УДК 004.42:631

**М.Ю. Катаев, Е.Ю. Карташов, Д.С. Смирнов**

# Методика и программа атмосферной коррекции изображений беспилотных летательных аппаратов в задаче безопасной локации растительности

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) с установленной на них аппаратурой представляют собой способ сбора информации в виде изображений с высоким пространственным разрешением при относительно простом управлении аппарата, что делает его экономически эффективным. За последние 10 лет технология измерений с помощью БПЛА существенно изменилась и стала популярной благодаря своей универсальности и легкости применения в коммерческих и научных исследованиях. Надо отметить, что способы обработки разово получаемых изображений позволяют решать различного рода научные и практические задачи, однако при мониторинге, когда изучается динамика состояния объектов (типов поверхности) одной и той же территории, методическое и программное наполнение пока остается слабо решенным вопросом. Одной из проблем, мешающих изучению динамики, например состояния объектов сельскохозяйственных полей, является радиометрическая точность получаемых изображений БПЛА. Учет на практике радиометрической точности измерений позволяет учитывать различные условия освещения в разное время дня, месяце, типами применяемых цифровых датчиков (цифровых камер). Настоящее исследование направлено на снижение зависимости при изучении динамики состояния объектов одной и той же территории в различное время за счет учета радиометрических ошибок изображений БПЛА при картировании состояния растительности. Для исследований применяются реальные изображения БПЛА, которые получены в период июнь–август 2019 г. для сельскохозяйственного поля с озимой пшеницей.

**Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты, изображение, атмосферная коррекция, картографирование растительности, индексы растительности.
**DOI:** 10.21293/1818-0442-2021-24-4-73-78

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) позволяют получать изображения с установленных на них камер, имеющих высокое пространственное разрешение. БПЛА летают по заранее проработанному маршруту в автоматическом режиме или под управлением оператора, что является экономически выгодным способом сбора информации по сравнению с другими [1]. За последнее время появились коммерческие и свободно распространяемые технологии автоматизированной обработки множества изображений, получаемых за время облета маршрута, например: Geoscan [2], Agisoft [3], Dronmap [4], Pix4d [5] и др.

При всей проработанности методик обработки остаются проблемы радиометрической коррекции изображений и решения задач мониторинга. Особенно эту коррекцию важно сделать перед тем, как изображения будут сшиваться в общее изображение территории (мозаику). При оценке состояния, например, растительности на сельскохозяйственном поле важно применять не классические методики коррекции изображений («серый мир» [6]), а физически обоснованные, учитывающие такие факторы, как учет освещенности солнцем (высота и зенитный угол), рельеф и т.д. Радиометрическая коррекция позволяет учитывать взаимосвязь между значениями пикселей и естественной яркостью [7].

Настоящее исследование направлено на уменьшение радиометрических ошибок изображений, полученных при помощи БПЛА для картирования растительности. Картирование растительности – это ряд действий, связанных с получением изображений, предварительной обработкой, обработкой и последующим отображением растительного покрова на определенной территории. Эта задача крайне важна и необходима для наблюдения, интерпретации и описания окружающей среды, поскольку растительность связана с почвами, на которых она произрастает, климатом и экологическими факторами [8].

Знание состояния растительности представляет собой ценную информацию для специалистов в одном из важнейших для человечества направлении – сельском хозяйстве. Известно, что для создания карт растительности широко используются методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые связаны с данными, получаемыми с различного типа датчиков, установленных стационарно на спутниках, самолетах или БПЛА [9]. Каждая из традиционных технологий ДЗЗ, применяемая для картирования растительности, имеет пространственно-временные, технологические, эксплуатационные и экономические ограничения.

Спутниковые датчики одновременно позволяют отображать большие территории, однако пространственное разрешение полученных данных невысокое для свободно распространяемых данных (10 м), а коммерческие (0,5 м) данные достаточно дороги для широкого применения [10]. Кроме того, оптические многоспектральные датчики не позволяют получить изображение поверхности Земли ввиду наличия сплошного или разорванного облачного покрова. Это приводит к ограничениям в привязке времени получения спутникового изображения к фазам фенологического цикла из-за, в принципе, случайного времени сбора данных.

Самолетные исследования можно планировать более гибко, привязывая даты вылета к фазам фенологического цикла растений, однако для таких измерений необходимы большие площади, которые все же приводят к измерениям, которые оказываются сложными и дорогостоящими. В этом плане БПЛА имеют определенные преимущества по сравнению со спутниковыми или самолетными технологиями измерений, обеспечивая безоблачные изображения с очень высоким пространственным разрешением, относительно простой работой, экономичностью, надежностью, мобильностью и безопасностью [11]. Однако при всех плюсах есть и недостаток, связанный с тем, что измерения можно проводить на относительно небольших площадях с определенной зависимостью от погодных условий (например, ветер до 10 м/с). Тем не менее беспилотные летательные аппараты позволяют планировать однотипные маршруты для одного и того же места, в результате чего получаются данные, которые позволяют выявлять динамику состояния растительности.

При картировании растительности беспилотные летательные аппараты могут применять классические цифровые RGB-датчики или мультиспектральные камеры, которые позволяют рассчитывать различные индексы растительности (Greenness, NDVI и др.) [12]. Эти расчеты позволяют выполнять пространственно-временной анализ и получать количественную оценку состояния растительного покрова, определение видового состава и структуры растений. Для формирования карт растительности необходимо решить основные проблемы, связанные с учетом условий получения изображений с БПЛА, а именно, геометрии (изменение формы изображения при наклоне) и радиометрии (изменение освещенности, шумы и др.). Поскольку БПЛА имеют небольшие размеры (относительно самолетного или вертолетного типа БПЛА), то они имеют меньшую стабильность пространственного положения датчика во время полетов. Отчасти при этом проблема геометрической точности совмещения изображений в мозаику решена за счет большого количества перекрывающихся изображений между собой (от 50 до 80%) и современных математических алгоритмов.

Одной из менее изученных сторон коррекции изображений, полученных с БПЛА, являются радиометрические и атмосферные искажения, которые могут возникать по разным причинам, например, использование датчиков получения изображений с широким полем зрения, учета движения солнца в зависимости от времени дня, что приводит к разному уровню освещенности изображений, прозрачности атмосферы или наличия облачности, которая влияет на уровень освещения территории, где проходят измерения, а отдельные облака могут приводить к изменению цвета пикселей на изображениях за счет темных пятен на поверхности.

По этой причине необходимо перед тем, как будет создана мозаика изображений, применять методы атмосферной коррекции, которая включает изменение коэффициента отражения поверхности, который зависит от положения солнца (зенитный угол и азимут), типа поверхности, рельефа (топографии), и атмосферную поправку на прозрачность атмосферы. Для решения этих задач необходимо применить методы, которые позволят повысить точность картирования растительности.

**Методика атмосферной коррекции**

Важно заметить, что любое изображение, полученное с помощью БПЛА оптическими датчиками, заставляет учитывать радиометрические характеристики, поскольку получаемые изображения зависят от яркости солнечного света, типа поверхности, высоты полета и др. На рис. 1 показана упрощенная схема того, как оптический датчик, установленный на БПЛА, находящийся на определенной высоте, получает информацию, которая представляется в виде RGB-изображения.

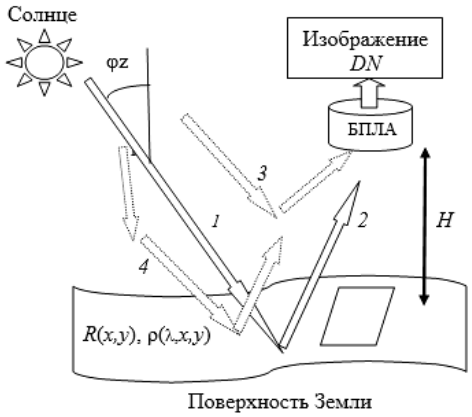


Рис. 1. Схема видов излучения, достигающих цифровую камеру, установленную на БПЛА: *1* – падающее солнечное излучение; *2* – отраженное от поверхности солнечное падающее излучение; *3* – рассеянное излучение атмосферой; *4* – диффузное излучение

На рис. 1 показано прямое направление распространения солнечного излучения сквозь толщу атмосферы (путь *1*), которое при этом частично поглощается и рассеивается атмосферой, затем отражается от поверхности (путь *2*) и в дальнейшем попадает в поле зрения камеры и на матрицу RGB (величина *DN*). На значения *DN* влияет изменение факторов окружающей среды, таких как атмосферные условия (например, прозрачность атмосферы за счет туманов или аэрозолей, пожаров и др.), отражательная способность соседних объектов, а также φ*z* зенитный угол солнца (см. рис. 1). Если не учитывать эти факторы, тогда данные эффекты попадут в полученные результаты, которые будут, во-первых, случайными, во-вторых, зависимыми от погодных условий. По этой причине необходимо выполнить преобразование значений *DN* с учетом атмосферной коррекции в отражательную способность поверхности, что представляет собой основу калибровки, которая выполняется перед другими процессами обработки изображений.

Атмосферная коррекция особенно важна для сравнения изображений поверхности Земли, полу-

ченных за несколько периодов времени одним и тем же датчиком, но при различных условиях освещения и атмосферных условиях (погода). Необходимо это сделать и для сшивки изображений, при получении мозаики, так как каждое изображение будет отличаться по уровню освещенности ввиду изменения положения солнца и состояния погоды. Эта разница и влияет на длительность процесса сшивания перекрывающихся изображений или получения неоднородной мозаики (ортофотоплана). Это же приводит и к снижению точности оценки отражательной способности, а значит, расчета индексов растительности и последующих результатов классификации (определения типов поверхности [10]).

Выпишем основные уравнения, которые позволяют увидеть взаимосвязь измеряемых показателей *DN*, и уравнения переноса солнечного излучения в атмосфере и для простоты будем считать, что поверхность создает ламбертовскую яркость отраженного солнечного излучения на входе в объектив датчика $E(\lambda)$. Учитывая, что высота полета БПЛА в типичных условиях измерений (получения изображений) не превышает 100–200 м, прозрачность атмосферы между поверхностью Земли (см. рис. 1, путь *2*) и БПЛА равна единице и влияние остальных факторов минимально за счет того, что размер апертуры *A* незначителен, и тогда можно записать:

$$E(\lambda,\varphi_z) = E_o(\lambda)\cdot\cos(\varphi_z)\cdot\rho(\lambda,x,y)\cdot R(x,y)\cdot\tau_1(\lambda,\varphi_z)/(d\cdot\pi), \quad (1)$$

где $\varphi_z$ – зенитный угол; $E_o(\lambda)$ – внеатмосферное солнечное излучение на длине волны $\lambda$; $\tau_1(\lambda)$ – коэффициенты пропускания атмосферы по направлениям от солнца к поверхности (см. рис. 1, путь *1*) соответственно; $\rho(\lambda,x,y)$ – спектральный коэффициент отражения для точки на поверхности $(x,y)$; $R(x,y)$ – коэффициент, учитывающий рельеф поверхности; $d$ – относительное расстояние Солнце–Земля.

Согласно выражению (1), отраженное излучение, падающее на объектив цифровой камеры БПЛА, зависит от времени дня (определяется зенитным углом, который зависит от широты и долготы местности), времени года (определяется величиной *d*). Измеренный сигнал цифровой камерой может быть записан в виде

$$DN(i) = C\cdot\int E(\lambda,\theta,\varphi_z)\cdot S_i(\lambda))\cdot d\lambda, \quad (2)$$

где $C$ – коэффициент, связанный с характеристиками камеры; $S_i(\lambda)$ – спектральная функция канала RGB (рис. 2).

На рис. 2 приведены кривые спектральных функций каналов RGB, применяемые цифровой камерой (Sony 6000A). Из рис. 2 видно, что амплитуды каналов имеют различную величину и крылья кривых спектральных каналов пересекаются между собой, что влияет на межканальное влияние измеряемого отраженного солнечного излучения.

Учитывая уравнения (1) и (2), появляется возможность оценить отражательную способность в точке пространства $(x,y)$ по формуле

$$\rho(\lambda(i)) = (d\cdot\pi\cdot DN(i))/\{\int E_o(\lambda)\cdot\cos(\varphi_z)\cdot R\cdot\tau_1(\lambda,\varphi_z)\cdot d\lambda\}. \quad (3)$$

Оптические цифровые камеры, установленные на БПЛА, регистрируют значения *DN* вместо коэффициента отражения поверхности, и поэтому необходимо выполнить коррекцию измерений (полученного изображения). К сожалению, производители цифровых камер не всегда предоставляют информацию о характеристиках матриц цифровых камер и особенно спектральных функций каналов $S_i$, что затрудняет процесс коррекции коэффициента отражения. Другой аспект коррекции связан с атмосферной поправкой, т.е. учетом атмосферных эффектов, которые зависят от высоты полета и погодных условий района измерений (величина $\tau_1$). Воздействие атмосферы на солнечное излучение связано с рассеянием аэрозолями и молекулами, а также поглощением газов атмосферы. Поглощение газами в видимой области связано с малыми компонентами по содержанию $O_3$, $NO_2$, $SO_2$ и др., а также водяным паром и углекислым газом. Поэтому любые изменения погоды вызывают вариации содержания газовых и аэрозольных компонентов, особенно водяного пара (например, до и после дождя), что ведет к изменению прозрачности атмосферы. И в этом плане возникает необходимость учитывать эти изменения, так как они влияют на расчет индексов Greenness (таблица).

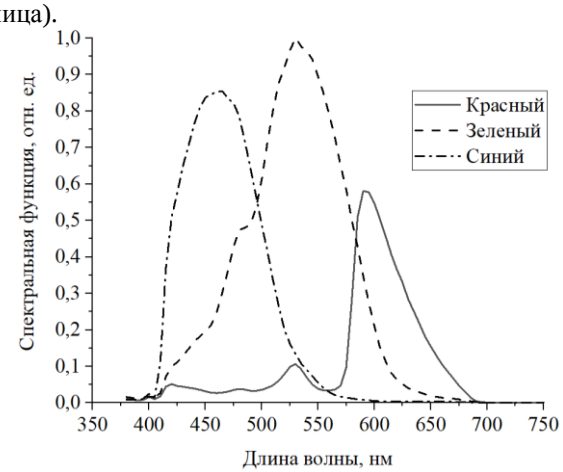


Рис. 2. Спектральные функции каналов RGB (R – красный, G – зеленый и B – синий) цифровой камеры

**Индексы растительности Greenness**

| Название индекса | Формула |
|---|---|
| Coloration Index (CI) | $(R - B)/R$ |
| Brightness Index (BI) | $\sqrt{((R^{**}2 + G^{**}2 + B^{*}2)/3}$ |
| Soil Colour Index (SGI) | $(R–G)/(R + G)$ |
| Green leaf index (GLI) | $(2^{*}G – R – B)/(2^{*}G + R + B)$ |
| Green-Red Vegetation Index (GRVI) | $(G – R)/(G + R)$ |

Как было сказано выше, важными для практического применения изображений, полученных с помощью цифровой камеры, установленной на БПЛА, после коррекции и построения мозаики являются индексы растительности (Greenness). Для расчета индексов растительности используют два (как правило, R и G) спектральных канала или более (R, G, B). По величине вычисленного соотношения между каналами можно изучать характеристики растительности и обеспечивать сравнение этих характеристик в различные моменты времени. Так,

например, база данных Indexdatabase [13] содержит более 500 формул индексов растительности. В таблице приведены некоторые индексы Greenness.

**Полученные результаты**

Для применения предлагаемого способа было разработано программное обеспечение, структура основных блоков которого представлена на рис. 3. При вычислении уравнения (3) необходимо для изображения, которое имеет определенные географические координаты, учитывать метеорологические данные (профиль температуры и влажности), которые нами берутся с ресурса [14]. Данные профилей температуры и влажности необходимы для расчета пропускания атмосферы по программе 6S [15]. Программа 6S для расчета использует фиксированные модели атмосферы для трех климатических зон: тропических, средних и полярных, а также двух периодов года (зима и лето), что делает их неточными для применения в конкретной географической точке и дате года. Поэтому нами текущие данные погоды передаются в программу 6S для расчета пропускания. Координаты поля необходимы для учета рельефа $R(x,y)$, характеристики которого рассчитываются на основе базы данных SRTM [16]. Внеатмосферный спектр солнца $E_o$ берется нами из ресурса [17].

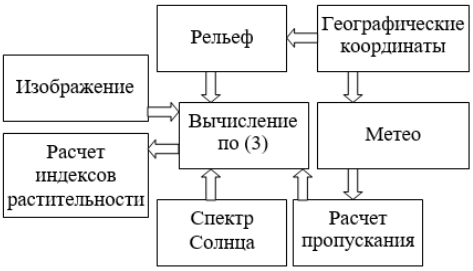


Рис. 3. Структура основных блоков программы

Для тестирования разработанной программы нами были взяты восемь изображений, полученных с помощью камеры, установленной на БПЛА, для изучаемого поля, которое находится в Заречном участке Томской области в период с июня по август 2019 г., на котором выращивалась озимая пшеница. Конкретные даты получения изображений в 2019 г.: 1) 01.06; 2) 08.06; 3) 06.07; 4) 13.07; 5) 27.07; 6) 03.08; 7) 10.08; 8) 24.08.

На рис. 4 показаны гистограммы распределения значений индекса BI (см. таблицу) для трех дат в 2019 г. (06.06; 13.07 и 10.08) и для двух случаев, когда взяты исходные изображения, скорректированные по формуле (3).

Из рис. 4 видно, что гистограммы исходных изображений отличаются от скорректированных центром максимума в сторону уменьшения и незначительного возрастания. Также надо отметить, что центры максимумов гистограмм соответствуют основному фенологическому циклу роста озимой пшеницы [18], что показано на рис. 5, где приведены значения максимумов для всех восьми дат полученных изображений.

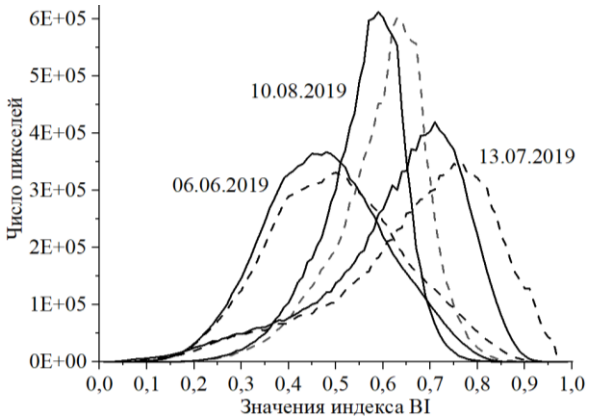


Рис. 4. Гистограммы распределения значений индекса BI для трех дат исходных изображений (пунктирная кривая) и коррекция по формуле (3) (сплошная кривая)

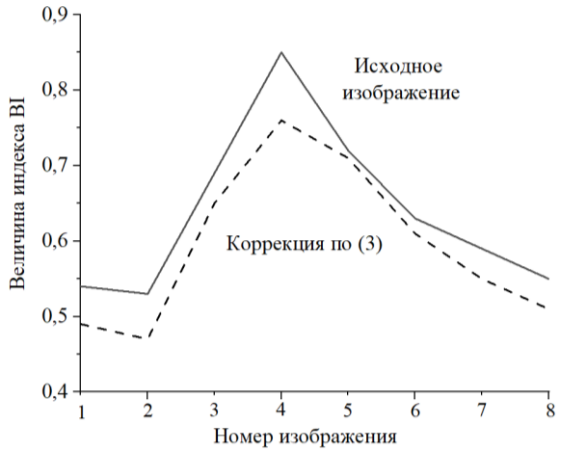


Рис. 5. Максимумы гистограмм значений индекса растительности BI для восьми дат получения изображений

Из рис. 5 видно, что коррекция получаемых изображений на атмосферные эффекты составляет около 10%, что важно для решения разнообразных практических задач сельского хозяйства. В данной работе получены результаты, которые определяют методику атмосферной коррекции изображений, полученных цифровыми камерами, установленными на беспилотных летательных аппаратах, в задаче изучения растительности.

**Заключение**

В статье рассмотрено влияние изменений падающего солнечного излучения во время полетов БПЛА в разное время суток и дней года, которые вызваны изменением солнечного излучения и факторами погоды (наличием облаков и/или прозрачностью атмосферы), на изображение. Разница в величине излучения влияет на однородность яркости изображений цифровых камер, установленных на БПЛА, что вызывает необходимость выполнить радиометрическую коррекцию. Особенно это важно в дни, когда часть изображений получена при ясном небе, где преобладает прямое солнечное излучение в изображении, а другая – при наличии облаков, когда преобладают эффекты рассеяния. В таком случае средняя яркость изображения будет меняться, что приведет к изменению величины индекса расти-

тельности, а значит, неточному пониманию состояния растений. Процесс радиометрической коррекции выполняется для каждого спектрального канала RGB в отдельности, что позволяет более точно оценивать индекс растительности, а значит, и состояние растений. Полученные результаты обработки реальных изображений показывают применимость предлагаемой методики на практике при решении разнообразных задач.

*Литература*

1. Рэндл У. Малые беспилотные летательные аппараты. Теория и практика / У. Рэндл, Т. Биард. – М.: Радар ММС, 2014. – 184 с.

2. Компания Геоскан [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.geoscan.aero/ru, свободный (дата обращения: 01.10.2021).

3. Компания Agisoft [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.agisoft.com, свободный (дата обращения: 01.10.2021).

4. Компания Dronemapper [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://dronemapper.com, свободный (дата обращения: 01.10.2021).

5. Компания Pix4d [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.pix4d.com, свободный (дата обращения: 01.10.2021).

6. Mohammed A.B.E.A. Color balance for panoramic images / A.B.E.A. Mohammed, F. Ming, F. Zhengwei // Modern Applied Science. – 2015. – Vol. 9, No. 13. – P. 140–147.

7. Катаев М.Ю. Коррекция освещённости многовременных RGB-изображений, получаемых с помощью беспилотного летательного аппарата / М.Ю. Катаев, М.М. Дадонова, Д.С. Ефременко // Светотехника. – 2020. – № 6. – С. 19–25.

8. Катаев М.Ю. Оценка состояния хвойных растений методами компьютерного зрения / М.Ю. Катаев, А.В. Кислов, Е.А. Самохин // Доклады ТУСУР. – 2020. – Т. 23, № 1. – С. 70–75.

9. Катаев М.Ю. Методы технического зрения для картирования состояния сельскохозяйственных полей / М.Ю. Катаев, К.С. Ёлгин, И.Б. Сорокин // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 75–80.

10. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.

11. Фетисов В.С. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние / В.С. Фетисов, Л.М. Неугодникова, В.В. Адамовский, Р.А. Красноперов. – Уфа: ФОТОН, 2014. – 217 с.

12. Rasmussen J. Are vegetation indices derived from consumer-grade cameras mounted on UAVs sufficiently reliable for assessing experimental plots? /J. Rasmussen, G. Ntakos, J. Nielsen, J. Svensgaard, R.N. Poulsen, S. Christensen // Eur. J. Agron. – 2017. – Vol. 74. – P. 75–92.

13. База данных Indexdatabase [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.indexdatabase.de/db/i.php, свободный (дата обращения: 01.10.2021).

14. Метеорологический онлайн ресурс Ventusky [Электронный ресурс]. – https://www.ventusky.com, свободный (дата обращения: 01.10.2021).

15. Vermote E.F. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview / E.F. Vermote, D. Tanre, J.L. Deuze, M. Herman, J.-J. Morcrette // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1997. – Vol. 35, No. 3. – P. 675–686.

16. Космическое агентство NASA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www2.jpl.nasa.gov/srtm, свободный (дата обращения: 01.10.2021).

17. Компания NREL [Электронный ресурс]. – https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra.html, свободный (дата обращения: 01.10.2021).

18. Tao F. Spatiotemporal changes of wheat phenology in China under the effects of temperature, day length and cultivar thermal characteristics / F. Tao, S. Zhang, Z. Zhang // Europ. J. Agronomy. – 2012. – No. 43. – P. 201–212.

**Катаев Михаил Юрьевич**
Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85
Эл. почта: kmy@asu.tusur.ru

**Карташов Евгений Юрьевич**
Канд. техн. наук, доцент каф. машин и аппаратов химических и атомных производств
Северского технологического института Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»
Коммунистический пр-т, 65, г. Северск, Россия, 636036
Тел.: (382-3) 78-02-40, +7-905-991-66-92
Эл. почта: kart.62@yandex.ru

**Смирнов Дмитрий Сергеевич**
Магистрант каф. АСУ ТУСУРа
Ленина пр-т., 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36
Эл. почта: the.smd.public@gmail.com

Kataev M.Yu., Kartashov E.Yu., Smirnov D.S.

**Methodology and software for atmospheric correction of images obtained with unmanned aircraft to allow the safe location of vegetation**

Unmanned aerial vehicles (UAV) provide a way to obtain images with high spatial resolution with relatively simple control of the vehicle and economic efficiency. Over the past 10 years, UAV measurement technology has changed significantly and has become popular due to its versatility and ease of use in commercial and scientific research. It should be noted that the methods of processing one-time received images allow solving various scientific and practical problems, however, during monitoring, when the dynamics of the state of objects (surface types) of the same territory is studied, the methodology and software remain questionable. One of the problems that hinder the study, for example, the dynamics of the state of objects on an agricultural field, is the radiometric accuracy of the obtained UAV images. In practice, the radiometric accuracy of measurements allows considering various lighting conditions at different periods of the day and year, by relevant types of digital sensors (digital cameras) used. The study is aimed at enabling a better flexibility when studying the dynamics of the state of objects located on the same territory at different times by taking into account the radiometric errors of UAV images when mapping the state of vegetation.

The research methodology uses the real images of the UAV obtained from June to August 2019 for an agricultural field with winter wheat.

**Keywords:** unmanned aerial vehicles, image, atmospheric correction, vegetation mapping, vegetation indices.
**DOI:** 10.21293/1818-0442-2021-24-4-73-78

*References*

1. Randle W., Bard T. *Small unmanned aerial vehicles. Theory and practice*. Moscow, Radar MMS, 2014. 184 p. (in Russ.)

2. Company Geoscan. Available at: https://www.geoscan.aero/ru, free (Accessed: October 01, 2021) (in Russ.).

3. Agisoft company. Available at: https://www.agisoft.com, free/ (Accessed: October 01, 2021) (in Russ.).

4. Company Dronemapper. Available at: https://dronemapper.com, free (Accessed: October 01, 2021) (in Russ.).

5. Company Pix4d Available at: https://www.pix4d.com, free (Accessed: October 01, 2021) (in Russ.).

6. Mohammed A.B.E.A., Ming F., Zhengwei F. Color balance for panoramic images. *Modern Applied Science*, 2015, vol. 9, no. 13, pp. 140–147.

7. Kataev M.Yu., Dadonova M.M., Efremenko D.S. Illumination correction of multi-time RGB images obtained using an unmanned aerial vehicle. *Lighting*, 2020, no. 6, pp. 19–25 (in Russ.)

8. Kataev M.Yu., Kislov A.V., Samokhin E.A. Assessment of the state of coniferous plants by computer vision methods. *Proceedings of TUSUR University*, 2020, vol. 23, no. 1, pp. 70–75 (in Rus.).

9. Kataev M.Yu., Yolgin K.S., Sorokin I.B. Methods of technical vision for mapping the state of agricultural fields. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 4, pp. 75–80 (In Russ.).

10. Shovengerdt R.A. *Remote sensing. Models and Methods of Image Processing*. Moscow, Technosphere, 2010. 560 p. (in Russ.).

11. Fetisov V.S., Neugodnikova L.M. *Unmanned Aircraft: Terminology, Classification, Current State*. Ufa. FOTON, 2014. 217 p. (in Russ.).

12. Rasmussen J., Ntakos J., Nielsen J., Svensgaard J., Poulsen R.N., Christensen S. Are vegetation indices derived from consumer-grade cameras mounted on UAVs sufficiently reliable for assessing experimental plots? *European Journal of Agronomy*, 2017, vol. 74, pp. 75–92.

13. Database Indexdatabase. Available at: https://www.indexdatabase.de/db/i.php, free (Accessed: October 01, 2021) (in Russ.).

14. Meteorological online resource Ventusky. Available at: https://www.ventusky.com, free (Accessed: October 01, 2021) (in Russ.).

15. Vermote E.F., Tanre D., Deuze J.L., Herman M., Morcrette J.-J. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S. An Overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, vol. 35, no. 3, pp. 675–686.

16. Space Agency NASA Available at: https://www2.jpl.nasa.gov/srtm, free (Accessed: October 01, 2021) (in Russ.).

17. Company NREL Available at: https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra.html, free (Accessed: October 01, 2021) (in Russ.).

18. Tao F., Zhang S., Zhang Z. Spatiotemporal changes of wheat phenology in China under the effects of temperature, day length and cultivar thermal characteristics *European Journal of Agronomy*, 2012, vol. 43, pp. 201–212.

**Mikhail Yu. Kataev**
Doctor of Science in Engineering, Professor
Department of Automated Control Systems (ACS),
Scientific Director of the Center for Space Monitoring
of the Earth from Space, Tomsk State University
of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85
Email: kmy@asu.tusur.ru

**Evgeny Yu. Kartashov**
Candidate of Science in Engineering, Associate Professor,
Department of Machines and Devices of Chemical
and Nuclear Production, Seversk Technological Institute,
National Research Nuclear University «MEPhI»
65, Kommunistichesky pr., Seversk, Russia, 636036
Phone: +7 (382-3) 78-02-40, +7-905-991-66-92
Email: kart.62@yandex.ru

**Dmitry S. Smirnov**
Master student Department of ACS TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36
Email: the.smd.public@gmail.com