

«Реализация математических алгоритмов преобразования RGB сигналов снимков с БПЛА в альbedo поверхности»

Докладчик: Петров Николай Алексеевич

nial.03@mail.ru +79043156050

- (1) Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова
- (2) Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
- (3) Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ им. М.В. Ломоносова



XXII Международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"



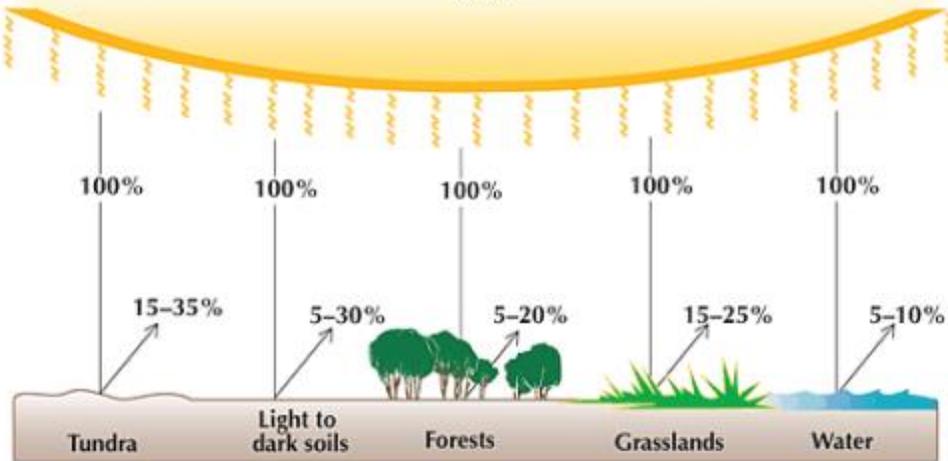
Актуальность темы исследования

- Восстановление **альbedo** – одна из важнейших задач для расчёта и моделирования **теплового баланса территории**, описания **радиационных процессов**;
- **Сверхвысокое разрешение альbedo** важно для специальных задач **детального расчёта** компонент теплового баланса

ALBEDO

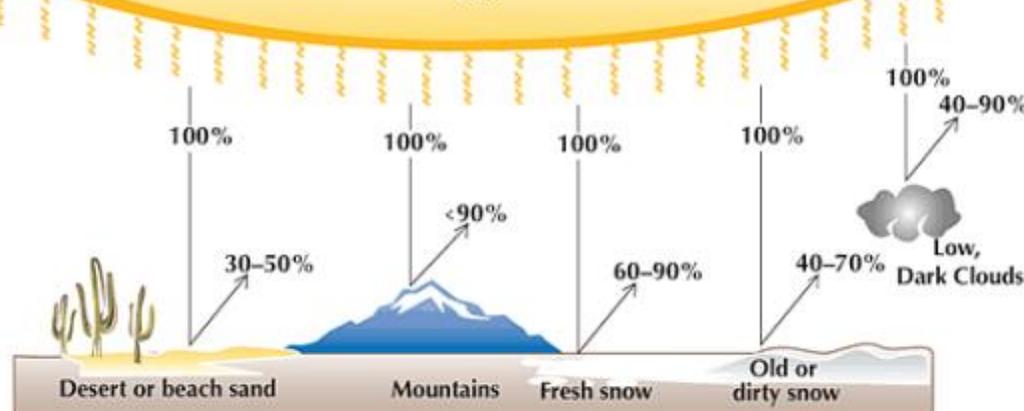
EARTH'S LOW-ALBEDO SURFACES

SUN

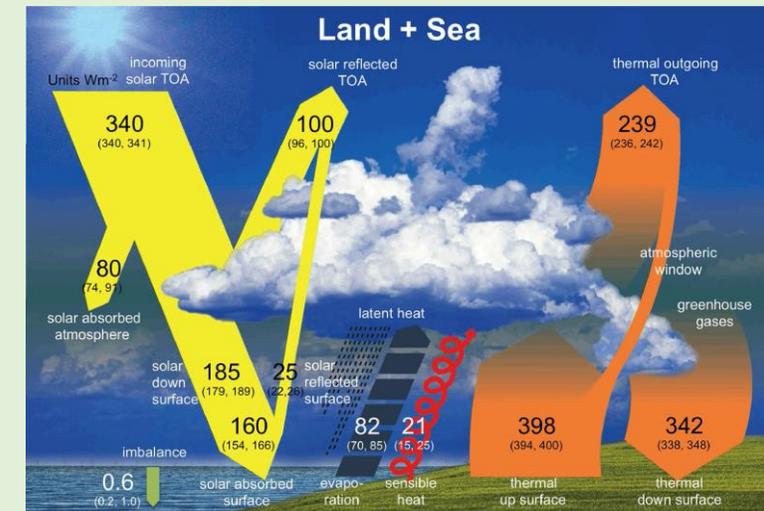
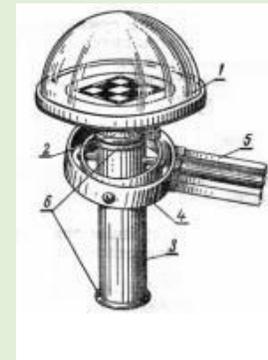
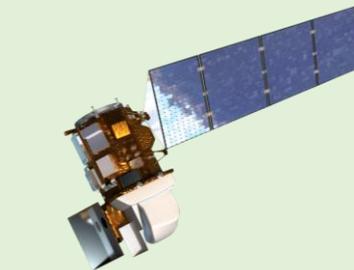


EARTH'S HIGH-ALBEDO SURFACES

SUN



H. Leighton Steward



[IPCC 2021]

Цель исследования:

Реализация математического алгоритма преобразования RGB-сигналов надирного снимка в альбеде поверхности

Задачи исследования:

1. Реализация алгоритма $RGB \rightarrow$ альбеде и проверка его математических свойств;
2. Выполнение полевой надирной съёмки с БПЛА, создание ортофотопланов;
3. Обработка спутниковых снимков Landsat 8,9 и Sentinel-2 для получения альбеде поверхности;
4. Нормировка и проверка алгоритма по данным обработок полевых и спутниковых снимков.

План выступления

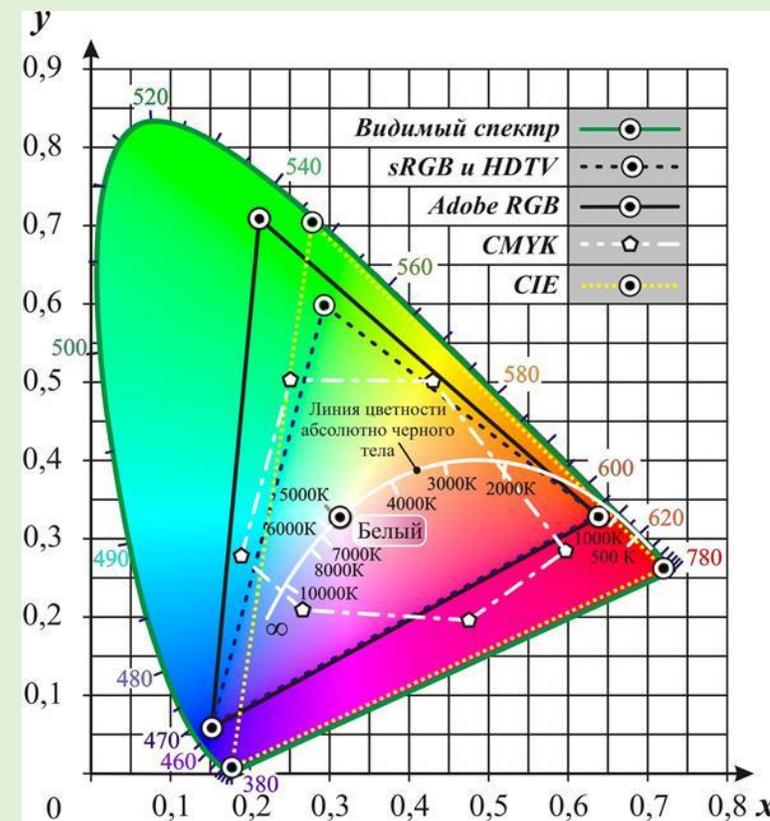
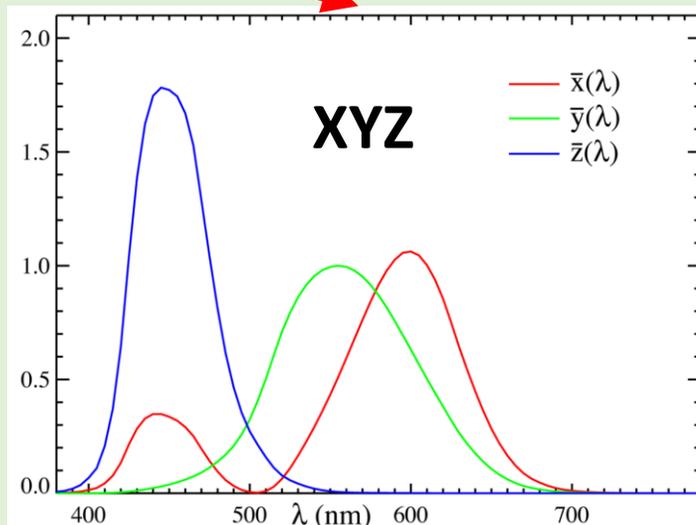
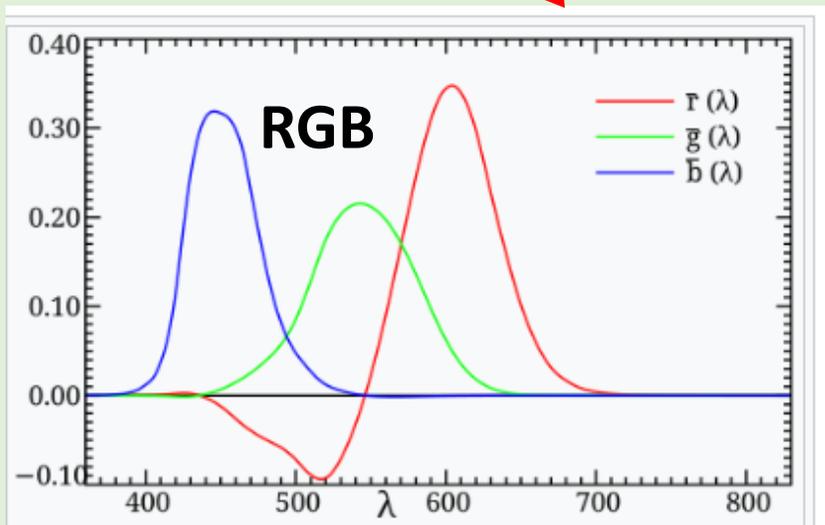
- I. Постановка **математической задачи** преобразования **RGB** → альbedo;
- II. **Реализация и настройка** данных алгоритмов;
- III. **Проверка и обсуждение** основных математических **свойств** алгоритмов;
- IV. Проведение **полевого этапа работы** в пос. Черский (Якутия) по созданию ортофотопланов с БПЛА (дронов);
- V. **Обработка** спутниковых снимков **Landsat 8, 9** и **Sentinel-2**;
- VI. **Тестирование и нормировка** алгоритмов по данным полевых и спутниковых измерений;
- VII. Обсуждение **ограничений методов** и границ его **применимости**.

Системы цветных координат снимков

Цветовая модель – математический способ описания спектра видимого излучения, цветов пикселей снимка в виде наборов чисел (трёх или четырёх). Являются коэффициентами разложения спектральной функции плотности потока приходящего излучения в базисе функций чувствительности.

$$X_i = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda) x_i(\lambda) d\lambda$$

Где $x_i(\lambda)$ - спектральные функции чувствительности



Математическая постановка задачи по восстановлению спектра отражённого излучения и альбедо по RGB сигналам надирного снимка

$$\begin{cases}
 R = k_R \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S^\uparrow(\lambda) r(\lambda) d\lambda \\
 G = k_G \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S^\uparrow(\lambda) g(\lambda) d\lambda \\
 B = k_B \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S^\uparrow(\lambda) b(\lambda) d\lambda \\
 \lambda_{\min} = 380 \text{ нм}; \lambda_{\max} = 760 \text{ нм} \\
 \forall \lambda S^\uparrow(\lambda) \geq 0, S^\uparrow(\lambda) \in C^0(\lambda)
 \end{cases}$$



Обратная задача: решение системы интегральных уравнений относительно спектральной функции отражённой радиации: $S^\uparrow(\lambda)$



$$\begin{aligned}
 Q^\uparrow &= \int_{SW} S^\uparrow(\lambda) d\lambda && \text{Отражённая интегральная радиация (вычислена из алгоритма)} \\
 Q^\downarrow &= \int_{SW} S^\downarrow(\lambda) d\lambda && \text{Суммарная радиация}
 \end{aligned}
 \quad
 A = \frac{Q^\uparrow}{Q^\downarrow} \quad \text{Альбедо поверхности}$$



При $Q^\downarrow = \text{const}(x, y)$, $A = m * Q^\uparrow + \varepsilon$

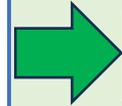
$S^\downarrow(\lambda), S^\uparrow(\lambda)$ - функции монохроматической плотности потока

Функции спектральных чувствительностей $r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda)$ (или в других цветовых системах) заданы явным образом

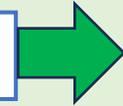
соответственно суммарной и отражённой радиации

Требования к выбору математических алгоритмов преобразования RGB в спектр

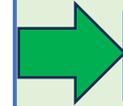
$$X_i = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda) x_i(\lambda) d\lambda$$



$$S^{\uparrow}(\lambda)$$



$$Q^{\uparrow} = \int_{SW} S^{\uparrow}(\lambda) d\lambda$$



$$\text{При } Q^{\downarrow} = \text{const}(x, y), A = m * Q^{\uparrow} + \varepsilon$$

- 1) **Применимость** на всём цветовом пространстве (RGB и XYZ);
- 2) Допустимая **точность** обратного преобразования найденной функции спектральной плотности **в истинные значения RGB**;
- 3) **Устойчивость** и **сходимость решения**. Близкие значения цветов должны переходить в близкие функции спектральной плотности;
- 4) **Гладкость** и **неотрицательность функции** спектра, отсутствие резких пиков или разрывов;
- 5) **Вычислительная эффективность** алгоритма по времени для быстрого преобразования больших объёмов данных.

Переход из цветовой системы RGB в XYZ CIE

$$R = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S^{\uparrow}(\lambda) r(\lambda) d\lambda$$

$$G = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S^{\uparrow}(\lambda) g(\lambda) d\lambda$$

$$B = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S^{\uparrow}(\lambda) b(\lambda) d\lambda$$

Переход из RGB системы в систему CIE XYZ

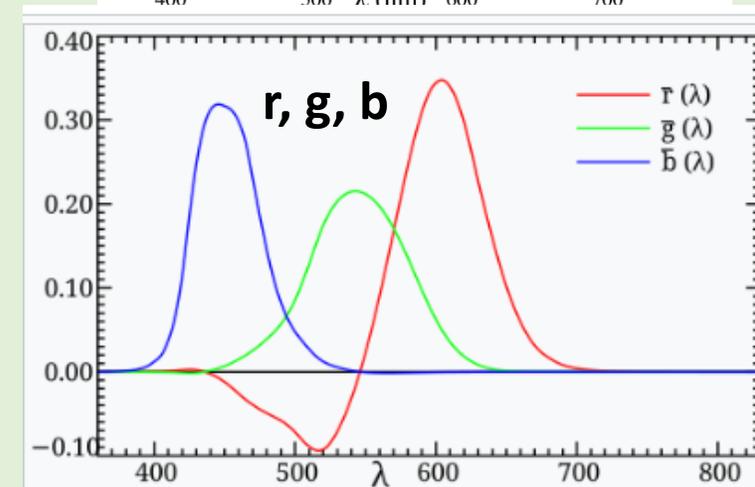
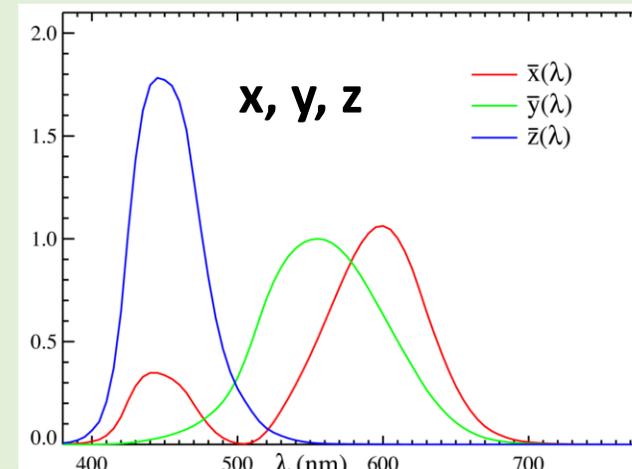


Переход выполняется с гамма-коррекцией

$$X = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S^{\uparrow}(\lambda) x(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S^{\uparrow}(\lambda) y(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S^{\uparrow}(\lambda) z(\lambda) d\lambda$$



Матрица перехода:

$$\begin{bmatrix} X_{D65} \\ Y_{D65} \\ Z_{D65} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{\text{linear}} \\ G_{\text{linear}} \\ B_{\text{linear}} \end{bmatrix}$$

Гамма-коррекция:

$$C_{\text{linear}} = \begin{cases} \frac{C_{\text{srgb}}}{12.92}, & C_{\text{srgb}} \leq 0.04045 \\ \left(\frac{C_{\text{srgb}} + 0.055}{1.055} \right)^{2.4}, & C_{\text{srgb}} > 0.04045 \end{cases}$$

where C is R , G , or B .

Функции чувствительности x, y, z задавались **аналитической аппроксимацией**

Реализованные численные методы решения задачи

Ключевая идея: Ищется приближение спектра отражённой радиации ($S^{\uparrow*}(\lambda)$) в линейном пространстве базисных функций: $S^{\uparrow*}(\lambda) = K_1 f_1(\lambda) + K_2 f_2(\lambda) + K_3 f_3(\lambda), \forall \lambda S^{\uparrow}(\lambda) \geq 0$

I метод (итерационный) По [Afanasiev, 2015]

Вычисление на каждом шаге i значений оценок C_i^* по оценке спектра $S_i^{\uparrow*}(\lambda)$:

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

Вычисление разницы истинного значения и оценки: $\Delta C_i = C_i - C_i^*$

Вычисление коэффициентов и новой оценки спектра ($S_{i+1}^{\uparrow*}$) $K_{Ci} = \frac{\Delta C_i}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} c^2(\lambda) d\lambda}$

Вычисление $i+1$ приближения спектра через линейные коэффициенты:

$$S_{i+1}^{\uparrow*}(\lambda) = S_i^{\uparrow*} + K_{Xi}x(\lambda) + K_{Yi}y(\lambda) + K_{Zi}z(\lambda)$$

Условие итерации: $\max(\Delta C_i) < \varepsilon, \varepsilon = 10^{-3}$

Реализованные численные методы решения задачи

Ключевая идея: Ищется приближение спектра отражённой радиации ($S^{\uparrow*}(\lambda)$) в линейном пространстве базисных функций: $S^{\uparrow*}(\lambda) = K_1 f_1(\lambda) + K_2 f_2(\lambda) + K_3 f_3(\lambda), \forall \lambda S^{\uparrow}(\lambda) \geq 0$

II метод (неитерационный) По [Sun, 1999]

Вычисление **Гауссовских** базисных функций:

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

Весовые коэффициенты ω_i зависят от соотношений X, Y, Z:

$$\omega_1 = \chi_{12}(C)\omega_{min} + (1 - \chi_{12}(C))\omega_{max}$$

$$\omega_2 = \chi_{32}(C)\omega_{min} + (1 - \chi_{32}(C))\omega_{max}$$

$$\omega_3 = \min(\omega_1, \omega_2), \chi_{ij} = \chi_{ji} = \frac{|C_i - C_j|}{C_i + C_j}$$

Значения $\lambda_{i,c}$ взяты из максимумов функций чувствительности x, y, z

$$\lambda_{i,c} = (600, 550, 445), C = (x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda))$$

Расчёт интегральной матрицы:

$$t_{ij} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} f_i(\lambda) c_j(\lambda) d\lambda$$

Вычисление линейных коэффициентов через решение матричного уравнения

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

Реализованные численные методы решения задачи

Ключевая идея: Ищется приближение спектра отражённой радиации ($S^{\uparrow*}(\lambda)$) в линейном пространстве базисных функций: $S^{\uparrow*}(\lambda) = K_1 f_1(\lambda) + K_2 f_2(\lambda) + K_3 f_3(\lambda)$, $\forall \lambda S^{\uparrow}(\lambda) \geq 0$

I метод (итерационный) По [Afanasiev, 2015]

Вычисление на каждом шаге i значений оценок

$C_i^* = (X_i^*, Y_i^*, Z_i^*)$ по оценке спектра $S_i^{\downarrow*}(\lambda)$

$$C_i^* = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_i^{\uparrow*}(\lambda) c(\lambda) d\lambda \quad K_{Ci} = \frac{\Delta C_i}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} c^2(\lambda) d\lambda}$$

$$S_{i+1}^{\uparrow*}(\lambda) = S_i^{\uparrow*} + K_{Xi}x(\lambda) + K_{Yi}y(\lambda) + K_{Zi}z(\lambda)$$

- ❖ Вычислительно затратный из-за итераций
- ❖ Физически более обоснованный

II метод (неитерационный) По [Sun, 1999]

Вычисление **Гауссовских** базисных функций с различными весовыми коэффициентами и оценки спектра:

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

$$S^{\uparrow*}(\lambda) = K_1 f_1(\lambda) + K_2 f_2(\lambda) + K_3 f_3(\lambda)$$

- ❖ Вычислительно эффективный
- ❖ Физически менее обоснованный

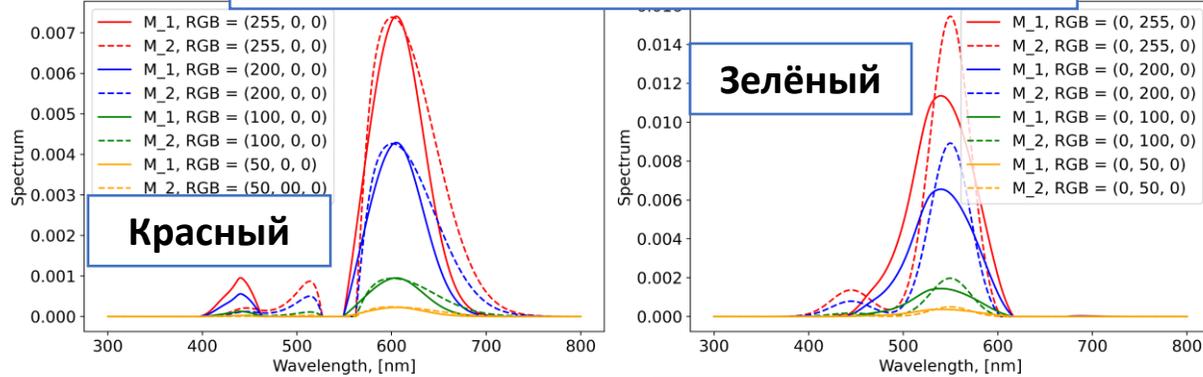
- Отрицательные значения спектральных функций приравнивались к нулю
- Увеличен спектральный диапазон интегрирования: $\lambda_{\min} = 300$ нм; $\lambda_{\max} = 800$ нм
- Исходные данные RGB-сигналов изображения – ортофотопланы в формате geotiff, нормировка и обработка – данные спутниковых измерений и пластины с известными значениями альбедо

Математические свойства и тестирование алгоритмов

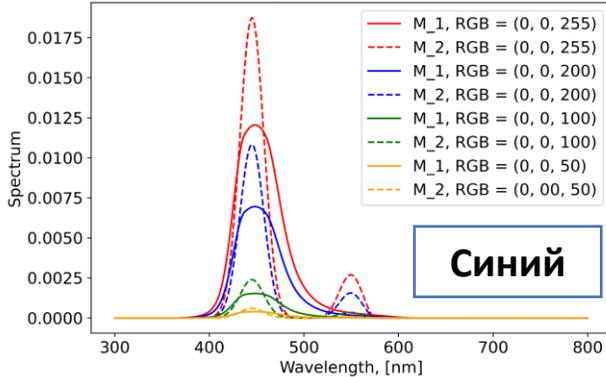
Сравнение двух алгоритмов по исходным спектральным функциям для «идеальных» цветов: красного, зелёного, синего и белого

$S(\lambda)$ - функция спектральной плотности излучения

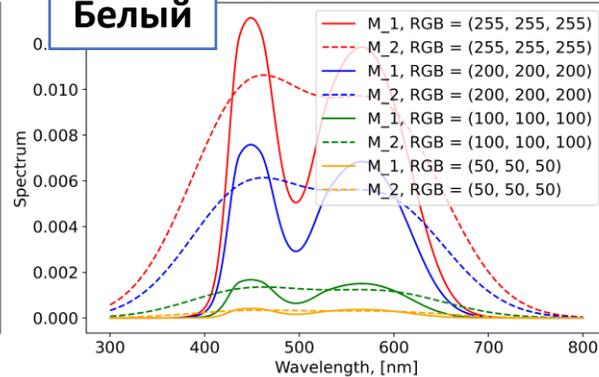
Восстановленные спектры излучения



(c) Spectrum of blue color



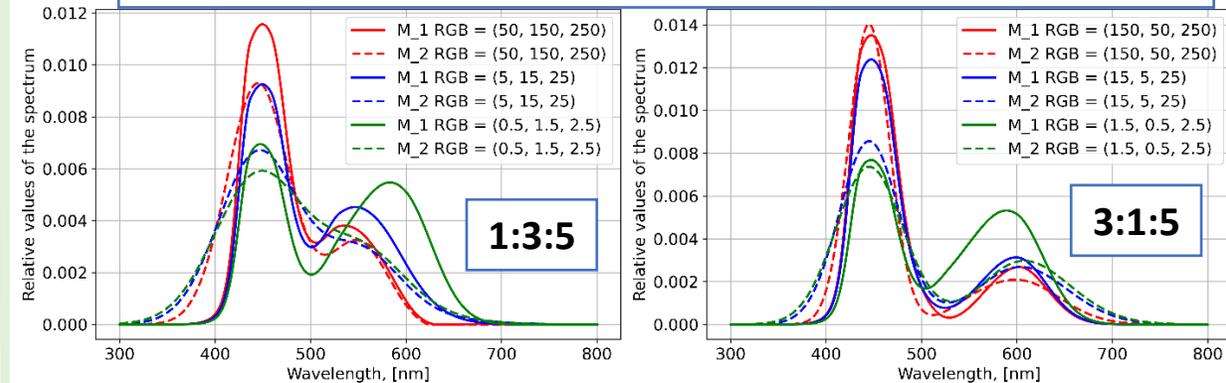
(d) Spectrum of white color



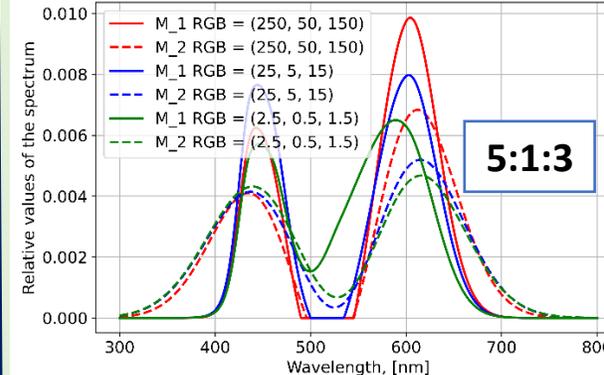
Сравнение двух алгоритмов по расчётным нормированным спектральным функциям:

$$S_{norm}(\lambda) = \frac{S(\lambda)}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S(\lambda) d\lambda}$$

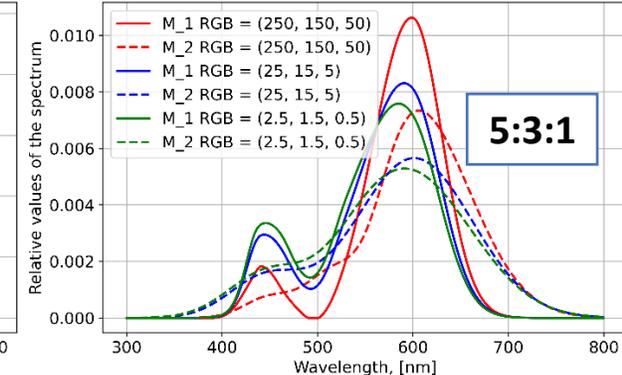
Восстановленные нормированные спектры излучения



Relative spectrum of RGB



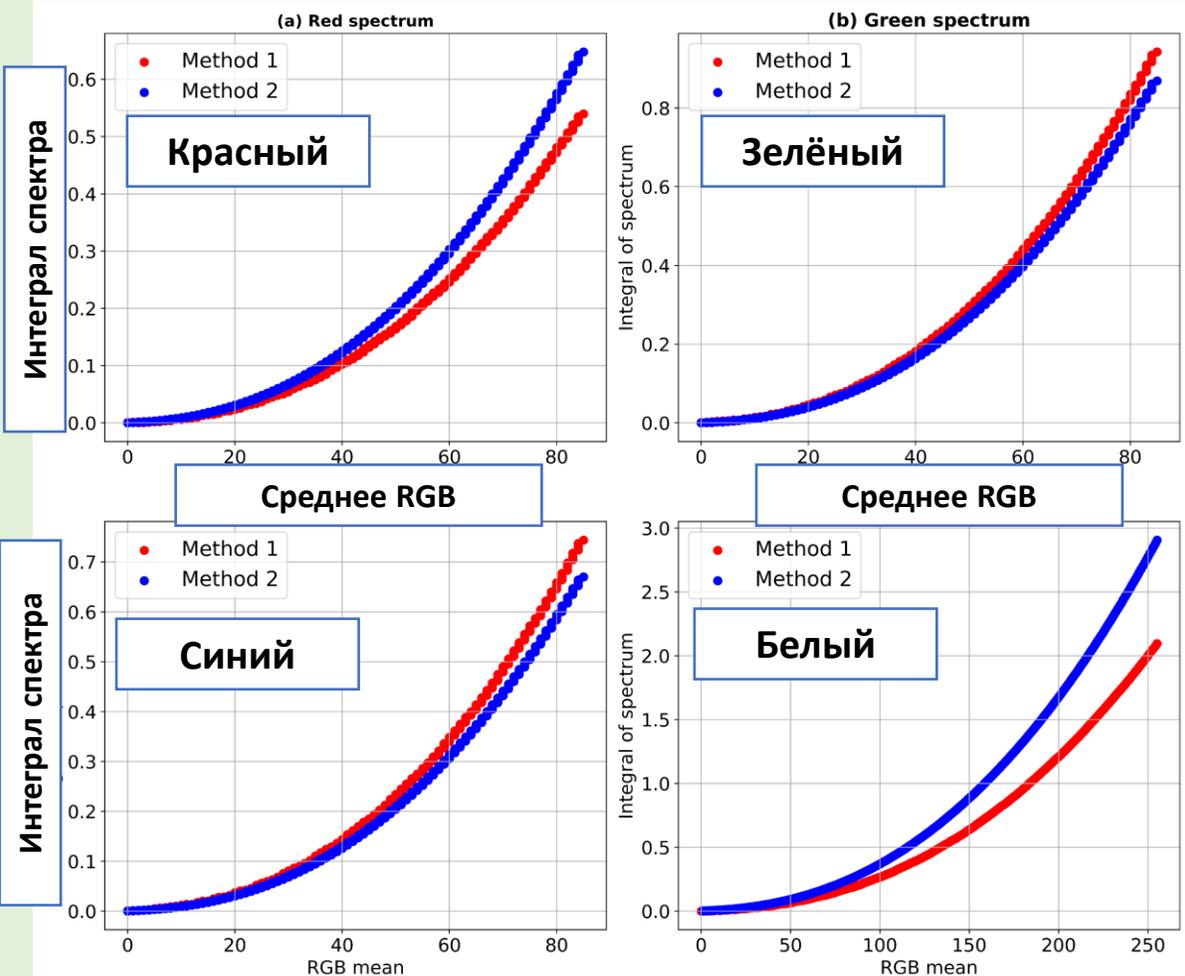
Relative spectrum of RGB



Математические свойства и тестирование алгоритмов

Тестирование воспроизведение интеграла спектра в зависимости от различных средних значений RGB:

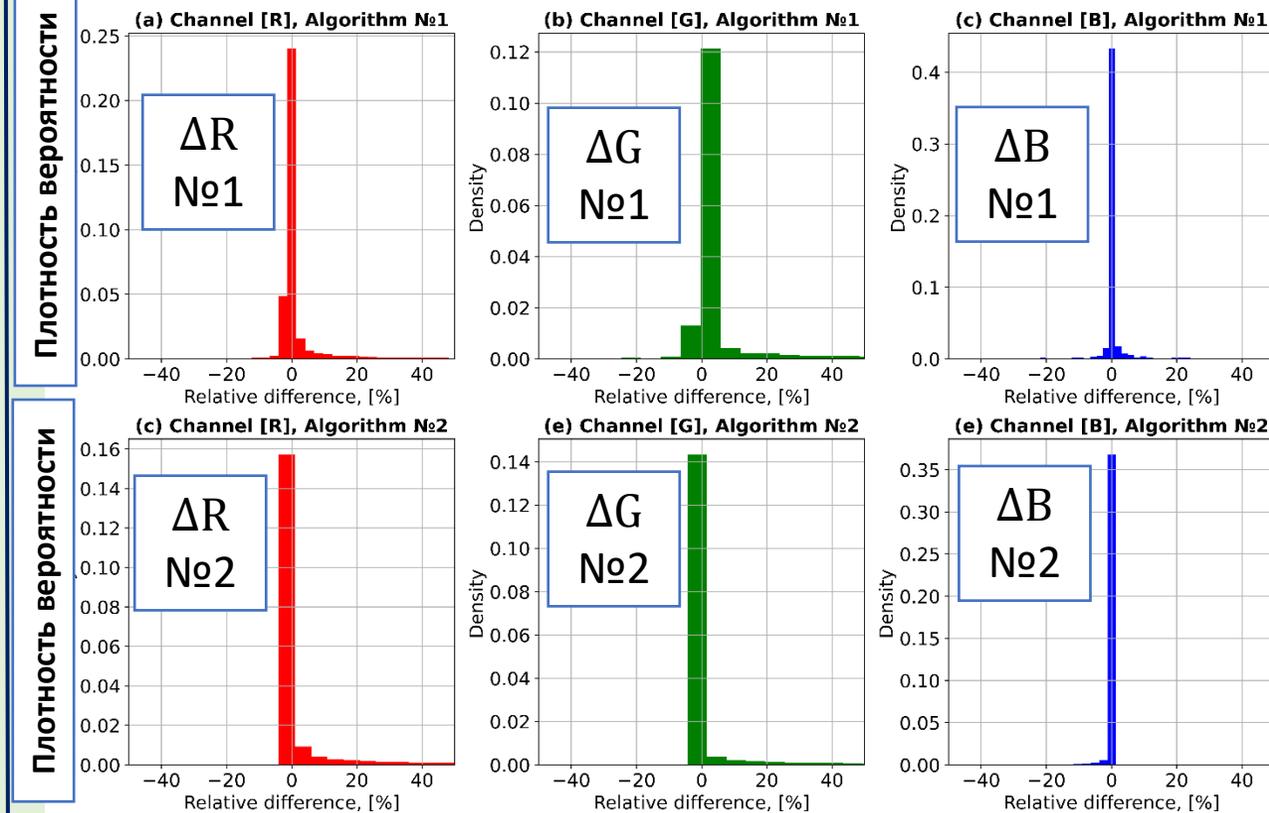
$$\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S^*(\lambda) d\lambda$$



Тестирование на точность обратного преобразования алгоритма в RGB:

$$RGB \xrightarrow{\text{algorithm}} S_G^*(\lambda) \xrightarrow{\text{def}} RGB^*$$

$$\Delta C(\%) = \frac{C(\text{alg}) - C(\text{source})}{C(\text{source})} * 100\%$$

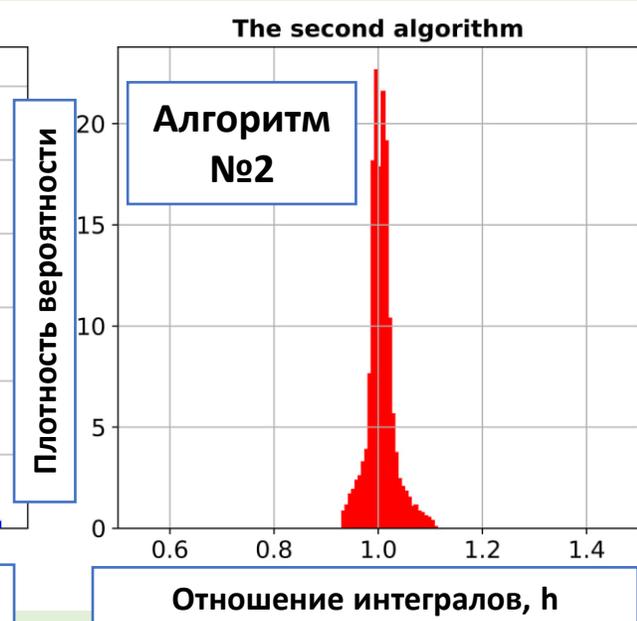
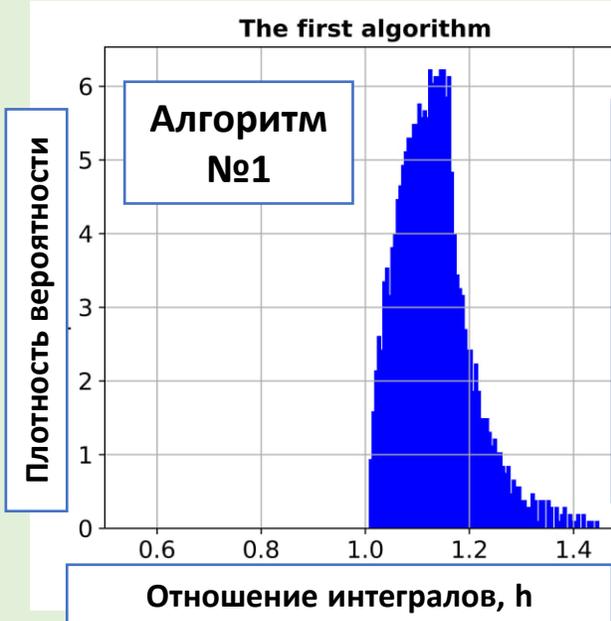
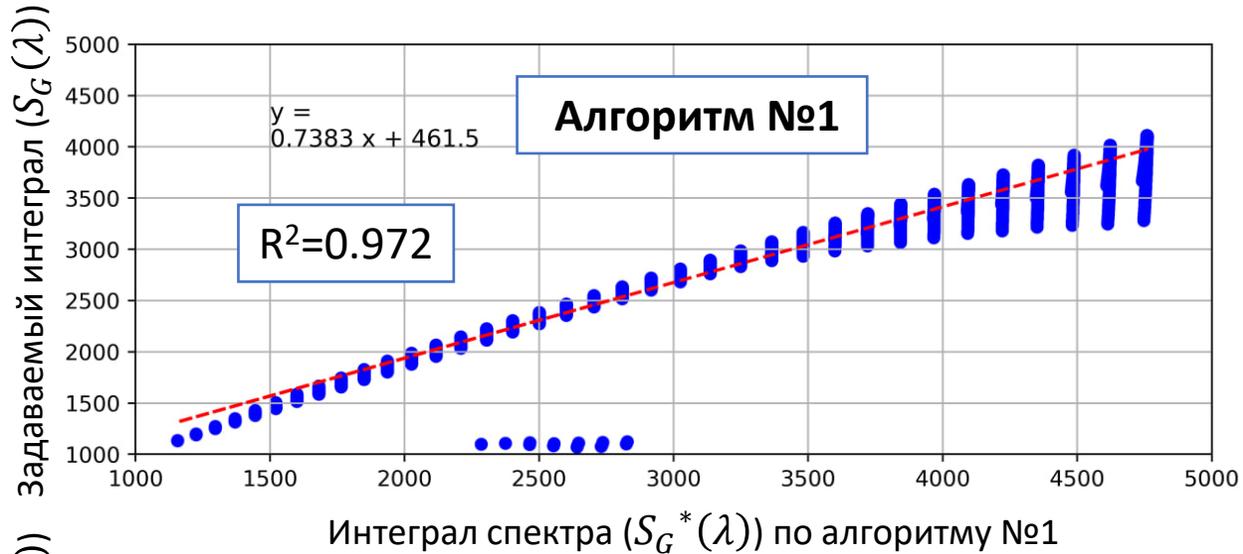


Математические свойства и тестирование алгоритмов

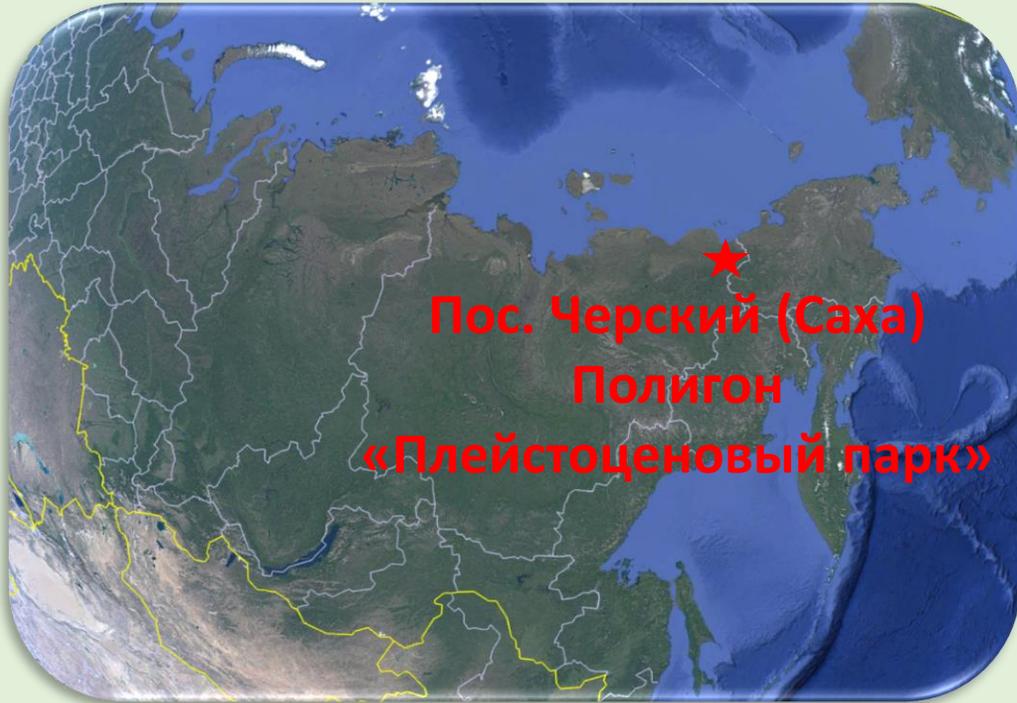
Тестирование на **точность восстановления интеграла спектра по обратной задаче:**

$$S_G(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{\sigma^2}\right)$$

$$S_G(\lambda) \xrightarrow{\text{def}} RGB, RGB \xrightarrow{\text{algorithm}} S_G^*(\lambda) \quad h = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_G(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_G^*(\lambda) d\lambda}$$



Описание выполнения полевых работ в пос. Черский, Якутия



Место проведения работ

Приборы и оборудование



Matrice 300 RTK и
пиранометры SP-215



DJI Mavic 3 Thermal с
RGB-камерой



Альбедомер
Янишевского

Также имелись *пластины* с известными спектральными коэффициентами отражения

Комплекс основных полевых работ по тестированию RGB-метода:

- 1) Проведение съёмки территории в видимом (в каналах RGB), создание ортофотоплана;
- 2) Проведение альбедосъёмочных работ контактным методом;

Снежные условия

21-23 апреля 2024 г.

Летние условия

12-14 августа 2024 г.

Методика обработки спутниковых измерений в альbedo поверхности

Суть метода:

- Использование данных спутниковых измерений *с атмосферной коррекцией*
- Альbedo вычислялось как *линейная комбинация спектральных каналов*:

$$\alpha = \sum_{i=1}^N \rho_i \times \omega_i$$

Снежные условия

Бесснежные условия

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

MSI (Sentinel-2)

OLI (Landsat 8, 9)

MSI (Sentinel-2)

OLI (Landsat 8, 9)

20 м/пиксель

30 м/пиксель

20 м/пиксель

30 м/пиксель

Li et al., 2018

Кnap et al., 1999

Liang et al., 2001

Wang et al., 2016

Кnap et al., 1999

Liang et al., 2001

Vanino S. et al., 2018

Li et al., 2018

Bonafoni et al., 2001

Baldinelli S. et al., 2018 (1)

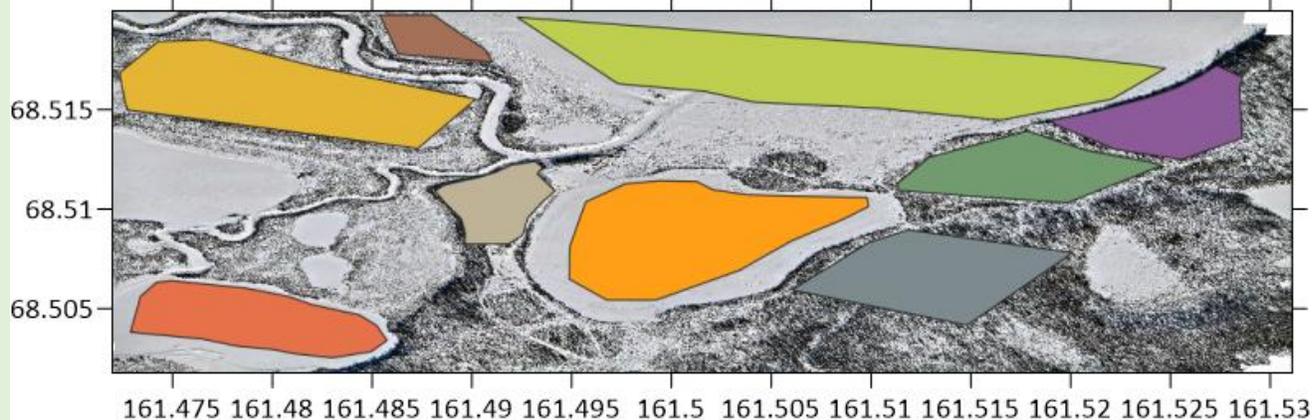
Baldinelli S. et al., 2018 (2)

Angelini et al., 2021

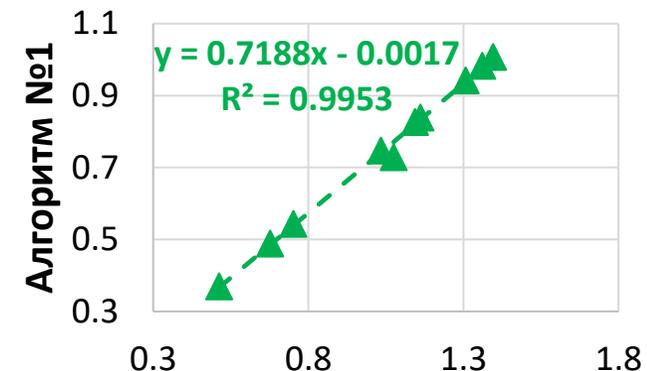
Параметризации основаны на методах *множественной регрессии* и *модельных расчётах*

Нормировка алгоритмов по спутниковым данным в зимних условиях (21-23 апреля 2024 г.)

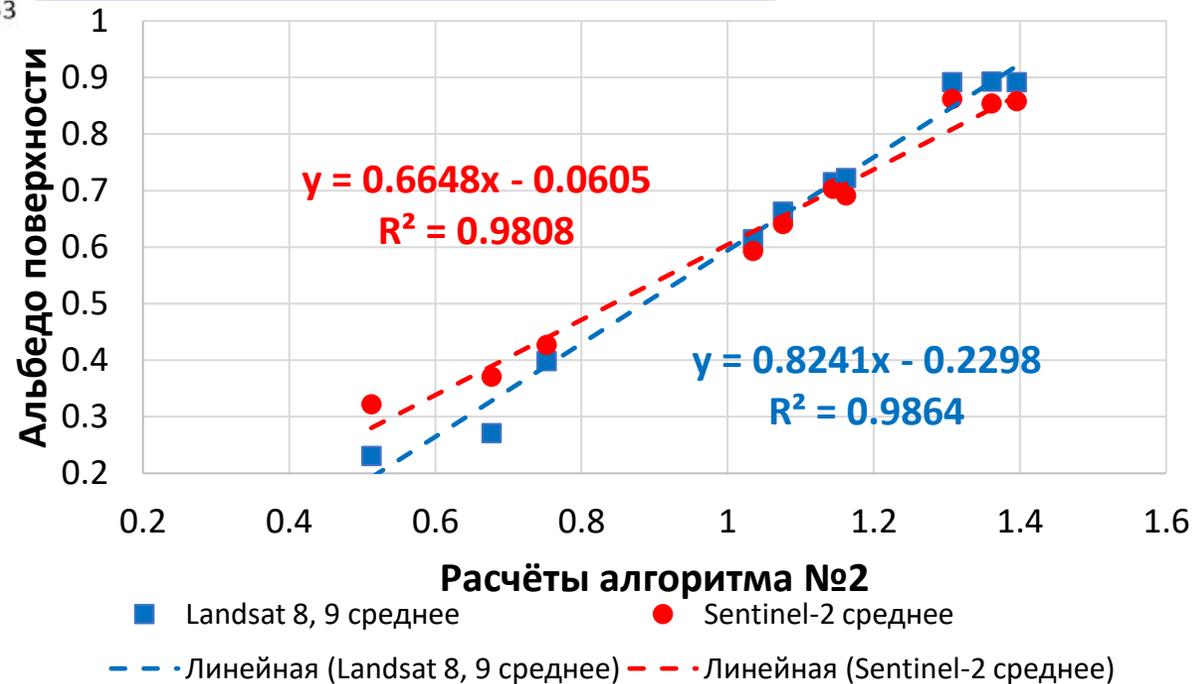
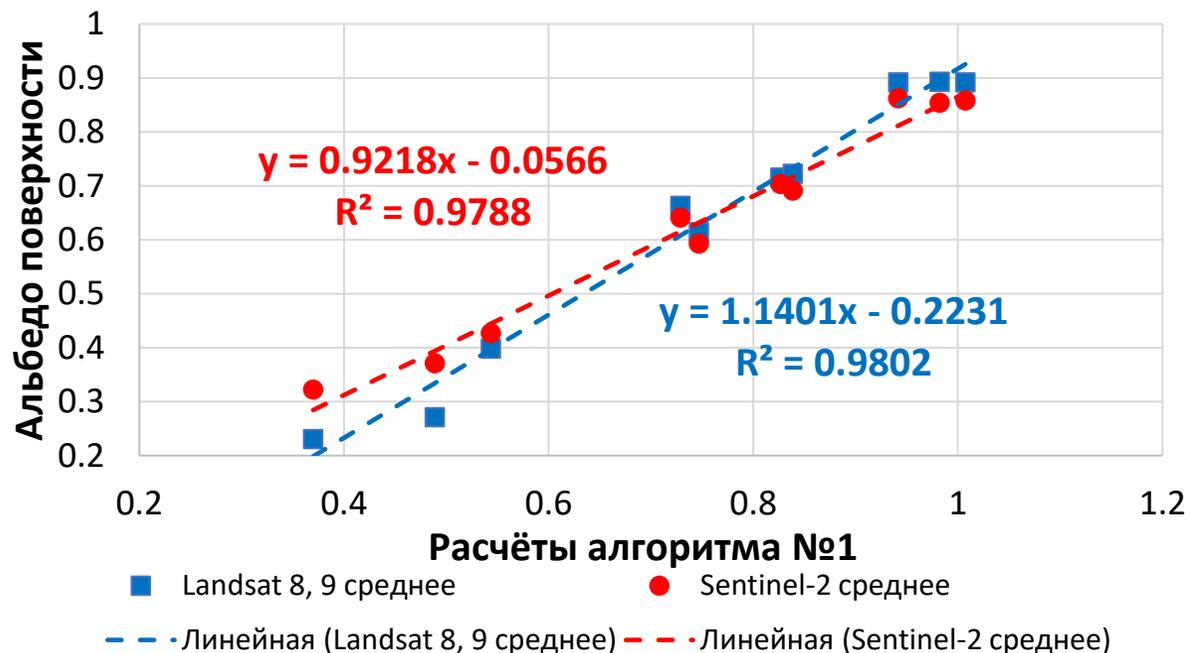
Исходный полученный *ортофотоплан* с БПЛА
с выделенными *реперными территориями*



В зимних условиях
результаты
удовлетворительны:
высокий R^2 и линейная
зависимость между
альбедо и расчётами
алгоритмов

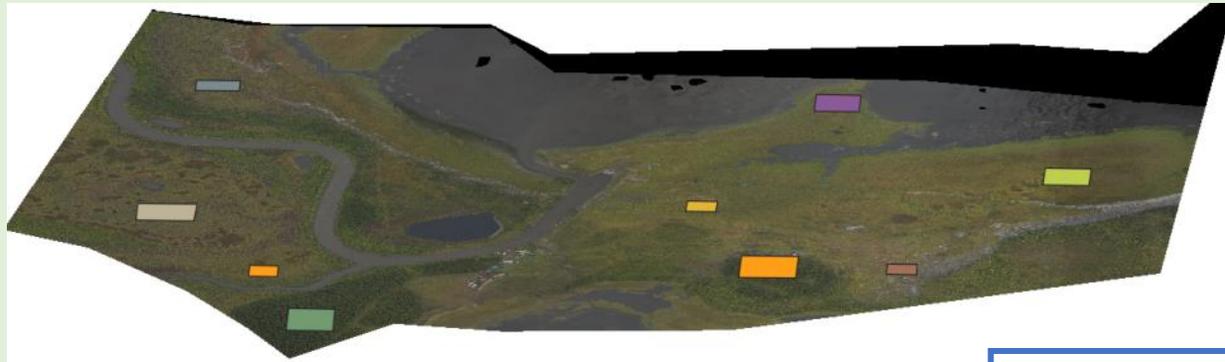


30 (20) м/пикс. → 0.12 м/пикс.

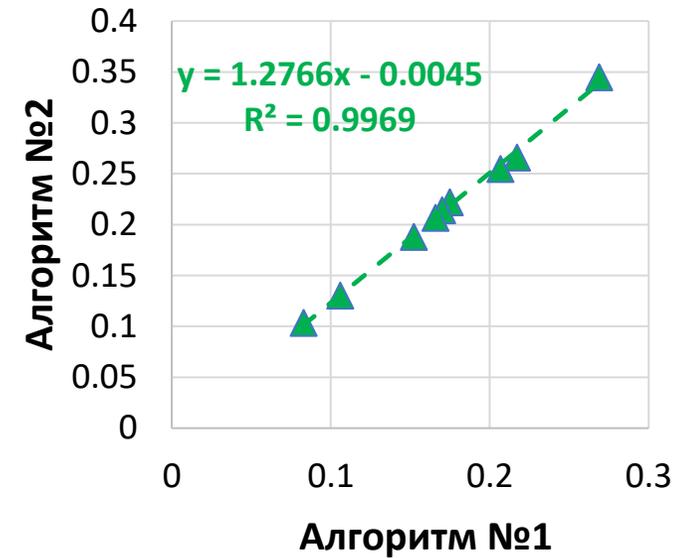


Нормировка алгоритмов по спутниковым данным в летних условиях (12-14 августа 2024 г.)

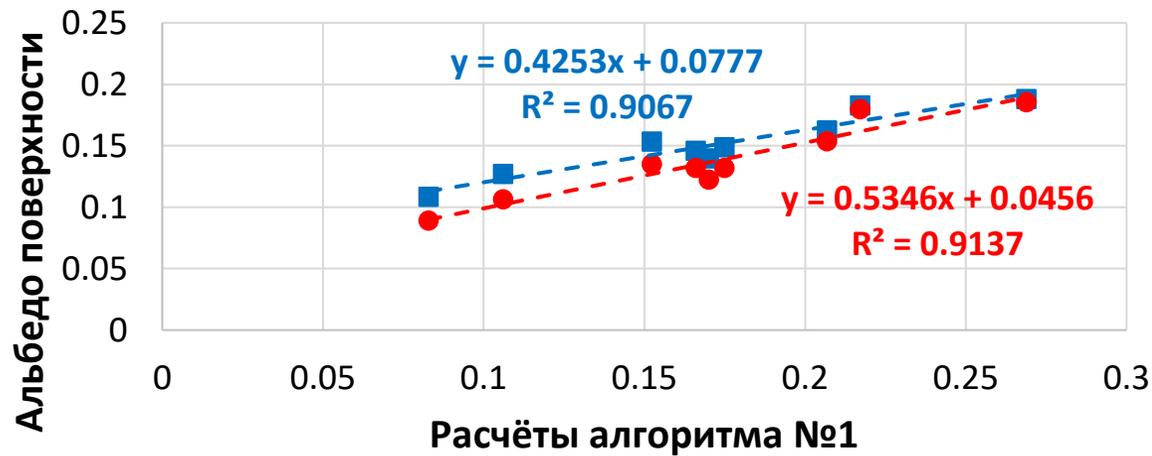
Исходный полученный *ортофотоплан* с БПЛА с выделенными *реперными территориями*



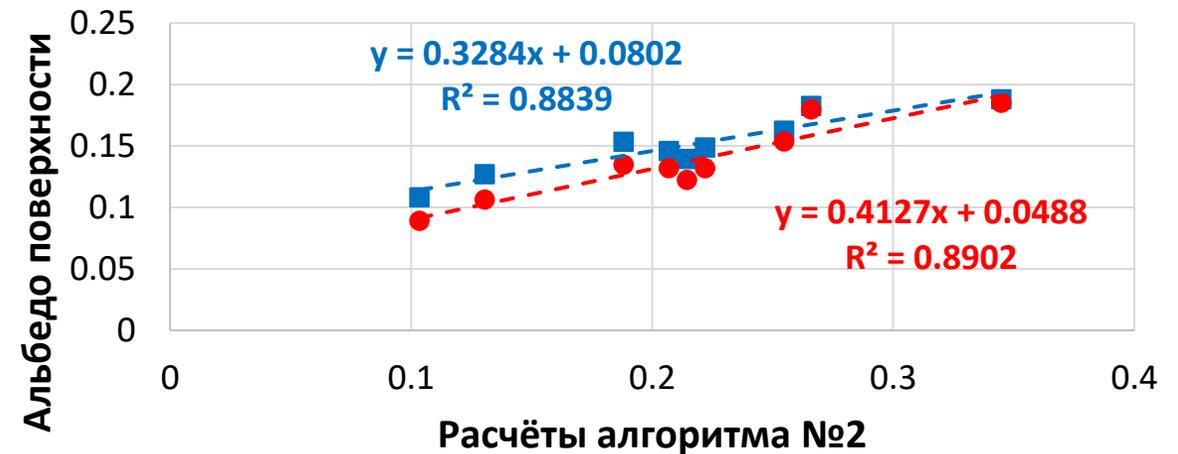
В летних условиях результаты удовлетворительны: высокий R^2 и линейная зависимость между альбедо и расчётами алгоритмов



30 (20) м/пикс. → 0.12 м/пикс.

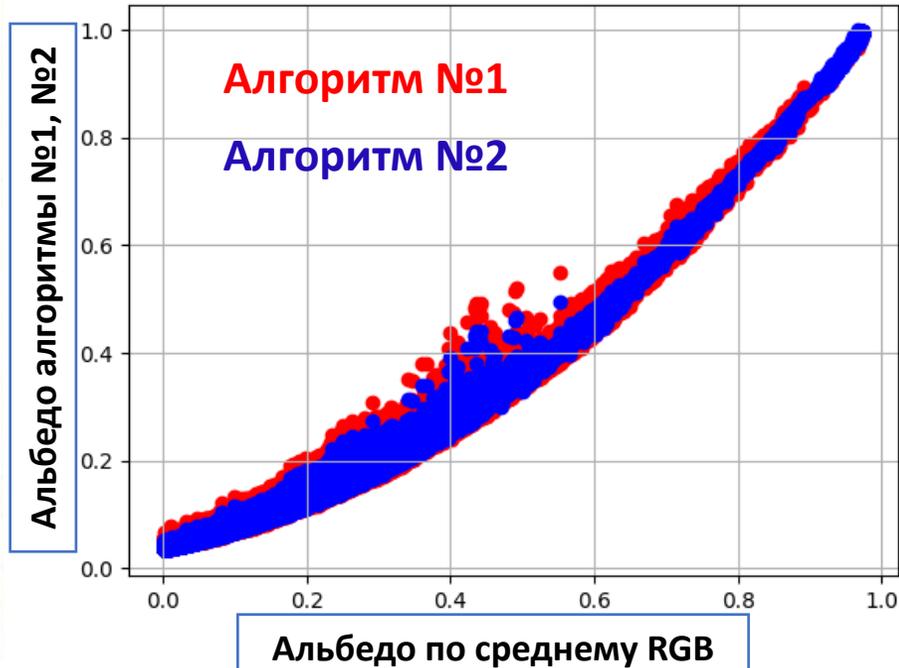


■ Landsat 8, 9 среднее ● Sentinel-2 среднее
- - - Линейная (Landsat 8, 9 среднее) - - - Линейная (Sentinel-2 среднее)



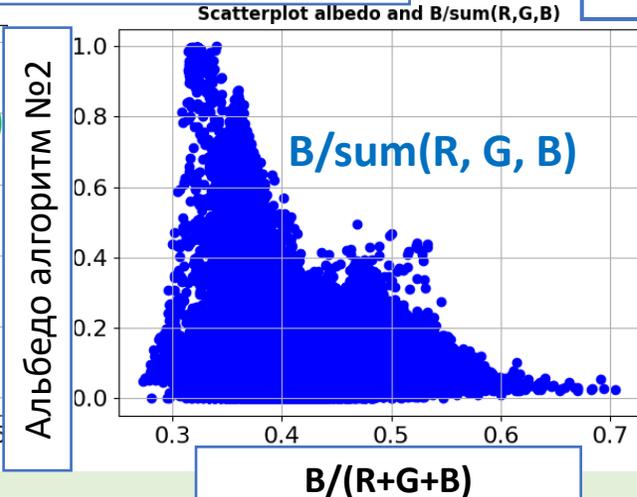
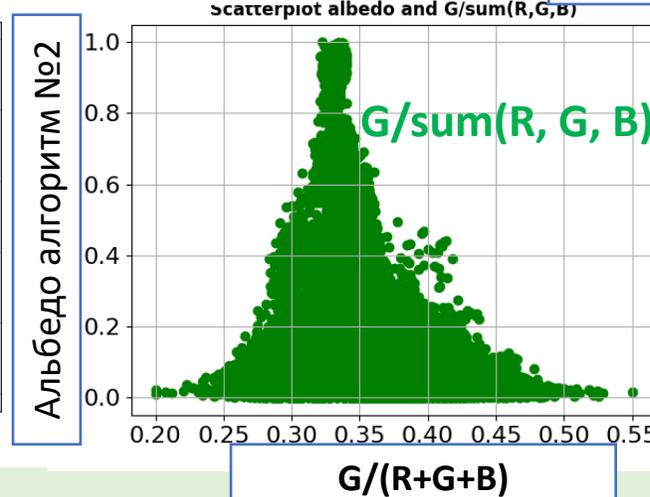
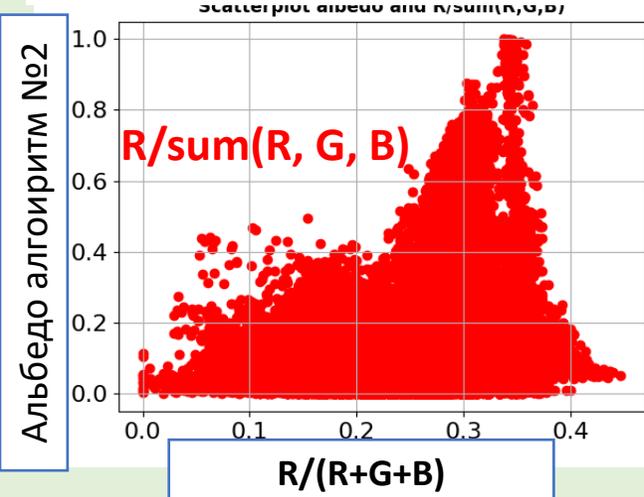
■ Landsat 8, 9 среднее ● Sentinel-2
- - - Линейная (Landsat 8, 9 среднее) - - - Линейная (Sentinel-2)

Нормировка алгоритмов по пластинам в летних условиях



Условия:
однородная сплошная
облачность

- Вычисления:**
- 1) Пластины использовались как реперные значения;
 - 2) Коррекция на физические значения альbedo
 - 3) Вычисление двумя алгоритмами и методом «среднего RGB»



Альbedo почвы по данным разных алгоритмов:

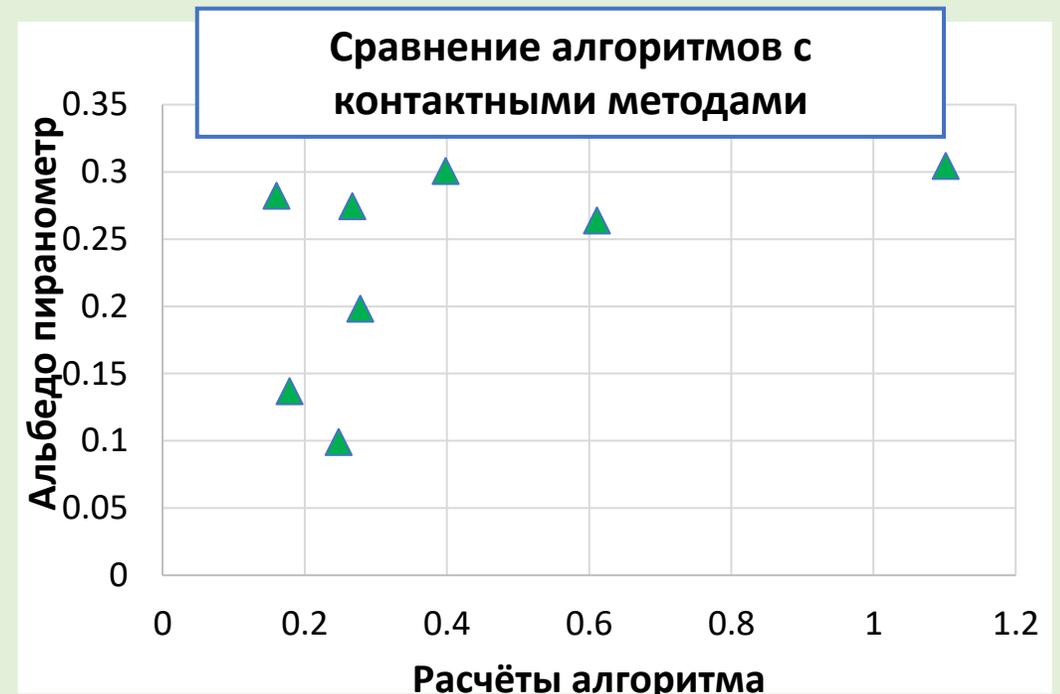
По 1-му алгоритму: 9.1 %
По 2-му алгоритму: 8.6 %
По среднему RGB: 13.1 %

Ограничения и обсуждение границ применимости алгоритмов

- 1) Требование **однородных условий освещения**, т.е. одинаковых значений суммарной солнечной радиации для всей территории снимка. **Влияние теней** при **прямой радиации**. Оптимальные условия – **плотные слоистые однородные облака**;
- 2) Алгоритм физически направлен на **восстановление альбедо в видимом диапазоне**. Статистическая обработка для всего коротковолнового диапазона менее обоснована;



Нарушение однородности освещения



Нарушение спектрального диапазона

Основные выводы и результаты работы

- 1) Реализованы и адаптированы два математических алгоритма, описана задача физически корректного преобразования RGB-сигналов надирных снимков в спектральную характеристику отражённой радиации и альbedo поверхности с сверхвысоким пространственным разрешением;
- 2) Алгоритмы были протестированы по системе теоретических и полевых испытаний, описаны их основные математические свойства, заданы области применимости их использования;
- 3) RGB-алгоритмы были нормированы по спутниковым данным Landsat 8, 9 и Sentinel-2, а также с помощью пластин с известными коэффициентами отражения. Показана возможность многократного увеличения пространственного разрешения данных обработки;
- 4) Реализованные RGB-алгоритмы хорошо работают только в условиях плотной слоистой облачности при равномерном, однородном освещении. При наличии прямой солнечной радиации альbedo поверхности изменяется от угла падения солнечных лучей, а также существуют искажения из-за наличия теней.

Благодарности:

- ❖ к.г.н. в.н.с. **Зимину Михаилу Викторовичу**, Географический факультет, кафедра картографии и геоинформатики;
- ❖ Сотрудникам **Северо-Восточной научной станции РАН** и природного полигона **«Плейстоценовый парк»**.

Работа выполнена при поддержке гранта **РНФ № 24-17-00155**

Петров Николай (nial.03@mail.ru, +79043156050)

