

Реализация математических алгоритмов преобразования RGB-снимков с БПЛА в альbedo поверхности сверхвысокого разрешения с использованием спутниковых данных на примере полигона «Плейстоценовый парк»

Н. А. Петров¹, И. А. Репина^{2,5,6}, В. М. Степаненко^{1,5}, М. И. Варенцов^{1,2,5},
Д. Г. Чечин², В. Ю. Слободян³, М. В. Зимин^{1,7}, Н. С. Зимов⁴

¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия
E-mail: nial.03@mail.ru*

² *Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия*

³ *Институт экологического проектирования и изысканий, Москва, 119192, Россия*

⁴ *Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, 690041, Россия*

⁵ *Научно-исследовательский вычислительный центр
МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия*

⁶ *Майкопский государственный технологический университет
Майкоп, 385000, Россия*

⁷ *Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия*

Восстановление альbedo поверхности со сверхвысоким пространственным разрешением — актуальная задача для детальных расчётов компонент радиационного и теплового баланса. В данной работе обсуждаются методы восстановления альbedo поверхности в коротковолновом диапазоне спектра по RGB-снимкам (цветовая модель Red, Green, Blue) с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с помощью двух реализованных математических алгоритмов с привлечением данных обработки спутниковых снимков. Математическая постановка задачи связана с решением обратной задачи по восстановлению интеграла спектральной функции отражённого излучения и её нормировке по известным реперным значениям альbedo поверхности, полученным по спутниковым данным. В статье дано описание двух реализованных математических алгоритмов, которые отличаются способом решения обратной задачи (итерационным и неитерационным методом), а также указаны области их применимости. Так, значительным ограничением методов является требование однородных условий освещённости (суммарной коротковолновой радиации) по территории. Алгоритмы были протестированы в холодный (снежный) и тёплый (бесснежный) периоды по данным съёмки надирных ортофотопланов с БПЛА на территории полигона «Плейстоценовый парк» (Республика Саха). Проведена нормировка алгоритмов на реперных площадках по данным обработки снимков со спутников Landsat-8, -9 и Sentinel-2. Полученные значения альbedo поверхности имеют высокое пространственное разрешение, соответствующее разрешению ортофотоплана. Выявлены оптимальные условия использования алгоритмов при наличии однородной слоистой облачности, а также негативное влияние теней от прямой солнечной радиации. Таким образом, в настоящей работе показана возможность использования алгоритмов преобразования RGB-сигналов для многократного увеличения пространственного разрешения альbedo поверхности, получаемого со спутниковых снимков. В будущем планируется доработка алгоритмов и их тестирование на большей статистической выборке.

Ключевые слова: RGB-снимки, альbedo поверхности, БПЛА, ортофотоплан, спутниковые снимки, математические алгоритмы

Одобрена к печати: 30.09.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-9-28

Введение

Альbedo поверхности представляется важнейшей характеристикой, необходимой для расчёта радиационного и теплового баланса земной поверхности (Hansen, Takahashi, 1984; Pielke et al., 2002). В настоящее время в климатической повестке поднят важный вопрос непря-

мых методов борьбы с глобальным потеплением, которые не связаны с ограничением эмиссий парниковых газов. Одним из главных методов по работам (Latham et al., 2008; Lenton, Vaughan, 2009) является антропогенное и естественное изменение отражательной способности земной поверхности. Так, в публикациях (Завалишин, 2010; Корнева, Семенов, 2016) показано, что увеличение среднего планетарного альbedo Земли на 1 % приводит к уменьшению температуры примерно на 1 °С. Таким образом, изменение альbedo поверхности способно регулировать изменчивость климатической системы, смягчая или усиливая влияние других факторов.

Измерение альbedo поверхности с высоким пространственным разрешением актуально для задач детального восстановления тепловых энергетических потоков в вихреразрешающих гидродинамических моделях, таких как LES (*англ.* Large Eddy Simulation) (Лыкосов и др., 2012). Современная аппаратура спутниковых приборов Landsat-8, -9 OLI (*англ.* Operational Land Imager) и Sentinel-2 MSI (*англ.* Multi-Spectral Instrument) позволяет восстанавливать альbedo поверхности разрешением до 20–30 м, при этом отмечается, что при очень высоком разрешении (<30 м) имеется высокая погрешность и неопределённость, связанная с приближённостью формул алгоритма восстановления альbedo поверхности. Для некоторых задач детального моделирования турбулентных потоков и теплового баланса поверхности необходимо более высокое пространственное разрешение альbedo поверхности в связи с высокой неоднородностью и мозаичностью структуры ландшафта. Для решения данной задачи могут быть использованы беспилотные летательные аппараты (БПЛА), преимущество которых заключается, в первую очередь, в мобильности и получении данных с высоким пространственным разрешением. В связи с этим актуален вопрос разработки аппаратно-программных комплексов для БПЛА, предназначенных для определения альbedo поверхности с необходимым пространственным разрешением.

В настоящее время проведены работы по созданию аппаратно-программных комплексов, которые основаны на различных методах получения альbedo поверхности с БПЛА. Так, в работе (Canisius et al., 2019) описана разработанная аппаратная система на базе БПЛА Matrice 600 с установленными пиранометрами и спектрометрами, направленными вниз и измеряющими отражённое коротковолновое излучение, а также комплекс наземного блока измерений, который определяет нисходящее коротковолновое излучение. В данной статье получено хорошее согласие восстановленного альbedo поверхности с БПЛА в сравнении со спутниковыми снимками. В работе (Журавский и др., 2018) описывается оригинальная методика оценки альbedo поверхности по средним значениям RGB-сигналов (цветовая модель RGB (*англ.* Red, Green, Blue)) камеры по зависимостям от фотограмметрических и экспозиционных параметров камеры на БПЛА. Также следует отметить публикации (Cao et al., 2018; Lebourgeois et al., 2008), где представлена методика получения спектральной отражательной способности поверхности по логарифмической зависимости от RGB-значений в пикселе. В статье (Алиева и др., 2024) решается задача оптимизации альбедометрических измерений с БПЛА поверхности с использованием данной логарифмической зависимости. По похожей стандартной методике восстановления альbedo по RGB-снимкам поверхности в работе (Bartimiński, Siłuch, 2022) проводится определение альbedo поверхности с БПЛА по калибровкам значений RGB-каналов на основе данных спектрорадиометра. Также следует отметить методы коррекции полученных спектральных коэффициентов отражения поверхности с учётом топографических и атмосферных воздействий, параметров фотографий, которые представлены в публикации (Corripio, 2004). В работе (Dumont et al., 2009) предложен алгоритм по восстановлению альbedo поверхности ледников по наземным RGB-снимкам.

Цель настоящего исследования — разработка аппаратно-программного комплекса по измерению и восстановлению альbedo поверхности со сверхвысоким пространственным разрешением на основе надирных RGB-снимков с БПЛА коптерного типа на примере DJI Mavic 3. Для реализации этой цели в работе решаются две научные задачи. Главная задача заключается в реализации и адаптации математических алгоритмов преобразования RGB-сигналов с надирного ортофотоплана, полученного с камеры БПЛА, в альbedo поверхности. Вторая задача состоит в применении и апробации разработанных алгоритмов на при-

мере ортофотопланов, снятых на полигоне «Плейстоценовый парк» (Республика Саха). Калибровки алгоритмов были проведены по данным спутниковых снимков Landsat-8, -9 OLI и Sentinel-2 MSI.

Методы и данные исследования

Математическая постановка задачи

В настоящее время все снимки кодируются с использованием той или иной системы представления цветов, которые задаются с помощью цветовых координат. Математически компоненты цветовой модели X_i связаны с поступающим излучением $S(\lambda)$ на поверхность принимающего устройства соотношениями, которые приведены в работах (Жданов, Потемкин, 2010; Sun et al., 1999). Математически цветовые координаты являются коэффициентами разложения спектральной функции плотности поступающего излучения по базису функций чувствительности $x_i(\lambda)$. Однако из-за пересечения областей значений базисных функций данные коэффициенты не составляют ортогональную систему и поэтому представляются некоторым приближением в линейном цветовом пространстве.

Снимки камеры чаще всего кодируются с использованием RGB-цветовой системы. Следует отметить, что не все реальные цвета можно выразить через положительные значения RGB, что характерно, например, для некоторых квазимонохроматических цветов. Также широко используется цветовое пространство CIE XYZ (англ. International Commission on Illumination), в котором комбинации неотрицательных чисел отображают тот или иной цвет (Stokes et al., 1996). Так, в модели XYZ число Y представляет собой относительную яркость, Z почти соответствует синему цвету, а X демонстрирует некоторое сочетание трёх цветов в цветовой системе RGB (Джадд, 1978). Так как отражательная способность поверхности определяется отношением отражённой и суммарной радиации (Тимофеев, Васильев, 2003), то при однородной освещённости альbedo поверхности будет зависеть от интегральной характеристики отражённой радиации. Математическая постановка задачи (Sun et al., 1999) в настоящей работе направлена на восстановление характеристики отражённого излучения от поверхности для каждого пикселя надирных снимков путём решения обратной задачи по восстановлению спектральной функции отражённого излучения поверхности $S^\uparrow(\lambda)$. Таким образом, необходимо найти, по возможности, гладкое и неотрицательное решение системы интегральных уравнений относительно спектра $S^\uparrow(\lambda)$:

$$\begin{cases} X_i = k_i \int_{\lambda_{\min \text{VIS}}}^{\lambda_{\max \text{VIS}}} S^\uparrow(\lambda) x_i(\lambda) d\lambda, \\ \forall \lambda : S^\uparrow(\lambda) \geq 0, S^\uparrow(\lambda) \in C^0(\lambda), \end{cases} \quad (1)$$

где X_i — компоненты цветовой модели; k_i — коэффициент, зависящий от размерности функции спектральной плотности излучения; $\lambda_{\min \text{VIS}}$ и $\lambda_{\max \text{VIS}}$ — границы длин волн для видимого VIS (англ. visible) излучения; λ — длина волны.

Если проинтегрировать найденную спектральную функцию отражённого излучения $S^\uparrow(\lambda)$ по длине волны, можно получить характеристику интегральной отражённой радиации Q^\uparrow , которая при условии однородной суммарной радиации по территории ($Q^\downarrow = \text{const}$) пропорциональна альbedo поверхности A для каждого значения пикселя:

$$\begin{cases} Q^\uparrow = \int_{\lambda_{\min \text{SW}}}^{\lambda_{\max \text{SW}}} S^\uparrow(\lambda) d\lambda, & Q^\downarrow = \int_{\lambda_{\min \text{SW}}}^{\lambda_{\max \text{SW}}} S^\downarrow(\lambda) d\lambda, \\ \text{при } Q^\downarrow = \text{const}(x, y), & A = \frac{Q^\uparrow}{Q^\downarrow} = mQ^\uparrow + \varepsilon, \end{cases} \quad (2)$$

где $\lambda_{\min SW}$ и $\lambda_{\max SW}$ — границы длин волн для коротковолнового SW (англ. shortwave) излучения; m — коэффициент линейной зависимости между альбедо поверхности и характеристикой отражённой радиации; ϵ — поправка пропорциональной зависимости для приведения к правильному значению альбедо по реперным данным. Коэффициенты m и ϵ ищутся по статистической корреляционной зависимости результатов вычислений алгоритмов и некоторых реперных значений альбедо поверхности. При этом необходимо отметить, что данные коэффициенты являются неявными функциями фотограмметрических и экспозиционных параметров оптической камеры, а также её спектральной чувствительности. Таким образом, по соотношениям (2) можно произвести нормировку вычисленных значений интеграла отражённой радиации по алгоритму, зная известные реперные значения альбедо поверхности. В настоящей работе реперные значения альбедо поверхности были получены из обработки спутниковых снимков.

Решение системы интегральных уравнений (1) для конвертации RGB-сигналов в спектральное представление математически неоднозначно и имеет бесконечное множество решений. Так, было предложено несколько независимых способов и алгоритмов (Валиев и др., 2015; Жданов, Потемин, 2010; Afanasiev et al., 2015; Glassner, 1989; Smits, 1999; Sun et al., 1999), основывающихся на выборе базисных функций, взвешивание которых на значения R, G, B даёт спектрограмму требуемого RGB-цвета. Выбор алгоритмов должен быть основан на следующих физических требованиях и ограничениях, согласно работам (Жданов, Потемин, 2010; Afanasiev et al., 2015; Grassmann, 1853):

- 1) применимость на всём цветовом пространстве: вычисление интеграла спектральной функции излучения для любых возможных значений триплета RGB;
- 2) допустимая точность обратного преобразования найденной функции спектральной плотности в исходные значения RGB;
- 3) сходимости решения и гладкости функции спектра. При этом близкие значения триплета RGB должны переходить в близкие значения функции спектральной плотности;
- 4) вычислительная эффективность алгоритма по времени для относительно быстрого преобразования больших объёмов данных.

При этом математически постановка задачи восстановления альбедо поверхности имеет ряд серьёзных недостатков и ограничений на использование:

1. Требование однородности значений нисходящей (суммарной) коротковолновой радиации для всей территории снимка. Оптимальными для данной цели, вероятно, являются плотные и однородные слоистые облачные условия.
2. Алгоритмы физически направлены на восстановление альбедо поверхности для видимого диапазона, для которого и проводится съёмка ортофотоплана. Статистическая нормировка на значение альбедо поверхности во всём коротковолновом диапазоне физически менее обоснована.

Численные алгоритмы преобразования RGB в спектр

Данная задача была решена при реализации двух алгоритмов численного решения системы интегральных уравнений (1), которые существенно различаются по методам решения и вычислений. При этом необходимо отметить, что при решении выполняется технический переход из цветовой системы RGB в XYZ, так как для второй цветовой системы известны аналитические аппроксимации функций чувствительности. Они задаются через линейные комбинации гауссовских функций согласно выражениям (Wyman et al., 2013):

$$g(\mu, \tau_1, \tau_2) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{\tau_1^2(x-\mu)^2}{2}\right), & x < \mu, \\ \exp\left(-\frac{\tau_2^2(x-\mu)^2}{2}\right), & x \geq \mu, \end{cases}$$

где параметры μ , τ_1 , τ_2 в функции $g(\mu, \tau_1, \tau_2)$ определяются для каждой кривой чувствительности:

$$\begin{cases} \overline{x(\lambda)} = 1,056g(599,8;0,0264;0,0323) + 0,362g(442,0;0,0624;0,0374) - \\ \quad - 0,065g(501,1;0,0490;0,0382), \\ \overline{y(\lambda)} = 0,821g(568,8;0,0214;0,0247) + 0,286g(530,9;0,0613;0,0322), \\ \overline{z(\lambda)} = 1,217g(437,0;0,0845;0,0278) + 0,681g(459,0;0,0385;0,0725). \end{cases}$$

Алгоритм перехода из RGB-системы в XYZ является стандартным и проводится через гамма-коррекцию (3) и матричный переход (4):

$$C_{lin} = \begin{cases} \frac{C_{sRGB}}{12,92}, & C_{sRGB} \leq 0,04045, \\ \left(\frac{C_{sRGB} + 0,055}{2} \right)^{2,4}, & C_{sRGB} > 0,04045, \end{cases} \quad (3)$$

где $C_{sRGB} = (R_{255}, G_{255}, B_{255})$, $C_{lin} = (R_{lin}, G_{lin}, B_{lin})$ — исходная и линейризованная масштабированные RGB-цветовые системы соответственно. Матрица перехода из линейризованных масштабированных координат $(R_{lin}, G_{lin}, B_{lin})$ к XYZ-системе:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,4124 & 0,3576 & 0,1805 \\ 0,2126 & 0,7152 & 0,0722 \\ 0,0193 & 0,1192 & 0,9505 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R_{lin} \\ G_{lin} \\ B_{lin} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Ключевая идея алгоритма № 1 по работе (Afanasiev et al., 2015) основана на итерационном поиске приближения спектральной функции отражённой радиации $S^{\uparrow*}(\lambda)$ в линейном пространстве трёх базисных функций чувствительности $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$:

$$S^{\uparrow*}(\lambda) = K_x x(\lambda) + K_y y(\lambda) + K_z z(\lambda). \quad (5)$$

Для нахождения неизвестных коэффициентов в выражении (5) на каждом i -м шаге вычисляются значения приближений цветовых координат $C_i^* = (X_i^*, Y_i^*, Z_i^*)$ по оценке, рассчитанной на данном шаге спектральной функции $S_i^{\uparrow*}(\lambda)$:

$$C_i^* = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S_i^{\uparrow*}(\lambda) c(\lambda) d\lambda, \quad S_0^{\uparrow*}(\lambda) = 0, \quad (6)$$

где $c(\lambda) = (x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda))$ — функции чувствительности. Далее необходимо определить разность между истинным значением $C_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ и его оценками C_i^* по уравнению (6): $\Delta C_i = C_i - C_i^*$. Затем вычисляются коэффициенты K_{C_i} по следующему выражению:

$$K_{C_i} = \frac{\Delta C_i}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} c^2(\lambda) d\lambda}. \quad (7)$$

Расчёт $(i+1)$ -го приближения спектра происходит по формуле (7) с использованными значениями коэффициентов:

$$S_{i+1}^{\uparrow*}(\lambda) = S_i^{\uparrow*} + K_{X_i} x(\lambda) + K_{Y_i} y(\lambda) + K_{Z_i} z(\lambda).$$

Алгоритм повторяется для каждого триплета значений RGB (для каждого пикселя) до условия $\max(\Delta C_i) < \varepsilon$, где значение допустимой ошибки ε выбирается пользователем. Для настоящей работы было принято $\varepsilon = 10^{-3}$.

Второй алгоритм решения (№ 2) также основан на поиске спектральной функции в линейном цветовом пространстве, однако в качестве базисных функций выбраны три гауссовские функции $f_i(\lambda)$ согласно выражению (Sun et al., 1999):

$$S^{\uparrow*}(\lambda) = K_X f_X(\lambda) + K_Y f_Y(\lambda) + K_Z f_Z(\lambda). \quad (8)$$

Гауссовские базисные функции задавались в соответствии с формулой из работы (Sun et al., 1999):

$$f_i(\lambda) = \exp\left[-\left[\frac{2(\lambda_i - \lambda_{i,c})}{\omega_i}\right]^2 \ln 2\right], \quad (9)$$

где $\lambda_{i,c}$ — длины волн в максимуме гауссовских функций (9). В настоящей работе предлагается выбрать их согласно максимумам функций чувствительности соответствующей цветовой модели, т. е. $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$: $\lambda_{i,c} = (600, 550, 445)$ нм. Весовой коэффициент ω_i определялся из условий (Sun et al., 1999):

$$\begin{cases} \omega_1 = \chi_{12}(C)\omega_{\min} + (1 - \chi_{12}(C))\omega_{\max}, \\ \omega_2 = \chi_{32}(C)\omega_{\min} + (1 - \chi_{32}(C))\omega_{\max}, \\ \omega_3 = \min(\omega_1, \omega_2), \\ \chi_{ij} = \chi_{ji} = \frac{|C_i - C_j|}{C_i + C_j}. \end{cases}$$

Следующим шагом численно вычисляется интегральная матрица t_{ij} в виде попарных скалярных произведений гауссовских функций $f_i(\lambda)$ и функций чувствительностей $c_j(\lambda)$ (Sun et al., 1999):

$$t_{ij} = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} f_i(\lambda)c_j(\lambda) d\lambda, \quad i, j = (1, 2, 3).$$

Линейные коэффициенты K_C разложения спектральной функции по базису рассчитываются через решение линейного матричного уравнения (Sun et al., 1999):

$$\begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x(\lambda) \\ y(\lambda) \\ z(\lambda) \end{pmatrix} t_{ij}(\lambda)^{-1}.$$

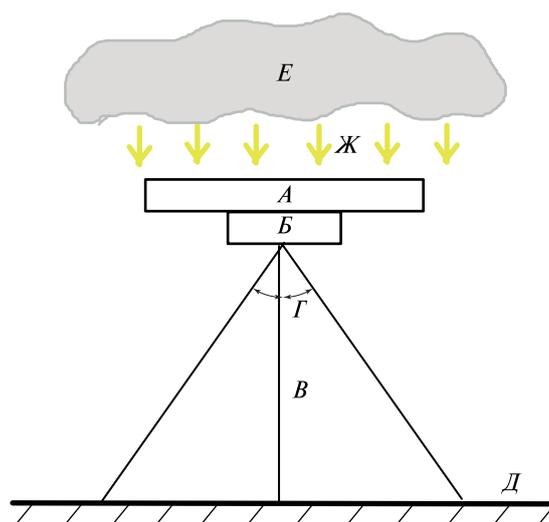
Вычисленные коэффициенты подставляются в выражение (8), которое и является приближением искомой функции спектральной плотности излучения.

Следует отметить, что в алгоритмах отрицательные значения функции спектра $S^{\uparrow}(\lambda)$ приравнивались нулю. Также для алгоритмов был расширен спектральный диапазон для более аккуратных расчётов: $\lambda_{\min \text{ VIS}} = 300$ нм, $\lambda_{\max \text{ VIS}} = 800$ нм. Стоит отметить, что интегральное значение спектральной функции вычислялось по формуле (2).

Съёмка ортофотопланов высокого разрешения

Описанные выше математические алгоритмы преобразования RGB-координат в спектр в настоящей работе применялись и адаптировались для ортофотопланов, полученных при помощи обработок надирных аэрофотоснимков с оптической камеры БПЛА коптерного типа. Принципиальная схема съёмки ортофотопланов и «идеальных» условий для решения задачи восстановления альбедо поверхности показана на *рис. 1* (см. с. 15). В целом данный метод универсален и может быть применён в дальнейшем для снимков, полученных с других устройств и приборов.

Рис. 1. Принципиальная схема съёмки надирных ортофотопланов с БПЛА: А — расположение БПЛА, Б — RGB-камера БПЛА, В — оптическая ось объектива, Г — угол визирования, Д — поверхность визирования. Идеальные условия для восстановления альbedo поверхности: Е — сплошная однородная облачность, Ж — однородное поступление на поверхность нисходящей коротковолновой (суммарной) радиации



Для построения ортофотопланов на исследуемой территории была выполнена надирная аэрофотосъёмка с использованием БПЛА DJI Mavic 3 Thermal в холодный (снежный) и тёплый (бесснежный) периоды года. Для создания снимков использовалась основная широкоугольная камера дрона со следующими техническими характеристиками: угол обзора 84° , фокусное расстояние 4,4 мм, 35-мм эквивалент 24 мм, разрешение каждой фотографии составило около 12 МП (3000×4000). Полевые работы проводились на полигоне «Плейстоценовый Парк» (Республика Саха, Россия), который находится в зоне лесотундры и характеризуется большим разнообразием типов поверхности (Fischer et al., 2022; Zimov, 2005). Аэрофотосъёмка выполнялась в снежных условиях в апреле, а также в августе в условиях вегетационного развития растений. Параметры использованных в работе ортофотопланов представлены в табл. 1. Настройки камеры были заданы в ручном режиме и не менялись в ходе съёмок для соблюдения однородных технических условий регистрации отражённого сигнала: диафрагма — $f/2,8$; выдержка — $1/320$ с; светочувствительность — ISO-100; экспокоррекция — 0,3 шаг; фокусное расстояние — 4 мм; светосила — 2,97; экспозамер усреднённый, без вспышки; представление цвета — sRGB. Построение ортофотопланов с надирных аэроснимков было выполнено с использованием программного обеспечения Agisoft Metashape Professional (Agisoft..., 2019). Также проведена географическая коррекция привязки полученных ортофотопланов относительно реперных объектов на местности.

Полученные ортофотопланы были сохранены в виде RGB-изображений с географической привязкой в растровом формате geotiff в системе координат WGS-84/Pseudo-Mercator (EPSG:3857). В дальнейшем данные каналов RGB из ортофотопланов были использованы для реализации описанных выше алгоритмов по восстановлению альbedo поверхности территории по RGB-значениям ортофотоплана.

Таблица 1. Параметры выполненной аэрофотосъёмки и характеристики построенных ортофотопланов, использованных в работе

Дата, время съёмки (UTC+11)	Количество фотографий	Примерная высота съёмки, м	Размер/разрешение, см/пиксель	Преобладающий тип облачности, условия освещённости
21.04.2024, 10:55–11:39	538	300	25 039×21 017/9,5	Сплошная слоистая облачность, однородная
11.08.2024, 15:52–16:52	835	364	32 167×17 399/12,1	Слоисто-кучевые облака, относительно однородные

Примечание: UTC — *англ.* Coordinated Universal Time.

Алгоритмы преобразования спутниковых снимков в альbedo поверхности

Данные обработок спутниковых снимков в работе использованы в качестве реперных значений альbedo поверхности для построения регрессионных соотношений в выражении (2) при нормировке вычисленных алгоритмами характеристик.

Мультиспектральные спутниковые снимки позволяют получить характеристику спектрального альbedo земной поверхности с высоким разрешением. Восстановление интегрального значения альbedo поверхности во всём коротковолновом спектральном диапазоне узкополосных каналов выполняется с использованием нескольких уровней обработки данных, которые включают в себя исходные данные спектрального излучения на верхней границе атмосферы — уровень L1, данные с атмосферной коррекцией — уровень L2 и альbedo поверхности, полученное при преобразовании узкополосных сигналов в широкополосный, т. е. для всего коротковолнового диапазона, — уровень L3. Следует отметить, что в настоящее время нет единого алгоритма, который позволил бы рассчитывать альbedo поверхности при любых атмосферных условиях и для любых типов поверхности. Поэтому предложено множество методик преобразования данных спутниковых спектральных каналов в альbedo поверхности при различных геофизических условиях (Andres-Anaya et al., 2023; Li et al., 2018; Lin et al., 2022; Wu et al., 2024). При этом чем больше спектральных каналов, тем точнее будет определение альbedo.

Наилучшим пространственным разрешением и большим количеством спектральных каналов обладают спутниковые миссии Landsat-8, -9 и Sentinel-2 (<http://earthexplorer.usgs.gov>, <http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-2-toolbox/sentinel-2-toolbox-features/>). В целом диапазоны спектральных каналов мультиспектральных радиометров на Landsat-8, -9 и Sentinel-2 похожи. При этом спутниковая миссия Landsat-8, -9 (OLI) обеспечивает самый длинный временной ряд наблюдений за земной поверхностью, а наиболее полную информацию по количеству каналов предоставляет камера MSI на Sentinel-2 (установлена на двух спутниках: Sentinel-2A и Sentinel-2B (Phiri et al., 2020; Segarra et al., 2020; van der Meer et al., 2014)).

Традиционный алгоритм оценки широкополосного альbedo из наблюдений полярно-орбитальных спутников состоит из трёх шагов: атмосферная коррекция, преобразования узкополосной полосы в широкополосную и угловое моделирование двунаправленной функции отражения BRDF (*англ.* bidirectional reflectance distribution function). Функция BRDF позволяет корректировать значения отражательной способности в значения альbedo поверхности, она применяется для исправления эффектов угла зрения и угла освещения. Однако если предположить отражение от поверхности земли изотропным (Ламбертовским), то хорошей оценкой широкополосного альbedo является линейная комбинация узкополосных спектральных альbedo поверхности с разными весовыми коэффициентами. При этом для данного метода необходимо использовать данные второго уровня (L2), прошедшие атмосферную коррекцию. Она необходима для исключения влияния атмосферы на приходящий сигнал на спутниковый прибор с поверхности Земли. Итак, искомое альbedo поверхности α вычисляется по формуле линейной комбинации вида (D'Urso, Calera Belmonte, 2006):

$$\alpha = \sum_{i=1}^N \rho_i \omega_i, \quad (10)$$

где ρ_i — отражательная способность поверхности для i -й спектральной полосы уровня L2; ω_i — весовые коэффициенты; N — количество каналов. Есть два основных подхода для определения весовых коэффициентов ω_i . Первый метод основан на множественной линейной регрессии между измеренным приземным альbedo и отражательной способностью поверхности для каждого канала на спутнике. При этом может быть применено ограничение на веса

$\left(\sum_{i=1}^N \omega_i = 1, \omega_i \geq 0 \right)$ (D'Urso, Calera Belmonte, 2006; Jiménez-Muñoz et al., 2014) или без него.

При учёте нелинейных эффектов, в некоторых методах, в уравнении регрессии используются квадратичные зависимости. Второй подход физически более аргументирован, так как основан на прямом расчёте весовых коэффициентов:

$$\omega_i = \frac{\int_{LO_i}^{UP_i} E_{SUN_\lambda} d\lambda}{\int_{400}^{2400} E_{SUN_\lambda} d\lambda},$$

где $E_{\text{SUN},\lambda}$ — приходящая на верхнюю границу атмосферы спектральная солнечная радиация на длине волны λ ; UP_i и LO_i — соответственно верхняя и нижняя граница длин волн для полосы прибора i . Неопределённость данного подхода связана с тем, что границы спектральных интервалов могут меняться со временем. Веса зависят от конкретного типа местности, спутникового прибора и атмосферных условий. Также ω_i зависят от типа поверхности, например, достаточно сильно могут изменяться для снежных и бесснежных условий. В *табл. 2* представлены использованные в настоящей работе различные регрессионные зависимости для снежных и бесснежных условий, которые позволяют переходить от спектральной отражательной способности поверхности к интегральному альбедо поверхности для спутниковых приборов OLI (Landsat-8, -9) и MSI (Sentinel-2) по формуле (10).

Таблица 2. Использованные алгоритмы преобразования узкоспектральных коэффициентов отражения по спутниковым данным в широкополосное коротковолновое альбедо поверхности

Номер метода, условия, спутник (прибор)	Уравнение для альбедо α	Источник
№ 1, снежная поверхность, Sentinel-2 (MSI)	$0,726b_3 - 0,322b_3^2 - 0,051b_8 + 0,581b_8^2$	(Fan et al., 2021; Knap et al., 1999)
№ 2, снежная поверхность, Sentinel-2 (MSI)	$0,356b_2 + 0,130b_4 + 0,373b_8 + 0,085b_{11} + 0,072b_{12} - 0,0018$	(Fan et al., 2021; Liang, 2001)
№ 1, снежная поверхность, Landsat-8, -9 (OLI)	$-0,0052 + 1,2242b_2 - 0,4318b_3 - 0,3446b_4 + 0,3367b_5 + 0,1834b_6 + 0,2555b_7$	(Wang et al., 2016)
№ 2, снежная поверхность, Landsat-8, -9 (OLI)	$0,726b_3 - 0,322b_3^2 - 0,051b_5 + 0,581b_5^2$	(Fan et al., 2021; Knap et al., 1999)
№ 1, бесснежная поверхность, Sentinel-2 (MSI)	$0,1324b_2 + 0,1269b_3 + 0,1051b_4 + 0,0971b_5 + 0,0818b_7 + 0,0722b_8 + 0,0167b_{11} + 0,0002b_{12}$	(Vanino et al., 2018)
№ 2, бесснежная поверхность, Sentinel-2 (MSI)	$0,2266b_2 + 0,1236b_3 + 0,1573b_4 + 0,3417b_8 + 0,1170b_{11} + 0,0338b_{12}$	(Bonafoni, Sekertekin, 2020)
№ 1, бесснежная поверхность, Landsat-8, -9 (OLI)	$0,043 + 0,082b_1 + 0,064b_2 + 0,173b_3 + 0,114b_4 + 0,237b_5 + 0,252b_6 + 0,0034b_7$	(Baldinelli et al., 2017)
№ 2, бесснежная поверхность, Landsat-8, -9 (OLI)	$0,0366 + 0,4739b_2 - 0,4372b_3 + 0,1652b_4 + 0,2831b_5 + 0,1072b_6 + 0,1029b_7$	(Angelini et al., 2021)

Данные спектральных каналов приборов MSI и OLI были получены в ближайшие к съёмкам ортофотопланов безоблачные дни спутниковых миссий Landsat-8, -9 и Sentinel-2 над исследуемой территорией для исключения влияния облачности в дальнейшем анализе. Так, для условий снежной поверхности в апреле были задействованы данные за 25.04.2024, 17.04.2024 и 26.04.2024 спутниковых съёмки Landsat-8, -9 и снимки за 16.04.2024, 23.04.2024, 25.04.2024 спутниковых съёмки Sentinel-2. Для условий летней съёмки были использованы снимки за 07.08.2024 для Landsat-8 и 08.08.2024 для Sentinel-2.

Таким образом, было проведено преобразование спектральных коэффициентов отражения поверхности всех спутниковых данных (см. *табл. 2*) в интегральное альбедо поверхности по двум методам для двух сезонов года: в тёплый (бесснежный) и холодный (снежный). В дальнейшем выполнено осреднение по различным методикам (см. *табл. 2*) для разных спутников отдельно для снежных и бесснежных условий съёмки. Обработанные вычисления использовались для нормировки и валидации алгоритмов преобразования RGB-сигналов в альбедо поверхности со сверхвысоким пространственным разрешением.

Результаты и обсуждение

Тестирование математических алгоритмов

Было выполнено первичное тестирование реализованных и описанных выше двух математических алгоритмов на точность восстановления спектральных функций и их интегральных характеристик. Данное тестирование позволяет теоретически проверить некоторые из требований, предъявляемые к алгоритмам, и обеспечивает в дальнейшем надёжность восстановления интеграла спектральной функции отражённого излучения, необходимого для преобразования в альbedo поверхности.

На *рис. 2* представлены восстановленные спектры некоторых «идеальных цветов»: красного ($RGB = (n, 0, 0)$), зелёного ($RGB = (0, n, 0)$), синего ($RGB = (0, 0, n)$) и белого ($RGB = (n, n, n)$) при различных целочисленных значениях параметра n .

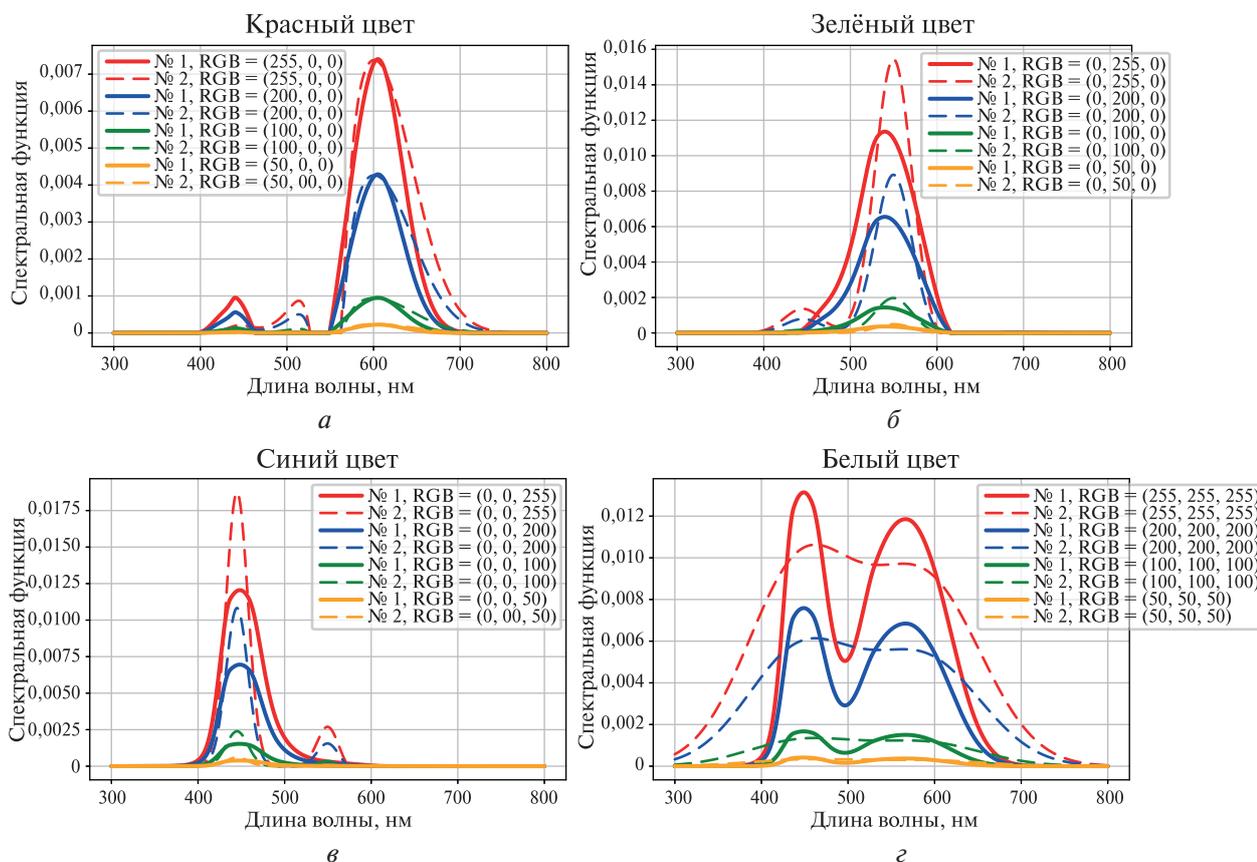


Рис. 2. Функции спектральной плотности, восстановленные при различной интенсивности цветковых координат RGB по алгоритмам № 1 и № 2 для некоторых идеальных цветов: *a* — красного, *б* — зелёного, *в* — синего и *г* — белого

Анализируя данные графики (см. *рис. 2*), стоит отметить относительную схожесть в расчётах первого и второго методов, при этом точки локальных максимумов функций практически совпадают. Однако вычисляемые спектры неидентичны, что является следствием отсутствия единственности в решении обратной задачи и использования различных методов восстановления. При этом представленные спектральные функции — гладкие, за исключением конечного числа точек, в которых была проведена корректировка на отрицательные значения.

Далее рассмотрим нормированные спектральные функции для некоторых пропорциональных значений координат RGB (*рис. 3*, см. с. 19), которые были вычислены по формуле:

$$S_{\text{norm}}(\lambda) = S(\lambda) / \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda) d\lambda, \text{ где } S(\lambda) \text{ — рассчитанная по алгоритму спектральная функция.}$$

Анализируя полученные нормированные функции спектра следует отметить, что при разной интенсивности координат, но при одном и том же их отношении, функции спектра не совпадают. Это иллюстрирует нелинейность нормированных спектральных функций в зависимости от отношения значений RGB-координат.

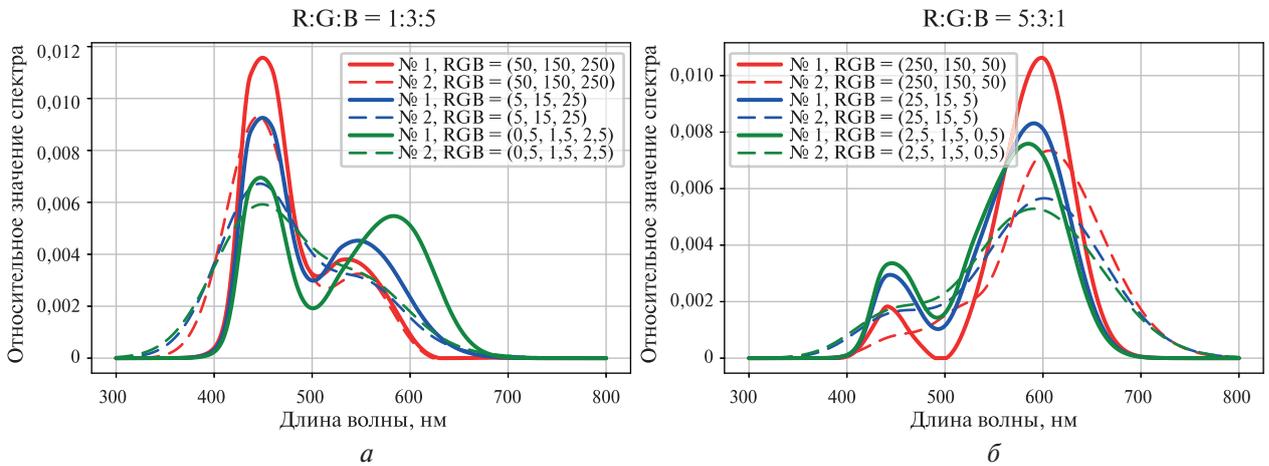


Рис. 3. Нормированные функции спектральной плотности для алгоритмов № 1 и № 2 для некоторых пропорциональных значений цветковых координат RGB в отношении 1:3:5 (а), 5:3:1 (б) при различной интенсивности цветковых координат

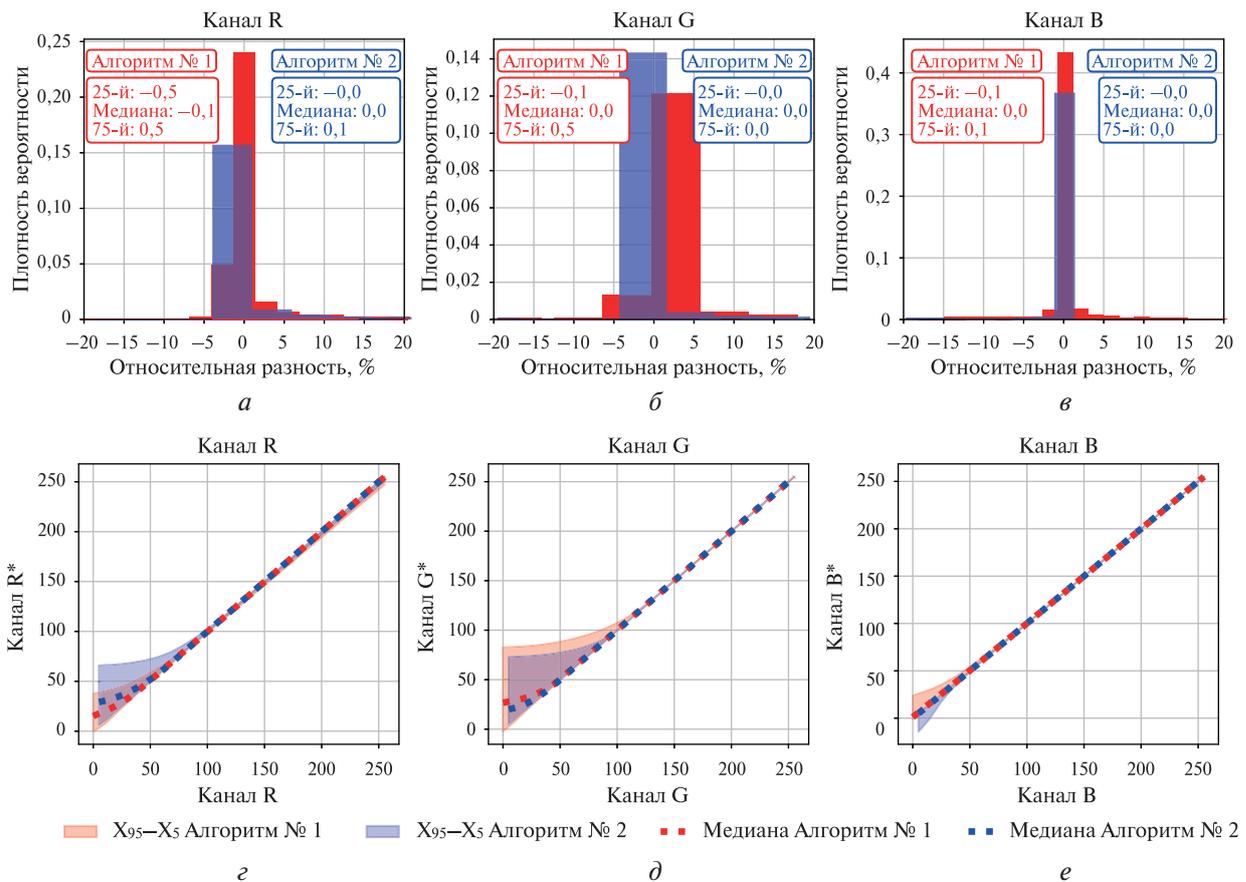


Рис. 4. Гистограммы, медианные значения (X_{50}), 25-й (X_{25}) и 75-й (X_{75}) проценти относительной разности вычисленного и исходного значения для каналов: а – R; б – G; в – B. Зависимость медианных значений и доверительного интервала ($X_{95} - X_5$), вычисленных от исходных значений для каналов: г – R; д – G; е – B

Далее проводилось тестирование корректности обратной свёртки значений RGB-координат. Для этого вначале выполнялось прямое преобразование RGB-значений в спектральную функцию плотности $S_G^*(\lambda): \text{RGB} \xrightarrow{\text{algorithm}} S_G^*(\lambda)$. Затем производилось обратное преобразование спектра в триплет значений $\text{RGB}^*: S_G^*(\lambda) \xrightarrow{\text{def}} \text{RGB}^*$. Данная процедура была протестирована на выборке каждой из трёх RGB-координат от 0 до 255 с шагом 2. Результаты сравнений представлены в виде относительной разности вычисленного (algorithm) и исходного (source) значения для каждой из координат RGB ($C, \%$) в форме гистограммы на *рис. 4* (см. с. 19), которая была вычислена по формуле:

$$\Delta C = \frac{C(\text{algorithm}) - C(\text{source})}{C(\text{source})} \times 100 \%$$

Получены удовлетворительные результаты проверки по обратной свёртке: медианная относительная ошибка восстановления компонент RGB-координат по модулю не превышает 0,1 %, максимальный интерквартильный размах ($X_{75} - X_{25}$) составляет около 1 %. Однако были обнаружены довольно сильные ошибки восстановления отдельных каналов при малых значениях исходных координат RGB (менее 50–100), которые видны на *рис. 4г–е*. Анализ показал, что ошибки возникают чаще всего при приближении цветов к идеальным, т. е. при двух других координатах RGB, которые близки к нулевому значению.

Для задач настоящей работы наиболее важно правильное восстановление интеграла исходной задаваемой спектральной функции. Для этой проверки был создан набор из гауссовских функций стандартного вида $S_G(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{\sigma^2}\right]$, где λ_0 представляет длину волны максимума гипотетической исходной спектральной функции; σ определяет ширину кривой. Для тестирования параметр λ_0 задан в диапазоне от 400 до 740 нм с шагом 1 нм, σ — в диапазоне от 20 до 70 нм с шагом 1 нм. Полученные спектральные функции были преобразованы в координаты RGB: $S_G(\lambda) \xrightarrow{\text{def}} \text{RGB}$. В рамках теста были исключены спектры с отрицательными координатами для более аккуратных расчётов. Таким образом, общее число выборок составило 2082. Затем по алгоритмам по вычисленным значениям RGB рассчитаны приближения исходных спектров $S_G^*(\lambda): \text{RGB} \xrightarrow{\text{algorithm}} S_G^*(\lambda)$. Далее были вычислены отношения интегралов h исходной и вычисленной по её RGB-координатам спектральной функции по следующей формуле:

$$h = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_G(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_G^*(\lambda) d\lambda}$$

Распределение значений отношения h показано на *рис. 5* (см. с. 21).

Из *рис. 5* видно, что оба алгоритма имеют выраженный максимум, причём у алгоритма № 2 медиана отношения равна 1. У алгоритма № 1 наблюдается правая асимметрия в распределении, при этом медиана $h > 1$ на 13 %. Таким образом, стоит отметить, что итерационный алгоритм (№ 1) несколько занижает интегральные значения исходного спектра, однако данная особенность численного решения нивелируется впоследствии нормировкой в результате статистической обработки по реперным значениям по формуле (2). По интерквартильному размаху алгоритмы удовлетворительно восстанавливают исходные интегралы спектра (около 9 % для алгоритма № 1 и около 3 % для алгоритма № 2), при этом лучший результат с наименьшим вариационным размахом отношения был показан неитерационным алгоритмом (№ 2).

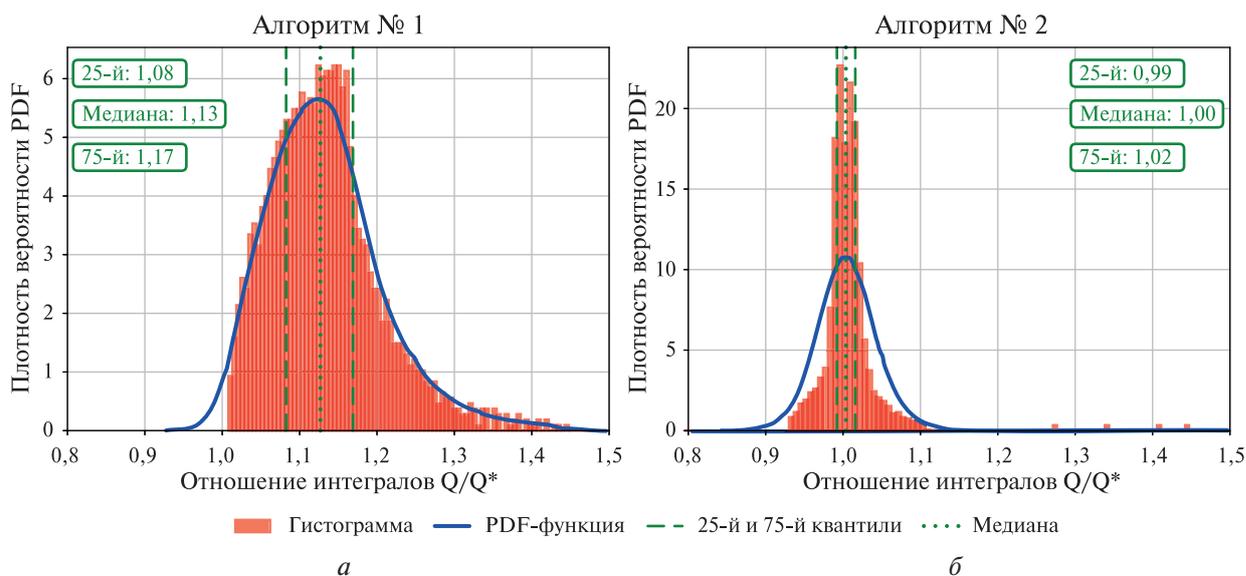


Рис. 5. Относительная плотность функции распределения (PDF) отношения исходного и вычисленного интеграла спектральных функций по алгоритму № 1 (а) и № 2 (б). Пунктирной линией показано медианное значение, штриховыми — 25-й и 75-й квантили

Отдельно стоит отметить преимущество алгоритма № 2 по сравнению с алгоритмом № 1 в его вычислительной эффективности. Поскольку для алгоритма № 2 не используется метод итерационной прогонки, то его вычислительная скорость примерно в три раза выше.

Полученные результаты численно подтверждают возможность использования двух алгоритмов для физически корректного решения задачи преобразования значений RGB в характеристику интегральной отражённой радиации и, в дальнейшем, альbedo поверхности.

Тестирование и нормировка алгоритмов в снежных и бесснежных условиях

Было выполнено тестирование работы описанных математических алгоритмов для условий полевой съёмки на территории полигона «Плейстоценовый парк» (Республика Саха, Россия) с БПЛА в холодный период года со снежным покровом, а также для тёплого периода в вегетационный период. Проводилась нормировка алгоритмов на отдельных реперных полигонах по средним значениям характеристик отражённой радиации от поверхности, вычисленных по данным двух алгоритмов и обработок альbedo поверхности спутниковых снимков Landsat-8, -9 и Sentinel-2 (см. табл. 2). По выражению (2) были найдены линейные регрессионные зависимости, позволяющие перейти от вычисленных характеристик интегральной отражённой радиации от поверхности по данным алгоритмов к требуемым величинам альbedo поверхности (рис. 6, см. с. 22).

Проанализируем сравнение работы двух алгоритмов в холодный снежный период, выполненное для ортофотоплана, снятого 21.04.2024 с 10:55 до 11:39 по UTC+11 (рис. 6а, б). Для данных условий характерен высокий коэффициент детерминации R^2 (от 0,91 до 0,98), который характеризует высокую линейную зависимость между альbedo поверхности по обработкам спутниковых снимков и вычисленной по двум алгоритмам характеристикой отражённой радиации. Для нормировки используется альbedo поверхности в диапазоне от 0,2 до 0,9, при этом территория по цветовой окраске почти монохромна (в градациях серого). Таким образом, в условиях снежного покрова выявлена возможность использования физически верного подхода перевода вычислений алгоритмов в альbedo поверхности по линейной зависимости от реперных значений.

Для условий тёплого периода (рис. 6в, г) использованы RGB-значения ортофотоплана, снятого 11 августа с 15:52 до 16:52 по UTC+11. Стоит отметить, что для летней съёмки были характерны менее однородные условия освещённости в связи с неоднородной разорванной структурой облачности и влиянием теней от прямой солнечной радиации. Были получены также высокие коэффициенты детерминации R^2 для реперных территорий с данными обработки спутниковых снимков (от 0,88 до 0,91). При этом стоит отметить значительно меньший диапазон альbedo поверхности, по которому проводилось сравнение с данными вычислений алгоритмов (от 0,1 до 0,2), и более высокое разнообразие цветовой гаммы для используемой территории. В целом описанные алгоритмы преобразования RGB могут быть пригодны также для работы в летний бесснежный период в задачах восстановления альbedo поверхности при условии однородности освещения.

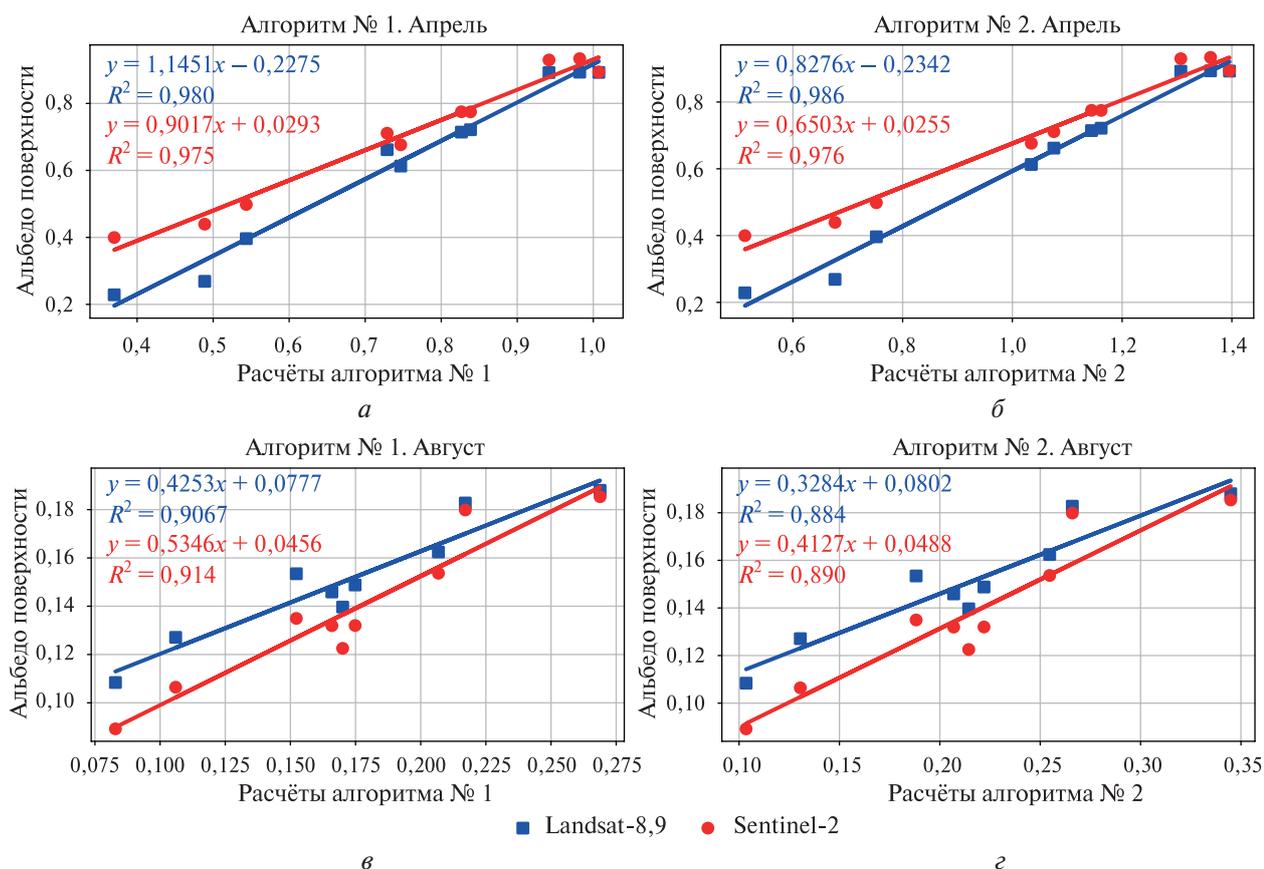


Рис. 6. Регрессионные зависимости между средними значениями данных обработки альbedo поверхности спутниковых миссий Landsat-8, -9 (OLI) и Sentinel-2 (MSI) и результатами преобразования RGB-значений ортофотоплана с БПЛА в интегральную характеристику спектра алгоритмом № 1 (а), алгоритмом № 2 (б) для холодного (снежного) периода и алгоритмом № 1 (в), алгоритмом № 2 (г) для тёплого (бесснежного) периода по реперным территориям полигона «Плейстоценовый парк»

Заключение и выводы

Описанные в работе методы восстановления альbedo поверхности со сверхвысоким пространственным разрешением по RGB-значениям ортофотопланов с БПЛА могут быть полезны для задач детального расчёта компонент теплового баланса территории с неоднородным мозаичным ландшафтом, а также использованы для подготовки входных данных в вихреразрешающие гидродинамические модели. В настоящей статье проведена реализация и адаптация двух математических алгоритмов: итерационного (№ 1) и неитерационного (№ 2) — для преобразования RGB-значений пикселей надирных ортофотопланов с БПЛА

в альbedo поверхности с применением известных реперных значений на местности. Были протестированы математические свойства данных алгоритмов и показана возможность физически верного численного решения поставленной обратной задачи. Также было проведено тестирование работы алгоритмов по ортофотопланам, снятым на полигоне «Плейстоценовый парк» (Республика Саха), при использовании спутниковых снимков Landsat-8, -9 и Sentinel-2 в бесснежных условиях в тёплый период (август) и снежных условиях в холодный период (апрель) года. Установлены линейные регрессионные связи между альbedo поверхности по данным обработок спутниковых снимков и вычислениям алгоритмов. Таким образом, показана практическая возможность многократного увеличения пространственного разрешения альbedo поверхности.

При этом были установлены значительные ограничения на область применения работы алгоритмов. В первую очередь, для корректного преобразования необходимы однородные условия освещённости (суммарной коротковолновой радиации) и отсутствие теней от прямой солнечной радиации, т. е. наиболее благоприятна съёмка ортофотопланов при однородной слоистой облачности. Второе важное ограничение методов связано с восстановлением альbedo поверхности по алгоритмам в видимом диапазоне спектра, статистическая обработка альbedo поверхности для всего коротковолнового диапазона спектра физически менее обоснована.

Из результатов тестирования следует, что второй (неитерационный) алгоритм вычислительно более эффективен, а также по тестированию на выборках лучше восстанавливает исходный интеграл спектральной функции плотности излучения.

В дальнейших работах планируется усовершенствование данных алгоритмов, их отладка и тестирование в «полевых» условиях на большей статистической выборке в различных условиях местности и сезонов года.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ № 24-17-00155). Экспериментальные работы проведены при поддержке компании AIM Carbon.

Благодарности: Коллективу научной станции Черский за содействие и помощь в проведении экспериментальных работ.

Литература

1. Алиева А. Дж., Алиева Х. С., Аирафов М. Г., Мустафазаде Н. Х. Оптимизация альбедометрических измерений с применением беспилотного летательного аппарата // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4(50). С. 68–75. DOI: 10.21685/2307-5538-2024-4-8.
2. Валиев И. В., Волобой А. Г., Денисов Е. Ю., Еришов С. В., Поздняков С. Г. Преобразования XYZ в спектр для свойств поверхности // Тр. Юбилейной 25-й Международ. конф. «ГрафиКон'2015». Протвино: Ин-т физико-техн. информатики, 2015. С. 209–213.
3. Джадд Д. Р. Цвет в науке и технике / пер. с англ.; под ред. П. Ф. Артюшина. М.: Мир, 1978. 592 с.
4. Жданов Д. Д., Потемин И. С. Построение спектрального представления из RGB данных в задачах спектрального моделирования // Тр. 20-й Международ. конф. по компьютерной графике и зрению «ГрафиКон'2010». СПб.: Санкт-Петербургский гос. ун-т информац. технологий, механики и оптики, 2010. С. 144–147.
5. Журавский Д. М., Иванов Б. В., Кашин С., Куприков Н. М. Способ дистанционной оценки альbedo при помощи фоторегистрирующего оборудования // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 1. С. 52–59. DOI: 10.7868/S0205961418010050.
6. Завалишин Н. Н. Модель зависимости температуры приземной атмосферы от альbedo Земли и тепловой инерции гидросферы // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 6. С. 480–484.
7. Корнева И. А., Семенов С. М. Чувствительность температуры земной поверхности к изменению альbedo атмосферы: оценка радиационного эффекта // Метеорология и гидрология. 2016. Т. 41. № 5. С. 307–311.
8. Лысков В. Н., Глазунов А. В., Кулямин Д. В., Кулямин Д. В., Мортиков Е. В., Степаненко В. М. Суперкомпьютерное моделирование в физике климатической системы: учеб. пособие. М.: Из-во Московского ун-та, 2012. 408 с.
9. Тимофеев Ю. М., Васильев А. В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 475 с.

10. *Afanasiev V., Ignatenko A., Voloboy A.* The simple method of the RGB to spectrum conversion for tasks of physically based rendering // *Scientific Visualization*. 2015. V. 7. No. 4. P. 20–26.
11. Agisoft Metashape user manual: professional edition, version 1.5 / Agisoft LLC. 2019. 139 p.
12. *Andres-Anaya P., Sanchez-Aparicio M., Del Pozo S. et al.* A new methodology for estimating surface albedo in heterogeneous areas from satellite imagery // *Applied Sciences*. 2023. V. 14. Iss. 1. Article 75. DOI: 10.3390/app14010075.
13. *Angelini L. P., Biudes M. S., Machado N. G. et al.* Albedo and temperature models for surface energy balance fluxes and evapotranspiration using SEBAL and Landsat 8 over Cerrado-Pantanal, Brazil // *Sensors*. 2021. V. 21. Iss. 21. Article 7196. <https://doi.org/10.3390/s21217196>.
14. *Baldinelli G., Bonafoni S., Rotili A.* Albedo retrieval from multispectral Landsat 8 observation in urban environment: Algorithm validation by in situ measurements // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2017. V. 10. Iss. 10. P. 4504–4511. DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2721549.
15. *Bartmiński P., Siłuch M.* Mapping the albedo of the active surface at different stages of the growing season using data from various sources // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2022. V. 28. Iss. 3. Article 100818. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100818>.
16. *Bonafoni S., Sekertekin A.* Albedo retrieval from Sentinel-2 by new narrow-to-broadband conversion coefficients // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2020. V. 17. Iss. 9. P. 1618–1622. DOI: 10.1109/LGRS.2020.2967085.
17. *Canisius F., Wang S., Croft H. et al.* A UAV-based sensor system for measuring land surface albedo: Tested over a boreal peatland ecosystem // *Drones*. 2019. V. 3. Iss. 1. Article 27. <https://doi.org/10.3390/drones3010027>.
18. *Cao C., Lee X., Muhlhausen J. et al.* Measuring landscape albedo using unmanned aerial vehicles // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. Iss. 11. Article 1812. <https://doi.org/10.3390/rs10111812>.
19. *Corripio J. G.* Snow surface albedo estimation using terrestrial photography // *Intern. J. Remote Sensing*. 2004. V. 25. Iss. 24. P. 5705–5729. DOI: 10.1080/01431160410001709002.
20. *Dumont M., Arnaud Y., Six D., Corripio J. G.* Détermination de l'albédo de surface des glaciers à partir de photographies terrestres // *La Houille Blanche*. 2009. V. 95. Iss. 2. P. 102–108. DOI: 10.1051/lhb:2009021.
21. *D'Urso G., Calera Belmonte A.* Operative approaches to determine crop water requirements from Earth observation data: Methodologies and applications // *AIP Conf. Proc.* 2006. V. 852. No. 1. P. 14–25. <https://doi.org/10.1063/1.2349323>.
22. *Fan Y., Yu J., Liu W.* Cross-comparison of snow albedo products derived from satellite (Sentinel-2 and Landsat-8) optical data // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021. V. 658. No. 1. Article 012048. DOI: 10.1088/1755-1315/658/1/012048.
23. *Fischer W., Thomas C. K., Zimov N., Göckede M.* Grazing enhances carbon cycling but reduces methane emission during peak growing season in the Siberian Pleistocene Park tundra site // *Biogeosciences*. 2022. V. 19. No. 6. P. 1611–1633. <https://doi.org/10.5194/bg-19-1611-2022>.
24. *Glassner A. S.* How to derive a spectrum from an RGB triplet // *IEEE Computer Graphics and Applications*. 1989. V. 9. No. 4. P. 95–99.
25. *Grassmann H.* Zur theorie der farbenmischung // *Annalen Der Physik*. 1853. V. 165. Iss. 5. P. 69–84.
26. *Hansen J. E., Takahashi T.* Climate processes and climate sensitivity // *Geophysical Monograph Series*. 1984. V. 5. Article 29.
27. *Jiménez-Muñoz J. C., Sobrino J. A., Skoković D. et al.* Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2014. V. 11. Iss. 10. P. 1840–1843. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312032>.
28. *Knap W., Reijmer C., Oerlemans J.* Narrowband to broadband conversion of Landsat TM glacier albedos // *Intern. J. Remote Sensing*. 1999. V. 20. Iss. 10. P. 2091–2110. DOI: 10.1080/014311699212362.
29. *Latham J., Rasch P., Chen C.-C. et al.* Global temperature stabilization via controlled albedo enhancement of low-level maritime clouds // *Philosophical Trans. of Royal Soc. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2008. V. 366. No. 1882. P. 3969–3987. DOI: 10.1098/rsta.2008.0137.
30. *Lebourgeois V., Bégué A., Labbé S. et al.* Can commercial digital cameras be used as multispectral sensors? A crop monitoring test // *Sensors*. 2008. V. 8. Iss. 11. P. 7300–7322. DOI: 10.3390/s8117300.
31. *Lenton T. M., Vaughan N. E.* The radiative forcing potential of different climate engineering options // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2009. V. 9(1). P. 5539–5561. DOI: 10.5194/acp-9-5539-2009.
32. *Li Z., Erb A., Sun Q. et al.* Preliminary assessment of 20-m surface albedo retrievals from Sentinel-2A surface reflectance and MODIS/VIIRS surface anisotropy measures // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 217. Iss. G4. P. 352–365. DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.025.
33. *Liang S. L.* Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms // *Remote Sensing of Environment*. 2001. V. 76. Iss. 2. P. 213–238. DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00205-4.

34. *Lin X., Wu S., Chen B. et al.* Estimating 10-m land surface albedo from Sentinel-2 satellite observations using a direct estimation approach with Google Earth Engine // *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*. 2022. V. 194. P. 1–20. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2022.09.016.
35. *Phiri D., Simwanda M., Salekin S. et al.* Sentinel-2 data for land cover/use mapping: A review // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. Iss. 14. Article 2291. <https://doi.org/10.3390/rs12142291>.
36. *Pielke R.A., Sr., Marland G., Betts R.A. et al.* The influence of land-use changes and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases // *Philosophical Trans. of Royal Soc. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2002. V. 360. Iss. 1797. P. 1705–1719. DOI: 10.1098/rsta.2002.1027.
37. *Segarra J., Buchailot M.L., Araus J.L., Kefauver S.C.* Remote sensing for precision agriculture: Sentinel-2 improved features and applications // *Agronomy*. 2020. V. 10. Iss. 5. Article 641. DOI: 10.3390/agronomy10050641.
38. *Smits B.* An RGB-to-spectrum conversion for reflectances // *J. Graphics Tools*. 1999. V. 4. Iss. 4. P. 11–22. DOI: 10.1080/10867651.1999.10487511.
39. *Stokes M.A., Anderson M., Chandrasekar S., Motta R.* A standard default color space for the Internet – sRGB // <http://www.w3.org>. 1996. <http://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB.html>.
40. *Sun Y., Fracchia F.D., Calvert T.W., Drew M.S.* Deriving spectra from colors and rendering light interference // *IEEE Computer Graphics and Applications*. 1999. V. 19. Iss. 4. P. 61–67.
41. *van der Meer F.D., van der Werff H.M.A., van Ruitenbeek F.J.A.* Potential of ESA’s Sentinel-2 for geological applications // *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 148. P. 124–133. DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.022.
42. *Vanino S., Nino P., De Michele C. et al.* Capability of Sentinel-2 data for estimating maximum evapotranspiration and irrigation requirements for tomato crop in Central Italy // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 215. P. 452–470. DOI: 10.1016/j.rse.2018.06.035.
43. *Wang Z., Erb A.M., Schaaf C.B. et al.* Early spring post-fire snow albedo dynamics in high latitude boreal forests using Landsat-8 OLI data // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 185. P. 71–83. DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.059.
44. *Wu S., Lin X., Bian Z. et al.* Satellite observations reveal a decreasing albedo trend of global cities over the past 35 years // *Remote Sensing of Environment*. 2024. V. 303. Article 114003. DOI: 10.1016/j.rse.2024.114003.
45. *Wyman C., Sloan P., Shirley P.* Simple analytic approximations to the CIE XYZ color matching functions // *J. Computer Graphics Techniques*. 2013. V. 2. No. 2. P. 1–11.
46. *Zimov S.A.* Pleistocene Park: Return of the mammoth’s ecosystem // *Science*. 2005. V. 308. No. 5723. P. 796–798. DOI: 10.1126/science.1113442.

Implementation of mathematical algorithms for converting RGB images from UAVs to ultra-high-spatial resolution albedo of a surface using satellite data as illustrated by the example of the Pleistocene Park landfill

N. A. Petrov¹, I. A. Repina^{2,5,6}, V. M. Stepanenko^{1,5}, M. I. Varentsov^{1,2,5},
D. G. Chechin², V. Yu. Slobodyan³, M. V. Zimin^{1,7}, N. S. Zimov⁴

¹ *Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*
E-mail: nial.03@mail.ru

² *A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow 119017, Russia*

³ *Institute of Environmental Survey, Planning and Assessment, Moscow 119192, Russia*

⁴ *Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia*

⁵ *Research Computing Center of Lomonosov Moscow State University*
Moscow 119991, Russia

⁶ *Maykop State Technological University, Maykop 385000, Russia*

⁷ *Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia*

Restoring the surface albedo with ultra-high spatial resolution is an urgent task for detailed calculations of the components of the radiation and thermal balance. This paper discusses methods for recovering the surface albedo in the shortwave spectrum range from RGB-images (color system: Red, Green, Blue) from unmanned aerial vehicles (UAVs) using two implemented mathematical algorithms and satellite image processing data. The mathematical formulation of the problem is related to solving the inverse problem of reconstructing the integral of the spectral function of reflected radiation and normalizing it on the basis of known reference values of the surface albedo retrieved from satellite data. The article describes two implemented mathematical algorithms that differ in the way they solve the inverse problem (iterative and non-iterative methods) and also indicates the areas of their applicability. Thus, a significant limitation of the methods is the requirement of uniform illumination conditions (shortwave downward radiation) across the territory. The algorithms were tested in cold (snowy) and warm (snowless) periods based on nadir surveys of orthophotoplanes from UAVs of the territory of the Pleistocene Park landfill (Sakha Republic, Russia). The algorithms were normalized at reference sites using the Landsat-8, -9 and Sentinel-2 satellite data. The obtained surface albedo values have a high spatial resolution equal to the resolution of the orthophotoplane. Optimal conditions for using the algorithms in the presence of homogeneous dense and continuous clouds, as well as negative effects of shadows from direct solar radiation, have been identified. Thus, this paper shows the possibility of using RGB-signal conversion algorithms to multiply the spatial resolution of surface albedo obtained from satellite images. In the future, it is planned to refine the algorithms and test them on a larger statistical sample.

Keywords: RGB-images, surface albedo, UAV, orthophotoplane, satellite images, mathematical algorithms

Accepted: 30.09.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-9-28

References

1. Alieva A. J., Alieva Kh. S., Ashrafov M. G., Mustafazade N. Kh., Optimization of albedometric measurements using an unmanned aerial vehicle, *Measuring. Monitoring. Management. Control*, 2024, No. 4 (50), pp. 68–75 (in Russian), DOI: 10.21685/2307-5538-2024-4-8.
2. Valiev I. V., Voloboy A. G., Denisov E. Yu., Ershov S. V., Pozdnyakov S. G., Transformation of XYZ into spectrum for surface properties, *Trudy Yubileinoi 25-i Mezhdunarodnoi konferentsii GraphiCon'2015* (25th Anniversary of Intern. Conf. GraphiCon'2015), Protvino: Institut fiziko-tehnicheskoi informatiki, 2015, pp. 209–213 (in Russian).
3. Judd D. B., Wyszecki G., *Color in business, science and industry*, New York: John Wiley and Sons, 1975, 553 p.

4. Zhdanov D. D., Potemin I. S., Spectrum construction from RGB triplet in spectral simulation tasks, *Trudy 20-i Mezhdunarodnoi konferentsii po komp'yuternoi grafike i zreniyu GraphiCon'2010* (The 20th Conf. Proc. Computer Graphics and Vision GraphiCon'2010), Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki, 2010, pp. 144–147 (in Russian).
5. Zhuravski D. M., Ivanov B. V., Kaschin S. V., Kuprikov N. M., The method of albedo remote measuring using photorecording equipment, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 1, pp. 52–59 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961418010050.
6. Zavalishin N. N., The model of dependence of the surface atmospheric temperature on the Earth albedo and thermal inertia of hydrosphere, *Optika atmosfery i okeana*, 2010, V. 23, No. 6, pp. 480–484 (in Russian).
7. Korneva I. A., Semenov S. M., Surface temperature response to variations in atmospheric albedo: Estimating the radiation effect, *Russian meteorology and hydrology*, 2016, V. 41, No. 5, pp. 307–311 (in Russian).
8. Lykossov V. N., Glazunov A. V., Kulyamin D., Mortikov E. V., Stepanenko V. M., *Superkomp'yuternoe modelirovanie v fizike klimaticheskoi sistemy: uchebnoe posobie* (Supercomputer Modeling in Physics of Climate System: Study guide), Moscow University Press, 2012, p. 408 (in Russian).
9. Timofeev Yu. M., Vasiliev A. V., *Teoreticheskie osnovy atmosfernoï optiki* (Theoretical fundamentals of atmospheric optics), Saint Petersburg: Nauka, 2003, 475 p. (in Russian).
10. Afanasiev V., Ignatenko A., Voloboy A., The simple method of the RGB to spectrum conversion for tasks of physically based rendering, *Scientific Visualization*, 2015, V. 7, No. 4, pp. 20–26.
11. *Agisoft Metashape user manual: professional edition, version 1.5*, Agisoft LLC, 2019, 139 p.
12. Andres-Anaya P., Sanchez-Aparicio M., Del Pozo S. et al., New methodology for estimating surface albedo in heterogeneous areas from satellite imagery, *Applied Sciences*, 2023, V. 14, Iss. 1, Article 75, DOI: 10.3390/app14010075.
13. Angelini L. P., Biudes M. S., Machado N. G. et al., Albedo and temperature models for surface energy balance fluxes and evapotranspiration using SEBAL and Landsat 8 over Cerrado-Pantanal, Brazil, *Sensors*, 2021, V. 21, Iss. 21, Article 7196, <https://doi.org/10.3390/s21217196>.
14. Baldinelli G., Bonafoni S., Rotili A., Albedo retrieval from multispectral Landsat 8 observation in urban environment: Algorithm validation by in situ measurements, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, V. 10, Iss. 10, pp. 4504–4511, DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2721549.
15. Bartmiński P., Siłuch M., Mapping the albedo of the active surface at different stages of the growing season using data from various sources, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2022, V. 28, Iss. 3, Article 100818, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100818>.
16. Bonafoni S., Sekertekin A., Albedo retrieval from Sentinel-2 by new narrow-to-broadband conversion coefficients, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, V. 17, Iss. 9, pp. 1618–1622, DOI: 10.1109/LGRS.2020.2967085.
17. Canisius F., Wang S., Croft H. et al., A UAV-based sensor system for measuring land surface albedo: Tested over a boreal peatland ecosystem, *Drones*, 2019, V. 3, Iss. 1, Article 27, <https://doi.org/10.3390/drones3010027>.
18. Cao C., Lee X., Muhlhausen J. et al., Measuring landscape albedo using unmanned aerial vehicles, *Remote Sensing*, 2018, V. 10, Iss. 11, Article 1812, <https://doi.org/10.3390/rs10111812>.
19. Corripio J. G., Snow surface albedo estimation using terrestrial photography, *Intern. J. Remote Sensing*, 2024, V. 25, Iss. 24, pp. 5705–5729, DOI: 10.1080/01431160410001709002.
20. Dumont M., Arnaud Y., Six D., Corripio J. G., Détermination de l'albédo de surface des glaciers à partir de photographies terrestres, *La Houille Blanche*, 2009, V. 95, Iss. 2, pp. 102–108, DOI: 10.1051/lhb:2009021.
21. D'Urso G., Calera Belmonte A., Operative approaches to determine crop water requirements from Earth observation data: Methodologies and applications, *AIP Conf. Proc.*, 2006, V. 852, No. 1, pp. 14–25, <https://doi.org/10.1063/1.2349323>.
22. Fan Y., Yu J., Liu W., Cross-comparison of snow albedo products derived from satellite (Sentinel-2 and Landsat-8) optical data, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021, V. 658, No. 1, Article 012048, DOI: 10.1088/1755-1315/658/1/012048.
23. Fischer W., Thomas C. K., Zimov N., Göckede M., Grazing enhances carbon cycling but reduces methane emission during peak growing season in the Siberian Pleistocene Park tundra site, *Biogeosciences*, 2022, V. 19, No. 6, pp. 1611–1633, <https://doi.org/10.5194/bg-19-1611-2022>.
24. Glassner A. S., How to derive a spectrum from an RGB triplet, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1989, V. 9, No. 4, pp. 95–99.
25. Grassmann H., Zur theorie der farbenmischung, *Annalen Der Physik*, 1853, V. 165, Iss. 5, pp. 69–84.
26. Hansen J. E., Takahashi T., Climate processes and climate sensitivity, *Geophysical Monograph Series*, 1984, V. 5, Article 29.

27. Jiménez-Muñoz J. C., Sobrino J. A., Skoković D. et al., Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data, *IEEE Geoscience Remote Sensing Letters*, 2014, V. 11, Iss. 10, pp. 1840–1843, <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312032>.
28. Knap W., Reijmer C., Oerlemans J., Narrowband to broadband conversion of Landsat TM glacier albedos, *Intern. J. Remote Sensing*, 1999, V. 20, Iss. 10, pp. 2091–2110, DOI: 10.1080/014311699212362.
29. Latham J., Rasch P., Chen C.-C. et al., Global temperature stabilization via controlled albedo enhancement of low-level maritime clouds, *Philosophical Trans. of Royal Soc. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2008, V. 366, No. 1882, pp. 3969–3987, DOI: 10.1098/rsta.2008.0137.
30. Lebourgeois V., Bégué A., Labbé S. et al., Can commercial digital cameras be used as multispectral sensors? A crop monitoring test, *Sensors*, 2008, V. 8, Iss. 11, pp. 7300–7322, DOI: 10.3390/s8117300.
31. Lenton T. M., Vaughan N. E., The radiative forcing potential of different climate engineering options, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, V. 9(1), pp. 5539–5561, DOI: 10.5194/acp-9-5539-2009.
32. Li Z., Erb A., Sun Q. et al., Preliminary assessment of 20-m surface albedo retrievals from Sentinel-2A surface reflectance and MODIS/VIIIRS surface anisotropy measures, *Remote Sensing of Environment*, 2018, V. 217, Iss. G4, pp. 352–365, DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.025.
33. Liang S. L., Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms, *Remote Sensing of Environment*, 2001, V. 76, Iss. 2, pp. 213–238, DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00205-4.
34. Lin X., Wu S., Chen B. et al., Estimating 10-m land surface albedo from Sentinel-2 satellite observations using a direct estimation approach with Google Earth Engine, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, V. 194, pp. 1–20, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2022.09.016.
35. Phiri D., Simwanda M., Salekin S. et al., Sentinel-2 data for land cover/use mapping: A review, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, Iss. 14, Article 2291, <https://doi.org/10.3390/rs12142291>.
36. Pielke R. A., Sr., Marland G., Betts R. A. et al., The influence of land-use changes and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases, *Philosophical Trans. of Royal Soc. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2002, V. 360, Iss. 1797, pp. 1705–1719, DOI: 10.1098/rsta.2002.1027.
37. Segarra J. B., Buchaillet M. L., Araus J. L., Kefauver S. C., Remote sensing for precision agriculture: Sentinel-2 improved features and applications, *Agronomy*, 2020, V. 10, Iss. 5, Article 641, DOI: 10.3390/agronomy10050641.
38. Smits B., An RGB-to-spectrum conversion for reflectances, *J. Graphics Tools*, 1999, V. 4, Iss. 4, P. 11–22, DOI: 10.1080/10867651.1999.10487511.
39. Stokes M. A., Anderson M., Chandrasekar S., Motta R., A standard default color space for the Internet — sRGB, <http://www.w3.org>, 1996, <http://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB.html>.
40. Sun Y., Fracchia F. D., Calvert T. W., Drew M. S., Deriving spectra from colors and rendering light interference, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1999, V. 19, Iss. 4, pp. 61–67.
41. van der Meer F. D., van der Werff H. M. A., van Ruitenbeek F. J. A., Potential of ESA’s Sentinel-2 for geological applications, *Remote Sensing of Environment*, 2014, V. 148, pp. 124–133, DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.022.
42. Vanino S., Nino P., Die Michele C. et al., Capability of Sentinel-2 data for estimating maximum evapotranspiration and irrigation requirements for tomato crop in Central Italy, *Remote Sensing of Environment*, 2018, V. 215, pp. 452–470, DOI: 10.1016/j.rse.2018.06.035.
43. Wang Z., Erb A. M., Schaaf C. B. et al., Early spring post-fire snow albedo dynamics in high latitude boreal forests using Landsat-8 OLI data, *Remote Sensing of Environment*, 2016, V. 185, pp. 71–83, DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.059.
44. Wu S., Lin X., Bian Z. et al., Satellite observations reveal a decreasing albedo trend of global cities over the past 35 years, *Remote Sensing of Environment*, 2024, V. 303, Article 114003, DOI: 10.1016/j.rse.2024.114003.
45. Wyman C., Sloan P., Shirley P., Simple analytic approximations to the CIE XYZ color matching functions, *J. Computer Graphics Techniques*, 2013, V. 2, No. 2, pp. 1–11.
46. Zimov S. A., Pleistocene Park: Return of the mammoth’s ecosystem, *Science*, 2005, V. 308, No. 5723, P. 796–798, DOI: 10.1126/science.1113442.