РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2019, том 6, выпуск 2, с. 68–79

____ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ, ____ Обработка информации и системы телеметрии

УДК 004.93 DOI 10.30894/issn2409-0239.2019.6.2.68.79

Алгоритм анализа спектральных характеристик снежного и облачного покрова по данным МСУ-МР/«Метеор-М» № 2

К. И. Зубкова, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Л.А.Гришанцева, к. ф-м. н., contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Т. Г. Куревлева, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Скрипчук, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

A. A. Moposob, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Одной из составляющих информационного обеспечения процессов целевого применения орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли является оперативное получение актуальной метеорологической информации, в частности в виде карт снежного покрова и карт облачности. В настоящее время комплекс планирования в дополнение к средствам, обеспечивающим расчет метеопрогноза, оснащен информационной базой данных, включающей снимки МСУ-МР/«Метеор-М» №2 [1] в виде композитов изображений в трех коротковолновых каналах (без какой-либо тематической обработки). Если этих данных недостаточно для принятия решения, то оператор дополнительно анализирует данные зарубежных спутников, не включенные в комплекс планирования. Для оптимизации работы необходимо автоматизировать процессы метеообеспечения. В настоящей работе предложен алгоритм формирования маски снежного покрова и маски облачности, по данным отечественной аппаратуры MCУ-MP/«Метеор-М» № 2, основанный на анализе спектральных характеристик различных видов подстилающей поверхности — земли, облаков и снега. В алгоритме использованы значения коэффициентов спектральной яркости в канале 1 МСУ-МР (зеленый, 0,63 мкм) и в канале 3 МСУ-МР (SWIR-1, 1,7 мкм). Предлагаемый алгоритм отличается от зарубежных аналогов: вместо константных порогов в алгоритме применяются пороговые значения, которые зависят от значений яркостей в каналах 1 и 3. Алгоритм верифицирован на 459 маршрутах съемки. Тестирование подтвердило, что предлагаемый алгоритм является универсальным: пороги не зависят ни от географического положения, ни от времени года. Учитывая непрерывность съемки, выполняемой аппаратурой МСУ-МР, настоящий алгоритм может обеспечивать создание обновляемых с периодичностью 2-3 дня карт снежного покрова и облачности в автоматическом режиме, что позволит снабжать комплекс планирования актуальной информацией.

В ближайшее время планируется создание программного модуля, реализующего данный алгоритм, и отработка возможности его практического использования на средствах моделирующего стенда, созданного в рамках НИР «Оператор ДЗЗ».

Ключевые слова: дистанционное зондирование, снежный покров, облачность, МСУ-МР, «Метеор-М»

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2019, том 6, выпуск 2, с. 68–79

___ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ, ____ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ

Algorithm to Analyze Spectral Characteristics of Snow and Cloud Cover Based on MSU-MR/Meteor-M No. 2 Data

K. I. Zubkova, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

L. A. Grishantseva, Cand. Sci. (Phys.-Math.), contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

T.G.Kurevleva, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. A. Skripchuk, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. A. Morozov, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. An operational acquisition of up-to-date weather data, particularly in the form of snow cover maps and cloud maps, is one of the components providing the information support for target use of the orbital remote sensing spacecraft constellation. The planning complex, in addition to the weather forecast calculation facilities, is equipped now with the information database containing the MSU-MR/Meteor-M No.2 images (Gorbunov et al. 2015) as composite images in three shortwave channels (with no theme-based processing). In case the data is insufficient for making decisions, then an operator analyses also the data from foreign satellites not included in the planning complex. The performance optimization requires the planning complex to be supplemented with the cloud cover mask and cloud mask. The paper proposes the algorithm of generating the snow cover mask and cloud mask using the domestic MSU-MR/Meteor-M No.2 data. The algorithm uses the spectral characteristics analysis of different types of underlying surface: ground, clouds, and snow. The algorithm uses the spectral radiance factor values in the channel 1 of MSU-MR (green, 0.63 μ m) and in the channel 3 of MSU-MR (SWIR, 1.7 μ m). The proposed algorithm differs from its foreign counterparts: it employs the threshold values depending on the radiances in the channels 1 and 3 rather than the constant thresholds. The algorithm was verified across 459 imagery strips. The testing confirmed the versatility of the proposed algorithm: the thresholds do not depend either on geographical location or on seasons. Considering the continuity of imagery from MSU-MR, this algorithm is capable of producing the snow cover and cloud maps automatically with the 2–3 day updating. This will enable the planning complex to be provided with up-to-date snow cover data.

In the nearest future, the creation of the program module realizing this algorithm and adjustment of the possibility of its practical application by means of the simulation stand created within the R&D "Earth remote sensing operator" is planned.

Keywords: remote sensing, snow cover, cloud cover, MSU-MR, Meteor-M

Введение

Одним из приоритетных направлений модернизации наземно-космической инфраструктуры дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в рамках реализации мероприятий Федеральной космической программы России на 2016–2025 годы определена автоматизация технологий целевого применения орбитальной группировки (ОГ) космических аппаратов (КА) ДЗЗ.

В процесс «целевого применения» входят такие этапы работы с данными ДЗЗ, как формирование заказа на спутниковую съемку, планирование съемки, прием спутниковой информации, ее первичная, стандартная и тематическая обработки, а также выдача конечного продукта потребителю. Планирование спутниковой съемки относится к ресурсоемким аспектам целевого применения.

Одной из важных составляющих комплексного планирования спутниковой съемки является метеорологическое обеспечение. Основное назначение метеопрогноза — помощь в принятии решения о целесообразности планирования съемки в заданном месте в заданное время, а также определение входных параметров в экспонометрический расчет. В частности, наличие или отсутствие снежного покрова существенно влияют на оценку требуемого времени накопления сигнала на планируемом маршруте съемки.

Операторы службы планирования используют RGB-композиты спутниковых изображений в виде глобальных покрытий, формируемых в течение коротких интервалов времени - от одного до двух-трех дней. В настоящее время в комплекс планирования включено отображение глобального покрытия, формируемого по данным съемки МСУ-МР/«Метеор-М» №2 [1] в дневное время. Поверх RGB-изображений МСУ-МР накладываются контуры планируемых маршрутов. К дополнительным продуктам, используемым для оценки наличия снежного покрова в месте съемки, относятся: маска снежного покрова по данным AVHRR/MetOp-A,B [2] и ежедневные RGB-композиты изображений MODIS в каналах 1-4-3 [3]. Решение о наличии или отсутствии снежного покрова и/или облачности оператор принимает после визуального анализа глобальных изображений в месте планируемой съемки. Однако на обработку одного маршрута уходит много времени (до нескольких минут), что значительно замедляет процесс работы, особенно в условиях большого числа заявок, и увеличивает трудоемкость.

Конечной целью работы с данными МСУ-МР является автоматизированное формирование регулярно обновляемой маски снежного и облачного покровов, встроенной непосредственно в комплекс планирования. На данном этапе работы сформирован и верифицирован алгоритм формирования такой маски по данным МСУ-МР/«Метеор-М» № 2.

Основа распознавания снега и облачности на фоне других типов подстилающей поверхности спектральные свойства этих объектов. Для снега и облаков характерны высокие значения коэффициента спектральной яркости (КСЯ) в видимом и ближнем ИК-диапазонах [4-7], существенное уменьшение КСЯ в коротковолновом ИК-диапазоне (SWIR-Short-Wave Infra-Red) и низкие значения радиационной температуры в дальнем ИК-диапазоне (LWIR — Long-Wave Infra-Red). У МСУ-МР в видимом диапазоне работает канал 1 (зеленый 0,6 мкм), в ближнем ИК-диапазоне — канал 2 (0,8 мкм), в диапазоне SWIR-1 — канал 3 (1,7 мкм), в диапазоне SWIR-2 — канал 4 (3,8 мкм) и в дальнем ИК-диапазоне два канала: 5 (11 мкм) и 6 (12 мкм).

Снег и облака достоверно отделяются от других объектов по контрасту яркостей в видимом и ближнем ИК-диапазонах. Тем не менее задача отделения этих объектов друг от друга не может быть решена без привлечения данных в каналах SWIR-диапазона. В каналах видимого и ближнего ИК-диапазонов КСЯ снега и облаков очень близки, но в каналах SWIR-диапазона существует контраст значений КСЯ между этими объектами [4,5]. Именно это свойство используется для расчета индекса снега NDSI (Normalized Difference Snow Index): NDSI = (Green - SWIR-1)/(Green ++ SWIR-1) [8]. Однако следует иметь в виду, что использование порогового значения NDSI не гарантирует безошибочного отделения снега от облаков. Высокие значения NDSI могут соответствовать не только заснеженным участкам суши, но и высоким, так называемым ледяным облакам. Окончательное решение о типе подстилающей

поверхности принимается после сопоставления значений радиационной температуры в канале 11 мкм с модельными среднеклиматическими значениями: если разность температур существенно отлична от 0 K, то объект считается снежным облаком.

В работе [6] представлен пороговый алгоритм выделения снега по данным AVHRR. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 1.



Рис. 1. Алгоритм выделения снежного покрова по данным AVHRR [6]

В алгоритме применяются следующие константные пороговые значения: радиационная температура в канале 4 *T*4, разность радиационных температур в каналах 4 и 5 *T*45, NDVI [9], разность радиационных температур в каналах 3 и 4 *T*34, альбедо (КСЯ) в канале 1 *A*1. Значения порогов определены эмпирически, только для одного региона (Восточной Канады) и для времени года ранняя весна.

Можно отметить высокую достоверность результатов — вероятность правильного обнаружения снега составляет 97%. Верификация маски снега выполнена с использованием большого количества наземных данных. Однако сами авторы позиционируют свой алгоритм как региональный, пороги определены и корректно работают только для одного региона и одного времени года.

Алгоритм построения маски снега по данным MODIS/Terra, Aqua также является константнопороговым [7, 10]. В алгоритме применяются константные пороговые значения NDSI, КСЯ в канале 2 (ближний ИК) и КСЯ в канале 4 (зеленый). Пиксели, в которых NDSI превышает значение 0,4, с высокой вероятностью относятся к классу снега. Если при этом КСЯ в канале 2 (ближний ИК-диапазон) превышает 11%, а КСЯ в канале 4 (зеленый) превышает 10%, то пиксель определяется как снег с вероятностью 100%.

Кроме того, для территорий, покрытых лесом, дополнительно используется пороговое значение вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Это связано с тем, что для лесных территорий значения NDSI занижены по сравнению с поверхностью без растительности.

На рис. 2 приведена скаттерограмма [5] распределения значений КСЯ в каналах 0,6 мкм и 1,6 мкм AVHRR/NOAA-17 [11], полученная для сцены съемки над Альпами. В сцене присутствуют снег (snow), облака (cloudy) и открытая поверхность



Рис. 2. Скаттерограмма распределения значений КСЯ в каналах 1 и За AVHRR/NOAA-17 для различных типов подстилающей поверхности, по данным съемки над Альпами [5]

| | МСУ-МР | | AVHRR | |
|---------------------------------|--|--|--|---|
| Количество спектральных каналов | 6 | | 5 (одновременно работающих) | |
| Спектральные диапазоны | канал 1 канал 2 канал 3 канал 4 канал 5 канал 6 | 0,50-0,70 мкм 0,70-1,10 мкм 1,60-1,80 мкм 3,50-4,10 мкм 10,50-11,50 мкм 11,50-12,50 мкм | канал 1 канал 2 канал За канал 3b канал 4 канал 5 | 0,58–0,68 мкм 0,725–1,10 мкм 1,58–1,64 мкм 3,55–3,93 мкм 10,30–11,30 мкм 11,50–12,50 мкм |
| Полоса обзора, км | 2800 | | 2900 | |
| Пространственное разрешение, км | 1,0 | | 1,1 | |

Таблица 1. Основные характеристики МСУ-МР/«Метеор-М» № 2 и AVHRR

(clear). *P* — вероятность правильного распознавания типа поверхности.

На границах, разделяющих кластеры трех указанных выше типов поверхности, в скаттерограмме присутствуют смешанные ячейки.

В качестве примера такой ситуации представлена ячейка, на которую указывает стрелка желтого цвета: из шести точек в ячейке три соответствуют облачности, две — открытой поверхности и одна — снежному покрову. Участки изображения, соответствующие пикселям, попавшим в эту смешанную ячейку, можно охарактеризовать как безоблачные только с вероятностью 50%. Следует также отметить, что характер расположения в скаттерограмме кластеров, соответствующих трем типам поверхности — облака, снег, открытая поверхность, свидетельствует о том, что любые значения константных порогов КСЯ в каналах 0,6 мкм и 1,6 мкм неизбежно приведут к появлению и ложных тревог, и пропусков в масках снега или облачного покрова.

В настоящее время практически во всех алгоритмах формирования маски снежного покрова применяются константные пороговые значения КСЯ, NDSI и радиационных температур. Применение описанных выше константно-пороговых алгоритмов в глобальном масштабе, в том числе на территории России, затруднено по следующим причинам:

- пороги непостоянны и должны изменяться в зависимости от времени года;
- в большинстве алгоритмов пороги применимы только к определенной территории, использование их на другой территории приводит к заметному снижению достоверности.

Кроме того, следует отметить, что константные пороги приводят к появлению ошибок и первого, и второго рода, т.е. к пропускам и к ложным тревогам. Как правило, ошибки появляются на границе объектов разного типа и на тех участках поверхности, которые характеризуются значительным разбросом значений КСЯ и радиационных температур, например, вкрапления снега и льда в открытой почве. Наличие ошибок характерно для любого алгоритма построения масок снега и облачности, однако использование в алгоритме константных порогов усугубляет ситуацию.

Представленный в настоящей работе алгоритм построения масок снежного и облачного покровов, не зависящий от времени года и территории, предназначен прежде всего для обеспечения экспонометрических расчетов, выполняемых на комплексе планирования спутниковых съемок. Карты снежного покрова и карты облачности формируются по данным MCУ-MP/«Метеор-М» № 2, которые ежедневно принимаются и обрабатываются Оператором российских космических систем ДЗЗ.

Основные характеристики MCУ-MP/«Метеор-М» № 2 представлены в табл. 1. В этой же таблице приведены основные характеристики AVHRR зарубежного аналога MCУ-MP.

Исходными данными для алгоритма выделения облачного и снежного покровов послужили данные дневной съемки МСУ-МР/«Метеор-М» №2 территорий Канады, России и Европы, полученные с 2015 по 2018 гг. Всего в работе было использовано 459 фрагментов маршрутов съемки. Распределение маршрутов по сезонам года представлено в табл. 2.



Рис. 3. Схема покрытия данными МСУ-МР/«Метеор-М» № 2 территорий Восточной Сибири, Дальнего Востока России (слева) и Канады (справа)

| | Количество маршрутов | | | | | | |
|---------------|----------------------|---|-------------------------------|-------|--|--|--|
| Сезон года | Канада | Европа и европейская часть России | Сибирь и Дальний Восток | Всего | | | |
| Зима | 27 | 28 | 9 | 64 | | | |
| Весна | 43 | 32 | 29 | 104 | | | |
| Лето | 39 | 24 | 143 | 206 | | | |
| Осень | 30 | 46 | 9 | 85 | | | |
| Всего | 139 | 130 | 190 | 459 | | | |

Таблица 2. Распределение маршрутов по сезонам года и по регионам

Покрытие съемкой территории России на Дальнем Востоке и в Восточной Сибири, а также покрытие съемкой территории Канады представлены на рис. 3 в виде обзорных изображений, нанесенных на карту.

На этапе предварительной обработки выполнялась абсолютная калибровка данных MCУ-MP нормализованные цифровые отсчеты пересчитаны в физические величины: в значения КСЯ в трех коротковолновых каналах и в значения радиационных температур в трех длинноволновых каналах.

На первом этапе работы были отобраны 17 маршрутов съемки, на которых присутствовали все три вида поверхности: снег, облака, «земля» (в данном контексте под «землей» подразумеваются лес, песок и земля). Общая площадь всех тестовых маршрутов в выборке — более 130 млн км². На каждом из 17 тестовых маршрутов визуально определены и отмечены контурами участки, заведомо принадлежащие к каждому из трех типов поверхности. Общая площадь выборки по областям, относящимся к облакам, составила более 10 млн км², площадь выборки участков со снежным покровом — более 1 млн км², площадь выборки участков «земли» — более 500 тыс. км².

На рис. 4 приведен пример, иллюстрирующий результат этой работы: участки, закрытые облачностью, выделены контурами красного цвета, безоблачные заснеженные участки — контурами синего цвета, открытые участки поверхности — «земля» без снега и облаков — контурами зеленого цвета.

Данные измерений МСУ-МР на выделенных участках были использованы для анализа разделимости трех типов поверхности.

Учитывая то, что наиболее информативным признаком для распознавания снега является NDSI, сначала построены гистограммы распределения значений NDSI на выделенных участках. На рис. 5 линиями зеленых оттенков представлены гистограммы NDSI «земли», линиями красного и сиреневого цветов — гистограммы NDSI облаков, линиями синего и голубого цвета — гистограммы NDSI снега. Гистограммы на рис. 5 построены по данным съемки, выполненной в течение пяти дней в мае 2016 г. над территорией Канады.

Согласно взаимному положению гистограмм на рис. 5, пороговое значение NDSI = 0,4 (эту же величину индекса NDSI используют и авторы [7] при выделении снежного покрова по данным MODIS) позволяет надежно отделить участки,



Рис. 4. Выделение участков, относящихся к трем типам поверхности на изображениях, полученных в период с осени 2016 г. до весны 2017 г.



Рис. 5. Гистограммы распределения для маршрутов над территорией Канады

содержащие снег, от участков, содержащих облака и «землю». Однако никакое пороговое значение NDSI не обеспечивает надежного разделения облаков и «земли».

Следующий этап анализа состоял в построении скаттерограмм в пространстве двух признаков: NDSI и NDVI. На рис. 6 представлена скаттерограмма распределения значений NDSI–NDVI для того же самого набора данных, что и на рис. 5, полученных над территорией Канады.

Плотность распределения пар значений NDSI– NDVI представлена в цветовой палитре «радуга» (rainbow): красный цвет соответствует самой высокой частоте появления пар значений, желтый цвет — более низкой частоте, синий и черный цвет — самой низкой частоте появления. Скаттерограмма на рис. 6 позволяет сделать вывод о том, что в пространстве двух признаков — NDSI-NDVI есть возможность надежно отделить друг от друга участки, соответствующие снегу и участки, соответствующие «земле». Для этого достаточно определить переменный порог, который можно представить в виде функции y = x. График этой функции надежно отсекает снег от «земли», но делит практически пополам кластер значений, соответствующих облакам. Таким образом, в пространстве двух признаков — NDSI-NDVI даже переменный порог вида y = x не позволяет полностью решить задачу — надежно разделить снег, облачность, открытую поверхность.

Тем не менее более детальное исследование спектральных свойств объектов «земля», облака,



Рис. 6. Скаттерограмма распределения значений в пространстве признаков NDSI-NDVI для выделенных участков, соответствующих трем видам поверхности: облачность, снег, «земля» для пяти маршрутов съемки над территорией Канады

снег с использованием всех каналов МСУ-МР позволило определить возможность их разделения в пространстве двух признаков, а именно: КСЯ, % (альбедо) в канале 3 (SWIR-1, 1,7 мкм) и КСЯ, % в канале 1 (зеленый, 0,63 мкм). На рис. 7 представлена скаттерограмма распределения указанных значений КСЯ для выделенных ранее участков «земли», облачности, снега. Однако разделение обязательно должно выполняться с использованием переменных порогов, константные пороги не решат задачу. Заметим, что идея о возможности разделения классов таким способом возникает и при анализе скаттерограммы, представленной на рис. 2 [5].

Необходимо отметить, что некоторые значения КСЯ, % в канале 1 (0,63 мкм), соответствующие ярким объектам, превышают 100%. Это обусловлено неточностью калибровки каналов аппаратуры МСУ-МР/«Метеор-М» № 2, отмеченной в [12]. Этим же объясняется наличие значений NDSI, превышающих 1, на рис. 6. Однако следует иметь в виду, что неточность абсолютной калибровки не влияет ни на алгоритм, ни на результат — маску облачности и маску снежного покрова.

Здесь, как и на рис. 6, плотность распределения пар значений КСЯ в канале 1,7 мкм — КСЯ



Рис. 7. Скаттерограмма распределения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) в каналах 1 и 3 МСУ-МР/

в канале 0,63 мкм представлена в цветовой палитре «радуга» (rainbow, среда ENVI).

«Метеор-М» №2

Переменные пороговые значения показаны в виде функций вида y = f(x), где x представляет собой значения КСЯ, % в канале 1 МСУ-МР (0,6 мкм), а y представляет собой значения КСЯ, % в канале 3 МСУ-МР (1,7 мкм). Графики функций представлены на рис. 7 утолщенными линиями черного цвета. Выражения для функций вида y = f(x)также приведены на рис. 7. Две функции из трех удалось представить в виде линейных функций вида $y = a \cdot x + b$, третий переменный порог представлен в виде степенной функции вида $y = a \cdot (x + b)^c$.

Оценка параметров a, b и c переменных пороговых функций выполнялась с помощью операции выравнивания по минимуму среднеквадратической погрешности для набора точек, представляющего собой совокупность частных пороговых значений, разделяющих три вида поверхности. Частные пороговые значения определялись следующим образом. Все пространство скаттерограммы было разделено по оси x на участки шириной 5% в области низких значений КСЯ и 10% в области высоких значений КСЯ. Для каждого среза скаттерограммы шириной 5% или 10% выполнялось построение частных одномерных гистограмм.



Рис. 8. Срез гистограммы по каналу 1 (0,63 мкм) в пределах значений альбедо от 65% до 70%

В качестве примера на рис. 8 представлены частные гистограммы (земля, снег, облака) для среза скаттерограммы на участке значений КСЯ в канале 0,63 мкм от 65% до 70%.

Середины участков, на которые был разделен весь диапазон возможных значений КСЯ в канале 0,6 мкм по оси x скаттерограммы, представленной на рис. 7, соответствуют координатам x точек, вошедших в набор частных пороговых значений. Координаты y точек в наборе пороговых значений были определены как значения КСЯ в канале 1,7 мкм, для которых имеет место пересечение частных гистограмм. Например, согласно рис. 8, для участка значений КСЯ в канале 0,63 мкм от 65% до 70% частное пороговое значение, разделяющее снег и облака, имеет следующие координаты: x = 67,5%, y = 22,8%.

В процессе отработки алгоритма были обнаружены типы подстилающих поверхностей, для которых необходимо применение дополнительных условий. К таким объектам относится, например, «земля» с маломощным снежным покровом, что встречается, в частности, в конце осени. На такой поверхности снег ошибочно определяется относящимся к классу облака. Дополнительное условие, позволяющее исправить ошибку, состоит в анализе значений разности радиационных температур в четвертом и пятом каналах MCУ-MP: к облакам уверенно относятся объекты с разностью, превышающей 3К (рис. 9).

Алгоритм с переменными порогами и с дополнительной проверкой для ранней зимы, сформиро-



Рис. 9. Спектральные образы объектов, относящихся к облачности и к снегу: разность радиационных температур в каналах 4 и 5 у облачных объектов превышает ЗК

ванный по данным 17 съемок различных территорий, протестирован на данных съемки Восточной Сибири, Дальнего Востока, европейской территории России, а также на маршрутах съемки Канады.

Тестирование подтвердило работоспособность алгоритма. Самыми важными положительными результатами являются: 1) независимость переменных порогов от времени года и 2) независимость от региона, в котором выполнена съемка.



Рис. 10. Дальний Восток, 18 мая 2016 г., маска снежного покрова

МСУ-МР, композит каналов 3-2-1

МСУ-МР, композит каналов 3-2-1 с маской облаков



Рис. 11. Европейская часть территории России, 27 февраля 2017 г., маска облачности

В качестве примера на рис. 10–11 представлены результаты работы алгоритма для двух маршрутов съемки МСУ-МР: на рис. 10 — Дальний Восток весной 2016 г., маска снежного покрова, на рис. 11 — европейская часть территории России зимой 2017 г., маска облачности.

Отметим, что выбранные пороговые значения зависят от конкретной абсолютной калибровки аппаратуры. Для сохранения корректности результата со временем или в случае запуска нового КА необходимо либо пересчитывать коэффициенты пороговых функций, либо проводить работы по обеспечению постоянства абсолютной радиометрической калибровки МСУ-МР. Последнее, впрочем, справедливо для любого продукта обработки данных ДЗЗ.

Следует также отметить, что разработанный алгоритм построения масок снега и облаков не обеспечивает пиксельной точности, соответствующей разрешению изображений MCУ-MP — 1000 м. Связано это не со свойством предлагаемого алгоритма, а с общей проблемой классификации типов поверхности: в переходных зонах — на границе, разделяющей на изображении объекты разного типа, вероятность правильного обнаружения объектов одного типа уменьшается. Это обусловлено одновременным присутствием в пикселях этой зоны сигналов, поступающих от объектов обоих типов. Однако необходимо иметь в виду, что маска снега и облаков, построенная с помощью предлагаемого алгоритма, предназначена для использования в составе информационной базы комплекса планирования, в которой данные представлены в глобальном масштабе (разрешение хуже 1 км). Следовательно, предлагаемый алгоритм обеспечивает формирование маски снега и облаков, вполне пригодное для задач планирования (и обработки) спутниковой съемки. Вероятность обнаружения площадных объектов близится к 95-100%.

Выводы

Предложен алгоритм, предназначенный для формирования масок снежного покрова и облачности по данным МСУ-МР/«Метеор-М», используемых в составе комплекса планирования целевого применения российской орбитальной группировки КА ДЗЗ и обработки полученных данных. В алгоритме применяются значения коэффициента спектральной яркости в каналах 1 (зеленый, 0,63 мкм) и 3 (SWIR-1, 1,6 мкм) МСУ-МР. Существенным отличием алгоритма от аналогов является отступление от практики использования константных порогов. Анализ, проведенный на обширной тестовой выборке исходных данных, показал, что переменные пороги, определенные в настоящем исследовании, не зависят от времени года и географического положения территории съемки.

Учитывая непрерывный характер съемки МСУ-МР, разработанный алгоритм может обеспечивать обновляемые с периодичностью 2–3 дня карты снежного покрова и облачности в автоматическом режиме.

В дальнейшем планируется внедрение предложенного алгоритма в части формирования маски снега непосредственно в технологический комплекс планирования съемки; кроме того, маска облачности может использоваться в автоматизации процесса поиска безоблачных маршрутов в архивах данных ДЗЗ в соответствии с заявками потребителей.

Список литературы

- Горбунов А.В., Ильина И.Ю., Саульский В.К. Состояние и перспективы развития космических комплексов «Канопус-В» и «Метеор-М» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2015, т. 2, вып. 4. С. 14–19.
- Larry L. Stowe, Herbert Jacobowitz, George Ohring, Kenneth R. Knapp, and Nicholas R. Nalli. The Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) Pathfinder Atmosphere (PATMOS) Climate Dataset: Initial Analyses and Evaluations // Journal of Climate, June 2002, vol. 15, No 11. P. 1243–1260.
- Портал дистанционного зондирования https://worldview.earthdata.nasa.gov/ (Дата обращения 23.09.2018).
- Romanov P., Gutman G., Csisar I. Automated monitoring of snow cover over North America with multispectral satellite data // J. Appl. Meteorol., 2000, vol. 39. P. 1866–1880.
- Musial J. P., Hüsler F. Probabilistic approach to cloud and snow detection on Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) imagery // Atmos. Meas. Tech., 2014, vol. 7. P. 799–822.
- Karem Chokmani, Monique Bernier and Alain Royer. A Merging Algorithm for Regional Snow Mapping over Eastern Canada from AVHRR and SSM/I Data // Remote Sens., 2013, vol. 5. P. 5463–5487.
- 7. Dorothy K. Hall, Jonathan S. Barton. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms. http://modissnow-ice.gsfc.nasa.gov (Дата обращения 04.04.2018).

- Boschetti M., Nutini F., Manfron G., Brivio P.A., Nelson A. Comparative Analysis of Normalised Difference Spectral Indices Derived from MODIS for Detecting Surface Water in Flooded Rice Cropping Systems // PLoS ONE, 2014, vol. 9, Iss. 2. P. 4. https://www.researchgate.net/publication/260447511_ Comparative_Analysis_of_Normalised_Difference_ Spectral_Indices_Derived_from_MODIS_for_Detecting_ Surface_Water_in_Flooded_Rice_Cropping_Systems (Дата обращения 05.06.2019).
- Gandhia G.M., Parthibanb S., Thummaluc N., Christyd A. NDVI: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing and Gis — A Case Study of Vellore District // Procedia Computer Science, 2015, vol. 57. P. 1199–1210.

- Xiong X., Barnes W. An overview of MODIS radiometric calibration and characterization // Atmospheric Environment, 2003, vol. 37, Iss. 17. P. 2403– 2412.
- Ignatov A., Sapper J., Cox S., Laszlo I., Nalli N.R. and Kidwell K.B. Operational Aerosol Observations (AEROBS) from AVHRR/3 On Board NOAA-KLM Satellites // Journal of atmosphere and Oceanic Technology, 2004, vol. 21, No. 1. P. 3–26.
- 12. Филей А.А., Рублев А.Н., Киселева Ю.В. Оценка стабильности радиометрической калибровки коротковолновых каналов многоканального спутникового устройства КА «Метеор-М» №2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2018, т. 15, №4. С. 71–77.