

Построение и радиометрическая нормализация безоблачных зимних композитных изображений покрытой снегом земной поверхности

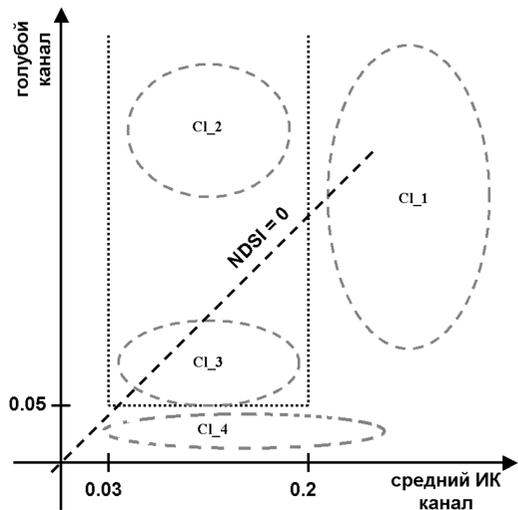
Ворушилов И.И., Барталев С.А., Егоров В.А.
Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
E-mail: ivanvorush@gmail.com

Разработанный в ИКИ РАН метод обработки серий спутниковых изображений за зимний период наблюдения основан на достаточно эффективной возможности разделения наземного снежного покрова и облачности в пространстве признаков «голубого» и «среднего ИК» каналов.

Построение композитных изображений покрытой снегом земной поверхности.

Алгоритм построения безоблачных композитных изображений покрытой снегом земной поверхности включает в себя следующую последовательность основных этапов обработки спутниковых данных ДЗЗ:

- 1) Пороговая классификация одномоментных спутниковых изображений временного ряда с выделением облаков, теней от облаков и свободных от снега участков земной поверхности, а также двух классов земного покрова, включая открытый снег и лесной покров с наличием снега на земной поверхности и/или на кронах деревьев;
 - 2) Статистический анализ временных рядов данных ДЗЗ со взаимной переклассификацией пикселей, ошибочно отнесённых на предыдущем этапе обработки к классам открытого снега и лесного покрова, а также последующей фильтрацией пикселей на основе критериев внутриклассовой изменчивости спектрально-отражательных характеристик;
 - 3) Статистический анализ временных рядов данных ДЗЗ для пикселей класса «лесной покров» с фильтрацией измерений, соответствующих наличию снега на кронах деревьев;
 - 4) Исключение из рассмотрения временных рядов данных ДЗЗ спектрально-отражательных характеристик земной поверхности в пикселях спутниковых изображений, находящихся под влиянием облаков или по результатам статистической фильтрации на предыдущих этапах обработки;
 - 5) Выбор наиболее статистически репрезентативных в заданном временном интервале значений спектрально-отражательных характеристик покрытой снегом земной поверхности и формирование соответствующих композитных изображений.
- Выполняемая на первом шаге алгоритма пороговая классификация одномоментных спутниковых изображений направлена на выделение таких классов как (CL_1) облака, (CL_2) открытый снег, (CL_3) лесной покров с наличием снега на земной поверхности и/или на кронах деревьев, (CL_4) тени от облаков и свободная от снега земная поверхность. Для проведения первичной (начальной) классификации используется двумерное распределение значений коэффициента спектральной яркости (КСЯ), измеренных в голубом (Rb) и среднем ИК (Rsw) диапазонах спектра.



Двумерное распределение участков земной поверхности, покрытой снегом, и облачного покрова в зимний период времени в двумерном пространстве признаков голубом и среднем ИК диапазонах спектра

• Заданные при этом пороговые значения обеспечивают умеренно консервативную фильтрацию пикселей, гарантированно соответствующих облакам и свободным от снега участкам земной поверхности. При этом в силу близости спектрально-отражательных характеристик некоторых типов облаков и открытого снега их разделение по одномоментным изображениям не обеспечивается с достаточной надёжностью.

• Дальнейшее решение задач разделения указанных объектов и фильтрации пикселей покрытых лесом территорий с наличием снега на кронах деревьев достигается на основе анализа временных рядов спектрально-отражательных характеристик участков, отнесённых на первом этапе классификации изображений к снежному покрову. Непосредственное использование для этой цели в качестве признака нормализованного разностного индекса снега $NDSI$ (формула 1) (Hall et al., 1995) также не является оптимальным, поскольку леса высокой сомкнутости (прежде всего, хвойных вечнозелёных пород) и лишённые снежного Покрова безлесные территории характеризуются близкими его значениями:

$$NDSI = (Rb - Rsw) / (Rb + Rsw) \quad (1)$$

• Следует отметить, что в выбранном пространстве признаков использование $NDSI$ в качестве параметра может быть выражено в виде:

$$Rb = Rsw \cdot (1 + NDSI) / (1 - NDSI), \quad Rb = Rsw \cdot n_{pu} \cdot NDSI = 0 \quad (2)$$

• Предварительное построение гистограммы двумерного распределения в пространстве признаков Rb и Rsw с участием большого числа наблюдений зимнего периода позволяет достаточно точно оценить пороговые значения, разделяющие интересующие нас классы подстилающей поверхности.

Далее полученные пороговые значения применяются ко всем спутниковым изображениям за зимний период наблюдений. Было выявлено, что шумы связанные с неоднородностью снега на кронах деревьев могут сильно испортить качество выходного композитного изображения. Особенно этому эффекту подвержен темнохвойный лес, в силу малых значений КСЯ в нём. Предполагается, что во временном ряду преобладают пиксели не подверженные данному эффекту, поэтому зашумлённые пиксели отфильтровываются статистически.

Также стоит отметить, что весь описанный выше алгоритм действий был реализован с помощью «Google Earth Engine», что несомненно ограничило мат аппарат доступный для обработки данных, но тем не менее позволило сравнительно быстро получить зимнее композитное изображение на всю Россию.

• В данном пространстве признаков соответствующие снегу пиксели, в том числе, находящемуся под кронами деревьев, характеризуются высокой отражательной способностью в видимой области спектра с ее снижением в ИК диапазоне длин волн. На представленном рисунке вышеупомянутом двумерном распределении значений коэффициента спектральной яркости (КСЯ) классов объектов, подлежащих разделению по спутниковым изображениям, можно выделить следующие характерные области:

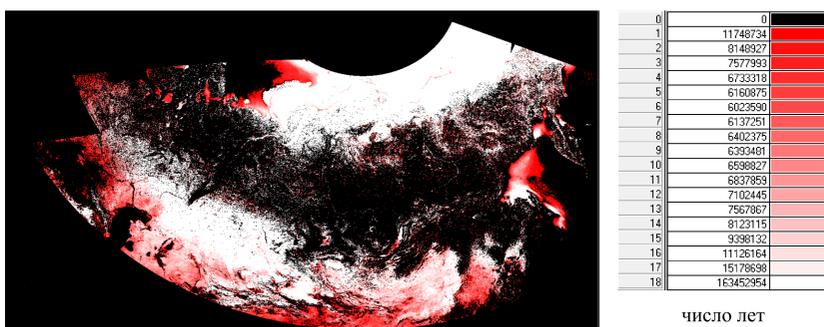
• «снег», если $Rb > 0,05$ и $0,03 < Rsw < 0,2$;

• «облачность, тени и прочие территории», если $Rsw < 0,03$ или $Rsw > 0,2$ или $Rb < 0,05$.

• где Rb и Rsw - КСЯ в голубом и в среднем ИК спектральных диапазонах соответственно.

Алгоритм радиометрической нормализации композитных изображений покрытом снегом земной поверхности.

Описанный в левой колонке метод позволяет получать многолетние временные ряды очищенные от маскирующего влияния облачности композитных спутниковых изображений, характеризующих спектрально-отражательные свойства покрытой снегом земной поверхности. Вместе с тем, анализ ежегодных композитных изображений показывает наличие межгодовых вариаций значений КСЯ, обусловленных, изменчивостью высоты снежного покрова и его отражательных характеристик, вызванных влиянием различных факторов, включая, наличие ледяной корки, уровень влагосодержания снега и степень шероховатости его поверхности. Наличие такого рода факторов вариабельности значений КСЯ может приводить к искажению результатов многолетнего анализа композитных изображений, в частности, при решении задач оценки характеристик и дистанционного мониторинга лесов. Кроме того, к числу факторов потенциально способных приводить к искажению результатов анализа многолетних спутниковых данных можно отнести и изменение радиометрических характеристик сенсора съёмочной системы ДЗЗ, вызванных, как правило, постепенным снижением его чувствительности на протяжении жизненного цикла его эксплуатации. Для компенсации влияния вышеуказанных факторов межгодовой вариабельности композитных изображений покрытой снегом земной поверхности разработан метод их взаимной радиометрической нормализации. В основе метода лежит локально-адаптивная оценка на свободных от леса территориях спектрально-отражательных характеристик открытого снега в предположении постоянства значений КСЯ последнего и полного покрытия им участков, соответствующих пикселям изображений. При этом из используемого для радиометрической нормализации композитных изображений множества пикселей должны быть исключены участки с наличием древесной растительности, поскольку процессы роста последней потенциально могут вносить искажения в результаты межгодовой радиометрической нормализации многолетних рядов данных. Локально-адаптивная оценка яркостных характеристик безлесных участков осуществляется в узлах регулярной пространственной сети методом LAGMA (Bartalev et al., 2014; Bartalev et al., др., 2016). В качестве опорных территорий используются открытые участки покрытой снегом поверхности, выявленные с участием ежегодно обновляемых спутниковых карт растительного покрова (Барталев и др., 2016). По ежегодным композитным изображениям в красном и ближнем ИК диапазонах спектра определяются максимальные значения КСЯ на занятых лесом территориях с последующим исключением из рассмотрения пикселей, с более низкими величинами КСЯ. Дополнительная пространственная фильтрация также исключает из рассмотрения участки, находящиеся в непосредственно примыкающей к покрытым лесом территориям 500 метровой буферной зоне.



Стабильные светлые участки безлесного зимнего земного покрова

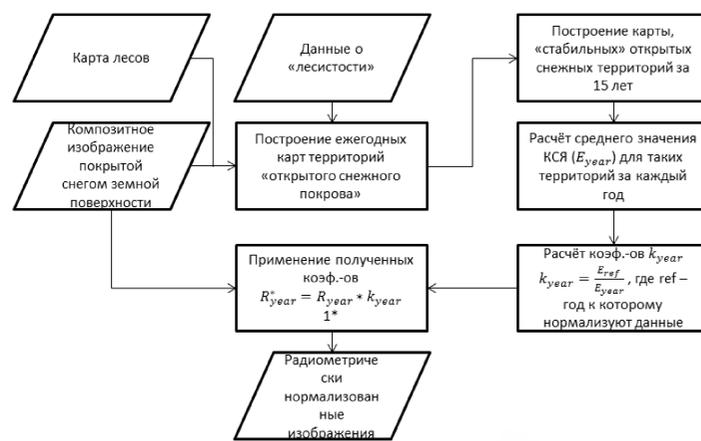
Таким образом, на вход LAGMA поступают опорная выборка пикселей, соответствующих стабильно безлесным территориям с присущими им значениями КСЯ, и временной ряд композитных спутниковых изображений покрытой снегом земной поверхности. На основе этих данных производится вычисление для каждого года локализованных средних значений КСЯ E_{year} с присвоением их узлам регулярной сети с пространственным окном заданного размера. При этом территория, участвующая в локализованном сборе статистики значений КСЯ по опорной выборке пикселей, должна заведомо превышать заданные размеры окна регулярной сети. С использованием полученных локализованных средних значений КСЯ открытого снега проводится вычисление локально-адаптивных коэффициентов взаимной радиометрической нормализации многолетних композитных изображений k_{year} . При этом коэффициенты радиометрической нормализации временного ряда изображений вычисляются относительно одного из них, выбранного в качестве опорного, на основе соответствующих последнему средних значений КСЯ E_{ref} с использованием следующей формулы:

$$k_{year} = \frac{E_{ref}}{E_{year}} \quad (3)$$

Последующая процедура радиометрической нормализации композитных изображений каждого (отличного от опорного) года временного ряда выполняется согласно следующей формулы:

$$R_{year}^* = R_{year} \cdot k_{year} \quad (4)$$

где R_{year} и R_{year}^* - исходное и приведённое (радиометрически нормализованное) значение КСЯ композитного изображения.



Общая схема метода радиометрической нормализации