для определения участков с растительностью и без нее в пределах раstra выполняли предварительную сегментацию интересующей области. Далее по сегментированному изображению создавали обучающую выборку с двумя классами объектов – с растительностью и без нее, проводили классификацию изображения с использованием машинного обучения методом опорных векторов (параметр Каппа составил 94 %). Полученный растр переклассифицировали и на его основе создавали маску поверхности без растительности, по которой выполняли обрезку ортофотомозаики перед определением вегетационных индексов.

Средние значения величины вегетационных индексов RGBVI, NDRGI и GLI, а также вегетационных индексов SAVI и ExG оказались довольно схожими между собой, а средние значения индексов GR и VEG имели наибольшие значения (табл. 3).

Однако результаты оценки взаимосвязи между величинами вегетационных индексов и продуктивностью биомассы *Silphium perfoliatum* свидетельствуют о том, что, несмотря на схожесть абсолютных величин, эти вегетационные индексы характеризуются различной степенью взаимосвязи с продуктивностью биомассы (табл. 4).

Т а б л и ц а 3. Статистические характеристики величины вегетационных индексов, полученных из ортомозаики, созданной на базе съемки БЛА в режиме RGB, 2020 г.

Table 3. Statistical characteristics of vegetation indices obtained from the orthomosaic created based on UAV images in RGB mode, 2020

| Вегетационный индекс | Среднее значение | Стандартное отклонение, Sd | Минимальное значение | Максимальное значение |
|----------------------|------------------|----------------------------|----------------------|-----------------------|
| CIVE | 18,54 | 0,32 | 18,06 | 19,23 |
| WI | 7,64 | 38,88 | -49,53 | 92,0 |
| VARI | 1,69 | 3,99 | -4,02 | 12,0 |
| VEG | 24,26 | 25,47 | 1,63 | 83,0 |
| SAVI | 0,82 | 0,28 | 0 | 1,0 |
| RGBVI | 0,45 | 0,37 | -0,32 | 1,0 |
| NDRGI | 0,37 | 0,33 | -0,03 | 1,0 |
| GLI | 0,37 | 0,41 | -0,56 | 0,81 |
| EXGR | -0,11 | 0,56 | -0,76 | 1,0 |
| ExG | 0,88 | 0,59 | 0,17 | 2,0 |
| COMB1 | 8,92 | 3,22 | 6,24 | 16,24 |
| COMB2 | 12,79 | 4,31 | 9,12 | 23,24 |
| GR | 35,84 | 34,38 | 1,29 | 110,0 |

В частности, наибольшая сила прямой линейной взаимосвязи величины вегетационного индекса с продуктивностью растений установлена для индексов ExG, RGBVI, NDRDI, а минимальной связью характеризуются индексы VARI и SAVI. На высокую информативность вегетационного индекса ExG указывается в работе [24], а индекса RGBVI – в работе [11]. Вегетационный индекс SAVI наиболее пригоден для разграничения участков, занятых растительностью, и участков с открытой почвой, однако, как и комбинированные индексы COMB1 и COMB2, непригоден для оценки продуктивности биомассы. Об его низкой информативности свидетельствуют и результаты исследований, представленные в работе [31]. Полученные результаты соотносятся с данными [16], в которых при установлении возможности использования вегетационных индексов RGBVI, GLI, NDRDI и VARI для оценки продуктивности биомассы луговых трав среднеквадратическая ошибка оценки составила 6,02 т/га, 5,04, 1,93 и 1,42 т/га соответственно.

Т а б л и ц а 4. Взаимосвязь между величинами вегетационных индексов, полученных из ортомозаики, и продуктивностью биомассы *Silphium perfoliatum*, $n = 60$, 2020 г.

Table 4. Correlation of values of vegetation indices obtained from the orthomosaic and the *Silphium perfoliatum* biomass productivity, $n = 60$, 2020

| Вегетационный индекс | Функция, описывающая тип взаимосвязи | Сила взаимосвязи (коэффициент детерминации, R^2) | Стандартная ошибка (SE), т/га | Средняя квадратическая ошибка (RMSE), т/га | Средняя ошибка аппроксимации, % |
|----------------------|--------------------------------------|---|-------------------------------|--|---------------------------------|
| ExG | $y = 0,0116x - 0,16$ | 0,95 | 1,19 | 1,08 | 20,5 |
| RGBVI | $y = 0,0073x - 0,21$ | 0,94 | 1,23 | 1,12 | 27,0 |
| NGRDI | $y = 0,0064x - 0,20$ | 0,94 | 1,24 | 1,12 | 20,7 |
| EXGR | $y = 0,011x - 1,09$ | 0,93 | 1,35 | 1,22 | 23,2 |
| CIVE | $y = 0,0062x + 17,98$ | 0,91 | 1,55 | 1,40 | 15,9 |
| WI | $y = 0,7451x - 59,11$ | 0,90 | 1,64 | 1,47 | 19,3 |
| GR | $y = 0,6576x - 23,08$ | 0,89 | 1,67 | 1,51 | 30,2 |
| GLI | $y = 0,0078x - 0,32$ | 0,87 | 1,85 | 1,68 | 38,5 |
| VEG | $y = 0,469x - 17,76$ | 0,83 | 2,14 | 1,94 | 39,1 |
| COMB1 | $y = 0,0573x + 3,78$ | 0,78 | 2,46 | 2,23 | 44,7 |
| COMB2 | $y = 0,0769x + 5,89$ | 0,78 | 2,44 | 2,20 | 43,7 |
| VARI | $y = 0,0658x - 4,20$ | 0,66 | 3,02 | 2,74 | 43,7 |
| SAVI | $y = 0,0037x + 0,49$ | 0,44 | 3,91 | 3,53 | 58,7 |

Примечание. Данные приведены в пересчете на сырую растительную массу.

Расчет средней ошибки аппроксимации свидетельствует о том, что, несмотря на наличие довольно сильной прямой линейной связи между величинами отдельных вегетационных индексов и продуктивностью биомассы силфий, использование какого-либо одного индекса для достоверной оценки уровня продуктивности данной культуры не представляется возможным, поскольку даже для самых информативных индексов средняя ошибка аппроксимации достигала 16–27 %. В связи с этим посредством выполнения пошаговой множественной регрессии была оценена возможность использования комплекса вегетационных индексов для определения продуктивности биомассы *Silphium perfoliatum*. В результате была получена регрессионная модель следующего вида (1):

$$y = -317,181 + 0,997WI - 4,702VARI - 389,566EXGR + 417,682ExG(1), \quad (1)$$

где WI – Индекс Веббеке; VARI – видимый атмосфероустойчивый индекс; EXGR – разность избыточного зеленого и избыточного красного индексов; ExG – избыточный зеленый индекс.

Средняя ошибка аппроксимации полученной модели составила 1,82 %, средняя ошибка (SE) – 0,18 т/га, а среднеквадратическая (RMSE) – 0,13 т/га, что свидетельствует о ее высокой надежности и пригодности для целей мониторинга продуктивности *Silphium perfoliatum* в фазу стеблевания (рис. 5).

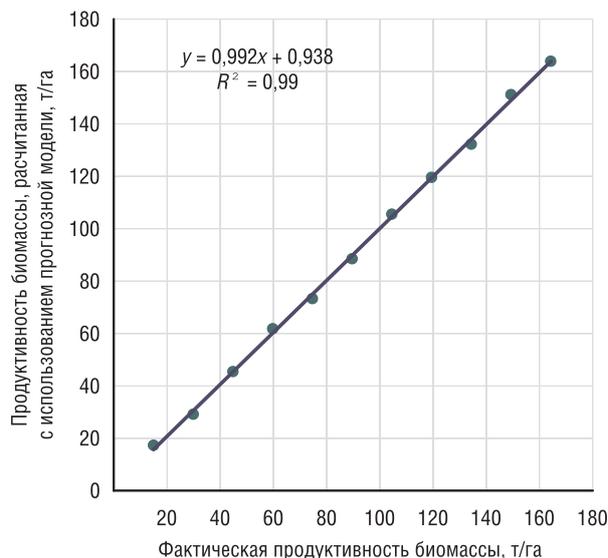


Рис. 5. Зависимость между фактической и прогнозной продуктивностью биомассы *Silphium perfoliatum*, рассчитанной по множественной регрессионной модели, 2020 г.

Fig. 5. Correlation of actual and predicted productivity of the *Silphium perfoliatum* biomass calculated according to the multiple regression model, 2020

Выводы

1. Результаты исследования дают основание рассматривать данные дистанционного зондирования сверхвысокого разрешения, получаемые с помощью БЛА, как перспективные для использования при оценке продуктивности биомассы *Silphium perfoliatum* в фазу стеблевания.

2. Данные о высоте растений, полученные из цифровой модели поверхности растительного покрова, созданной по результатам аэрофотосъемки, пригодны для использования при оценке продуктивности биомассы *Silphium perfoliatum*: R^2 для зависимости между фактическим значениям продуктивности и продуктивности, рассчитанной по данным аэрофотосъемки, составляет 0,97.

3. Вегетационные индексы ExG, RGBVI, NGRDI и EXGR, рассчитанные на основе ортомозаики, созданной по результатам съемки БЛА в режиме RGB, информативны для оценки общего состояния растительного покрова, однако использование их по отдельности для достоверного прогноза продуктивности биомассы *Silphium perfoliatum* не представляется возможным из-за низкой надежности полученных регрессионных моделей.

4. Прогнозная модель, созданная методом пошаговой множественной линейной регрессии и включающая комплекс из четырех вегетационных индексов – ExG, VARI, WI и EXGR, позволяет определять продуктивность биомассы *Silphium perfoliatum* в фазу начала стеблевания по данным дистанционного зондирования сверхвысокого разрешения с ошибкой, не превышающей 2 %.

5. Дальнейшие исследования следует сосредоточить в направлении оценки валидации алгоритмического обеспечения процесса использования данных дистанционного зондирования сверхвысокого разрешения, полученных с БЛА, для оценки и прогнозирования продуктивности других кормовых культур, в частности кукурузы на силос, в производственных условиях, и автоматизацию обработки получаемых данных.

Результаты выполненного исследования могут быть полезны как при разработке методики прогнозирования, так и при непосредственном прогнозировании продуктивности биомассы *Silphium perfoliatum* и других кормовых культур, в частности, *Helianthus annuus* и *Helianthus tuberosus*.

Благодарности. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Качество и эффективность агропромышленного комплекса» по теме государственного задания 6.84 «Создание популяций сельфии пронзеннолистной с высокими адаптивным потенциалом и урожайностью, оценка их питательной и кормовой ценности при многоукосном использовании в зеленом конвейере».

Список использованных источников

1. Kutsayeva, A. Creation of management zones for the purposes of land development at the implementation of precision farming in Belarus / A. Kutsayeva, T. Myslyva // Baltic Surveying. – 2020. – Vol. 12. – P. 19–27. <https://doi.org/10.22616/j.balticsurveying.2020.003>
2. Daheim, C. Precision agriculture and the future of farming in Europe : scientific foresight study / C. Daheim, K. Poppe, R. Schrijver ; Europ. Parliament. – Brussels : EU, 2016. – 274 p. <https://doi.org/10.2861/020809>
3. Doerge, T.A. Management zone concepts. Site-specific management guidelines, no. 2 / T. A. Doerge. – Canada : IPNI, 1999. – 4 p.
4. Куцаева О.А. Создание менеджмент-зон для дифференцированного внесения минеральных удобрений с использованием инструментов геостатистики / О.А. Куцаева // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2020. – № 2. – С. 176–181.
5. Zarco-Tejada, P.J. Precision agriculture: an opportunity for EU farmers – potential support with the cap 2014–2020 / P.J. Zarco-Tejada, N. Hubbard, P. Loudjani ; Europ. Parliament, Directorate-General for Internal Policies of the Union. – Luxembourg : Publ. Office, 2014. – 50 p. <https://doi.org/10.2861/58758>
6. Maloku, D. Adoption of precision farming technologies: USA and EU situation / D. Maloku // SEA – Practical Application of Science. – 2020. – Vol. VIII, iss. 22. – P. 7–14.
7. Бауэрс, П. Летательные аппараты нетрадиционных схем / П. Бауэрс ; пер. с англ. Б.Б. Рыбака ; под ред. Е.В. Зябрева. – М. : Мир, 2016. – 320 с.
8. Василин, Н.Я. Беспилотные летательные аппараты / Н.Я. Василин. – Минск : Попурри, 2017. – 272 с.
9. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве / Ю.Н. Зубарев [и др.] // Вестн. Перм. федер. исслед. центра. – 2019. – № 2. – С. 47–51. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2019.2.5>
10. Terrestrial laser scanning of agricultural crops / J. Lumme [et al.] // The Intern. Arch. of the Photogrammetry, Remote Sensing a. Spatial Inform. Sciences. – 2008. – Vol. 37, pt. B5. – P. 563–566.

11. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley / J. Bendig [et al.] // Intern. J. of Appl. Earth Observation a. Geoinformation. – 2015. – Vol. 39. – P. 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.02.012>
12. Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging / J. Bendig [et al.] // Remote Sensing. – 2014. – Vol. 6, N 11. – P. 10395–10412. <https://doi.org/10.3390/rs61110395>
13. Bendig, J. UAV-based imaging for multi-temporal, very high-resolution crop surface models to monitor crop growth variability / J. Bendig, A. Bolten, G. Bareth // Photogrammetrie. Fernerkundung. Geoinformation. – 2013. – Vol. 6. – P. 551–562. <https://doi.org/10.1127/1432-8364/2013/0200>
14. Accuracy assessment of plant height using an unmanned aerial vehicle for quantitative genomic analysis in bread wheat / M. A. Hassan [et al.] // Plant Methods. – 2019. – Vol. 15. – Art. 37. <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0419-7>
15. Comparison of models in assessing relationship of corn yield with plant height measured during early- to mid-season / X. Yin [et al.] // J. of Agr. Science. – 2011. – Vol. 3, N 3. – P. 14–24. <https://doi.org/10.5539/jas.v3n3p14>
16. Mapping and monitoring of biomass and grazing in pasture with an unmanned aerial system / A. Michez [et al.] // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, N 5. – Art. 473. <https://doi.org/10.3390/rs11050473>
17. Evaluation of RGB-based vegetation indices from UAV imagery to estimate forage yield in grassland / U. Lussem [et al.] // The Intern. Arch. of the Photogrammetry, Remote Sensing a. Spatial Inform. Sciences. – 2018. – Vol. XLII-3. – P. 1215–1219. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-1215-2018>
18. RGB vegetation indices applied to grass monitoring: a qualitative analysis / B. D. S. Barbosa [et al.] // Agronomy Research. – 2019. – Vol. 17, N 2. – P. 349–357. <https://doi.org/10.15159/AR.19.119>
19. Louhaichi, M. Spatially located platform and aerial photography for documentation of grazing impacts on wheat / M. Louhaichi, M. M. Borman, D. E. Johnson // Geocarto Intern. – 2001. – Vol. 16, №1. – P. 65–70. <https://doi.org/10.1080/10106040108542184>
20. A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale / E. R. Hunt Jr. [et al.] // Intern. J. of Appl. Earth Observation a. Geoinformation. – 2013. – Vol. 21. – P. 103–112. doi.org/10.1016/j.jag.2012.07.020
21. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction / A. A. Gitelson [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2002. – Vol. 80, N 1. – P. 76–87. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00289-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9)
22. Tucker, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation / C. J. Tucker // Remote Sensing of Environment. – 1979. – Vol. 8, N 2. – P. 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
23. Color indexes for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions / D. M. Woebbecke [et al.] // Trans. of the ASAE. – 1995. – Vol. 38, N 1. – P. 259–269. <https://doi.org/10.13031/2013.27838>
24. Determination of vegetation cover index under different soil management systems of cover plants by using an unmanned aerial vehicle with an onboard digital photographic camera / A. Beniaich [et al.] // Semina: Ciências Agrárias. – 2019. – Vol. 40, N 1. – P. 49–66. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n1p49>
25. Meyer, G. E. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications / G. E. Meyer, J. C. Neto // Computers a. Electronics in Agriculture. – 2008. – Vol. 63, №2. – P. 282–293. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.03.009>
26. Crop growth estimation system using machine vision / T. Kataoka [et al.] // Proceedings 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003), July 20 – July 24, 2003 / The Inst. of Electrical a. Electronics Engineers. – Kobe, 2003. – Vol. 2. – P. 1079–1083. <https://doi.org/10.1109/aim.2003.1225492>
27. Marchant, J. A. Shadow invariant classification for scenes illuminated by daylight / J. A. Marchant, C. M. Onyango // J. of the Optical Society of America. – 2000. – Vol. 17, N 11. – P. 1952–1961. <https://doi.org/10.1364/josaa.17.001952>
28. Hague, T. Automated crop and weed monitoring in widely spaced cereals / T. Hague, N. D. Tillett, H. Wheeler // Precision Agriculture. – 2006. – Vol. 7, N 1. – P. 21–32. <https://doi.org/10.1007/s11119-005-6787-1>
29. Automatic segmentation of relevant textures in agricultural images / M. Guijarro [et al.] // Computers a. Electronics in Agriculture. – 2011. – Vol. 75, N 1. – P. 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.09.013>
30. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera / Y. Li [et al.] // Field Crops Research. – 2010. – Vol. 118, N 3. – P. 221–227. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.05.011>
31. Wheat growth monitoring and yield estimation based on multi-rotor unmanned aerial vehicle / Z. Fu [et al.] // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12, N 3. – Art. 508. <https://doi.org/10.3390/rs12030508>

References

1. Kutsayeva A., Myslyva T. Creation of management zones for the purposes of land development at the implementation of precision farming in Belarus. *Baltic Surveying*, 2020, vol. 12, pp. 19-27. <https://doi.org/10.22616/j.balticsurveying.2020.003>
2. Daheim C., Poppe K., Schrijver R. *Precision agriculture and the future of farming in Europe: scientific foresight study*. Brussels, European Union, 2016. 274 p. <https://doi.org/10.2861/020809>
3. Doerge T. A. *Management zone concepts. Site-specific management guidelines, no. 2*. Canada, IPNI, 1999. 4 p.
4. Kutsaeva O. A. Creation of management zones for differentiated application of mineral fertilizers with the use of geostatistics tools. *Vestnik Belorusskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy*, 2020, no. 2, pp. 176-181 (in Russian).
5. Zarco-Tejada P. J., Hubbard N., Loudjani P. *Precision agriculture: an opportunity for EU farmers - potential support with the cap 2014-2020*. Luxembourg, Publications Office, 2014. 50 p. <https://doi.org/10.2861/58758>
6. Maloku D. Adoption of precision farming technologies: USA and EU situation. *SEA - Practical Application of Science*, 2020, vol. VIII, iss. 22, pp. 7-14.
7. Bowers P. M. *Unconventional aircraft*. 2nd ed. Blue Ridge Summit, TAB Books, 1990. 323 p.

8. Vasilin N. Ya. *Unmanned aerial vehicles*. Minsk, Popurri Publ., 2017. 272 p. (in Russian).
9. Zubarev Yu. N., Fomin D. S., Chashchin A. N., Zabolotnova M. V. Use of uncleaned aircraft in agriculture. *Vestnik Permskogo federal'nogo issledovatel'skogo tsentra = Perm Federal Research Centre Journal*, 2019, no. 2, pp. 47-51 (in Russian). <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2019.2.5>
10. Lumme J., Karjalainen M., Kaartinen H., Kukko A., Hyypä J., Hyypä H., Jaakkola A., Kleemola J. Terrestrial laser scanning of agricultural crops. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, vol. 37, pt. B5, pp. 563-566.
11. Bendig J., Yu K., Aasen H., Bolten A., Bennertz S., Broscheit J., Gnyp M. L., Bareth G. 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, vol. 39, pp. 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.02.012>
12. Bendig J., Bolten A., Bennertz S., Broscheit J., Eichfuss S., Bareth G. Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging. *Remote Sensing*, 2014, vol. 6, no. 11, pp. 10395-10412. <https://doi.org/10.3390/rs61110395>
13. Bendig J., Bolten A., Bareth G. UAV-based imaging for multi-temporal, very high-resolution crop surface models to monitor crop growth variability. *Photogrammetrie. Fernerkundung. Geoinformation*, 2013, vol. 6, pp. 551-562. <https://doi.org/10.1127/1432-8364/2013/0200>
14. Hassan M. A., Yang M., Fu L., Rasheed A., Zheng B., Xia X., Xiao Y., He Z. Accuracy assessment of plant height using an unmanned aerial vehicle for quantitative genomic analysis in bread wheat. *Plant Methods*, 2019, vol. 15, art. 37. <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0419-7>
15. Yin X., Jaja N., McClure M. A., Hayes R. M. Comparison of models in assessing relationship of corn yield with plant height measured during early- to mid-season. *Journal of Agricultural Science*, 2011, vol. 3, no. 3, pp. 14-24. <https://doi.org/10.5539/jas.v3n3p14>
16. Michez A., Lejeune P., Bauwens S., Herinaina A. A. L., Blaise Y., Muñoz E. C., Lebeau F., Bindelle J. Mapping and monitoring of biomass and grazing in pasture with an unmanned aerial system. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, no. 5, art. 473. <https://doi.org/10.3390/rs11050473>
17. Lussem U., A. Bolten, Gnyp M. L., Jasper J., Bareth G. Evaluation of RGB-based vegetation indices from UAV imagery to estimate forage yield in grassland. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018, vol. XLII-3, pp. 1215-1219. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-1215-2018>
18. Barbosa B. D. S., Ferraz G. A. S., Gonçalves L. M., Marin D. B., Maciel D. T., Ferraz P. F. P., Rossi G. RGB vegetation indices applied to grass monitoring: a qualitative analysis. *Agronomy Research*, 2019, vol. 17, no. 2, pp. 349-357. <https://doi.org/10.15159/AR.19.119>
19. Louhaichi M., Borman M. M., Johnson D. E. Spatially located platform and aerial photography for documentation of grazing impacts on wheat. *Geocarto International*, 2001, vol. 16, no. 1, pp. 65-70. <https://doi.org/10.1080/10106040108542184>
20. Hunt E. R. Jr., Doraiswamy P. C., McMurtrey J. E., Daughtry C. S. T., Perry E. M., Akhmedov B. A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, vol. 21, pp. 103-112. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.07.020>
21. Gitelson A. A., Kaufman Y. J., Stark R., Rundquist D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 2002, vol. 80, no. 1, pp. 76-87. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00289-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9)
22. Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1979, vol. 8, no. 2, pp. 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
23. Woebbecke D. M., Meyer G. E., Von Bargen K., Mortensen D. A. Color indexes for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Transactions of the ASAE*, 1995, vol. 38, no. 1, pp. 259-269. <https://doi.org/10.13031/2013.27838>
24. Beniaich A., Silva M. L. N., Ayalos F. A. P., Cândido B. M. Determination of vegetation cover index under different soil management systems of cover plants by using an unmanned aerial vehicle with an onboard digital photographic camera. *Semina: Ciências Agrárias*, 2019, vol. 40, no. 1, pp. 49-66. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n1p49>
25. Meyer G. E., Neto J. C. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, vol. 63, no. 2, pp. 282-293. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.03.009>
26. Kataoka T., Kaneko T., Okamoto H., Hata S. Crop growth estimation system using machine vision. *Proceedings 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003), July 20 - July 24, 2003*. Kobe, 2003, vol. 2, pp. 1079-1083. <https://doi.org/10.1109/aim.2003.1225492>
27. Marchant J. A., Onyango C. M. Shadow invariant classification for scenes illuminated by daylight. *Journal of the Optical Society of America*, 2000, vol. 17, no. 11, pp. 1952-1961. <https://doi.org/10.1364/josaa.17.001952>
28. Hague T., Tillett N. D., Wheeler H. Automated crop and weed monitoring in widely spaced cereals. *Precision Agriculture*, 2006, vol. 7, no. 1, pp. 21-32. <https://doi.org/10.1007/s11119-005-6787-1>
29. Gujjarro M., Pajares G., Riomoros I., Herrera P. J., Burgos-Artizzu X. P., Ribeiro A. Automatic segmentation of relevant textures in agricultural images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, vol. 75, no. 1, pp. 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.09.013>
30. Li Y., Chen D., Walker C. N., Angus J. F. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera. *Field Crops Research*, 2010, vol. 118, no. 3, pp. 221-227. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.05.011>
31. Fu Z., Jiang J., Gao Y., Krienke B., Wang M., Zhong K., Cao Q., Tian Y., Zhu Y., Cao W., Liu X. Wheat growth monitoring and yield estimation based on multi-rotor unmanned aerial vehicle. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 3, art. 508. <https://doi.org/10.3390/rs12030508>

Информация об авторах

Мыслыва Тамара Николаевна – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, зав. кафедрой геодезии и фотограмметрии, Белорусская государственная сельскохозяйственная академия (ул. Мичурина, 5, 213407 Горки, Могилевская обл., Республика Беларусь). E-mail: byrty41@yahoo.com

Шелюто Бронислава Васильевна – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры кормопроизводства и хранения продукции растениеводства, Белорусская государственная сельскохозяйственная академия (ул. Мичурина, 5, 213407 Горки, Могилевская обл., Республика Беларусь). E-mail: a.sheliuta@mail.ru

Надточий Петр Петрович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт сельского хозяйства Полесья Национальной академии аграрных наук Украины (Киевское шоссе, 132, 10132 Житомир, Житомирская обл., Украина). E-mail: pnatdychy@yahoo.com

Куцаева Олеся Алексеевна – старший преподаватель кафедры геодезии и фотограмметрии, Белорусская государственная сельскохозяйственная академия (ул. Мичурина, 5, 213407 Горки, Могилевская обл., Республика Беларусь). E-mail: alexa-1982@bk.ru

Information about authors

Tamara N. Myslyva - D. Sc. (Agriculture), Professor. Belarusian State Agricultural Academy (5 Michurina Str., Gorki 213407, Mogilev Region, Republic of Belarus). E-mail: byrty41@yahoo.com

Branislava V. Sheliuta - D. Sc. (Agriculture), Professor. Belarusian State Agricultural Academy (5 Michurina Str., Gorki 213407, Mogilev Region, Republic of Belarus). E-mail: a.sheliuta@mail.ru

Petr P. Nadtochyj - D. Sc. (Agriculture), Associate Professor. Institute of Agriculture of Polesie NAAS of Ukraine (132 Kiev highway, Zhytomyr, Zhytomyr Region 10132, Ukraine). E-mail: pnatdychy@yahoo.com

Alesia A. Kutsayeva - Senior Lecturer (Agriculture). Belarusian State Agricultural Academy (5 Michurina Str., Gorki 213407, Mogilev Region, Republic of Belarus). E-mail: alexa-1982@bk.ru