

Технология автоматической коррекции географической привязки данных прибора МСУ-МР КА «Метеор-М»

Е. Е. Волкова¹, А. И. Андреев², М. А. Бурцев¹,
А. А. Мазуров¹, А. М. Матвеев¹, Е. И. Холодов²

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: volkova@d902.iki.rssi.ru*

² *Дальневосточный центр НИЦ «Планета», Хабаровск, 680000, Россия
E-mail: a.andreev@dvrspod.ru*

Рассматривается применение корреляционных методов для повышения точности географической привязки данных многозонального сканирующего устройства малого разрешения (МСУ-МР), устанавливаемого на отечественных космических аппаратах серии «Метеор-М». Проводится анализ ключевых препятствий, мешающих автоматическому построению стабильных базовых продуктов на основе данных приборов МСУ-МР с помощью используемых в российских центрах приёма «штатных» процедур потоковой привязки. Рассматриваются возможные методы и подходы к коррекции географической привязки. Описывается разработанная автоматическая двухступенчатая схема привязки, реализованная на базе автоматического поиска контрольных точек и вычисления их смещений с помощью расчёта фазовой корреляции между привязываемым и опорными снимками. Схема включает в себя выявление контрольных точек по опорным данным, последующее восстановление параметров ориентации космического аппарата, переобработку данных с найденными параметрами и автоматическую оценку качества полученной привязки. Также приводится описание разработанного программного решения и особенности его реализации. Представлены результаты оценки точности автоматической привязки данных прибора МСУ-МР КА «Метеор-М» № 2-2 и № 2-3, полученной на основе предложенного решения, которая для примерно 70 % данных не превышает одного пикселя.

Ключевые слова: географическая привязка спутниковых данных, потоковая обработка спутниковых данных, приборы МСУ-МР, спутники «Метеор-М», AROSICS, фазовая корреляция

Одобрена к печати: 28.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-48-63

Введение

Данные космических широкозахватных радиометров видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов являются одним из основных источников регулярной информации для решения задач гидрометеорологии, оценки состояния различных экосистем, детектирования и мониторинга чрезвычайных ситуаций, в том числе природных пожаров. Многозональное сканирующее устройство малого разрешения — МСУ-МР, устанавливаемое на отечественных космических аппаратах (КА) серии «Метеор-М», относится именно к этому классу устройств. Оно позволяет осуществлять регулярную съёмку земной поверхности с полосой обзора в 3000 км, пространственным разрешением в 1 км в шести узких каналах в спектральном диапазоне от 0,5 до 12,5 мкм (Акимов и др., 2015; Асмус и др., 2014). Данные, получаемые приборами этой серии, также активно используются для решения задач дистанционного мониторинга природных и антропогенных явлений (см., например, (Волкова, 2017; Зубкова и др., 2019; Лозин и др., 2024; Филей, 2020)).

Следует отметить, что при решении большинства задач мониторинга, для которых сегодня применяются измерения приборов рассматриваемого класса, необходимо построение информационных продуктов, имеющих качественную (пиксельную или субпиксельную) географическую привязку, в полностью автоматическом режиме. Например, в задачах длительного мониторинга территорий, требующих построения и анализа временных рядов наблюдений, просто не могут использоваться данные, не имеющие географической привязки

подобного уровня (см. например, (Кашницкий и др., 2022; Плотников и др., 2021)). К сожалению, в силу особенностей функционирования КА серии «Метеор-М» достичь требуемого качества геопривязки в автоматическом режиме только на основе информации о положении спутника не всегда удаётся. В силу этого на основе алгоритмов привязки данного класса становится почти невозможным автоматическое потоковое создание информационных продуктов, обладающих требуемым уровнем точности географической привязки, которые позволяли бы решать задачи детектирования пожаров, построения временных рядов данных и т. п.

Цель настоящей работы — разработка и реализация технологии для потокового уточнения географической привязки данных прибора МСУ-МР до субпиксельной. Для этого в работе анализируются особенности стандартных процедур географической привязки данных МСУ-МР, которые на текущий момент в основном используются в российских центрах приёма спутниковых данных (Кузнецов, Соловьёв, 2014), а также возможности повышения качества привязки таких данных, в том числе с применением методов уточнения ориентации КА. Представлена разработанная авторами схема допривязки с автоматическим контролем её качества. Описана реализованная на базе разработанного алгоритма автоматическая технология и приведены оценки качества привязки информационных продуктов, получаемых в результате её работы.

Анализ качества привязки стандартных продуктов МСУ-МР

В настоящее время автоматическая первичная обработка данных приборов серии МСУ-МР в большинстве российских центров приёма осуществляется на базе программного комплекса, разработанного Научно-исследовательским институтом обработки аэрокосмических изображений (НИИ «Фотон») Рязанского государственного радиотехнического университета им. В. Ф. Уткина (РГРТУ) (Кузнецов, Соловьёв, 2014). Этот программный комплекс обеспечивает обработку данных, получаемых с различных КА серии «Метеор-М», до стандартных продуктов уровня L1B, включая их географическую привязку. Настоящая работа опирается на использование именно этих продуктов.

Для оценки качества географической привязки стандартных продуктов было сформировано два набора дневных поканальных изображений МСУ-МР, полученных с КА «Метеор-М» № 2-2 за август 2022 г. и с КА «Метеор-М» № 2-3 за май 2024 г. Оба набора данных были переведены в географическую проекцию EPSG:4326 (*англ.* European Petroleum Survey Group) и сопоставлены с эталонными данными безоблачных ежемесячных композитных изображений, построенных по наблюдениям спектрорадиометра MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), установленного на спутниках Terra и Aqua, за те же месяцы. Технология построения таких композитов подробно описана в работе (Барталев и др., 2016). Отметим, что исходные данные для их построения и результирующие композиты обладают субпиксельной привязкой. Оценка качества привязки снимков осуществлялась сопоставлением координат наборов контрольных точек, автоматически полученных на проверяемых и опорных изображениях с помощью алгоритма AROSICS (*англ.* Automated and Robust Open-Source Image Co-registration Software) (Scheffler et al., 2017), более подробное описание которого приведено в разд. «Организация автоматического поиска контрольных точек» настоящей работы. Для данных КА «Метеор-М» № 2-2 среднее стандартное отклонение ошибки привязки составило ~2,9 км, для данных КА «Метеор-М» № 2-3 — ~1,3 км.

Результаты анализа тестовых выборок показали, что из рассмотренных 95 сцен КА «Метеор-М» № 2-2 привязка требуемого качества, т. е. субпиксельная, есть только у 26 сцен, т. е. менее чем у 30 % рассмотренных данных, среднее же значение невязки составляет 1,5–2,0 пикселя. Кроме того, около 10 % данных имеет ошибку привязки более 5 пикселей, что неприемлемо для дальнейшего использования таких данных в задачах дистанционного мониторинга без предварительного уточнения географической привязки.

Для данных КА «Метеор-М» № 2-3 привязка пиксельного или субпиксельного качества наблюдается только у 6 сцен, т. е. менее чем у 10 % из 101 рассмотренной сцены. Средние же значения невязки колеблются в районе 5–6 пикселей.

Возможности повышения точности автоматизированной привязки данных МСУ-МР

Географическая привязка данных, как правило, осуществляется с помощью моделирования процесса съёмки и движения спутника. Нестабильность ориентации КА может приводить к недостаточной точности определения входных параметров (например, таких как углы ориентации) для применения модели сенсора. Навигационные проблемы вносят ошибки в моделирование процесса съёмки, а значит, достичь субпиксельной привязки, пользуясь исключительно подобными моделями, затруднительно. В том случае, когда применение модели сенсора по тем или иным причинам становится невозможным, определение или уточнение географической привязки может, в том числе, осуществляться сопоставлением целевых данных с так называемыми опорными данными, которые имеют гарантированно качественную и стабильную привязку.

Задача улучшения географической привязки для спутников «Метеор-М» № 1 и № 2 решалась ранее в работах (например, (Катаманов, 2014; Катаманов, Качур, 2018)). Подход авторов состоит в восстановлении параметров ориентации аппарата из «реперных» (контрольных) точек с последующим прогнозированием модели для тех снимков, где нашлось недостаточное количество контрольных точек. В указанных работах поиск контрольных точек подразумевает наличие открытой границы «суша – вода», что ограничивает круг снимков, которые могут быть допривязаны с помощью указанного подхода.

В настоящем исследовании предложена сходная с представленной выше, но расширенная схема уточнения привязки данных МСУ-МР (рис. 1), которая состоит из следующих основных этапов:

- подбора опорных данных для уточнения привязки;
- выявления контрольных точек на парах изображений;
- восстановления углов ориентации на основе найденных контрольных точек (уточнения параметров модели сенсора);
- применения модели сенсора, полученной на базе восстановленных параметров КА, для географической привязки данных уровня обработки L1B;
- автоматического контроля качества уточнённой привязки.

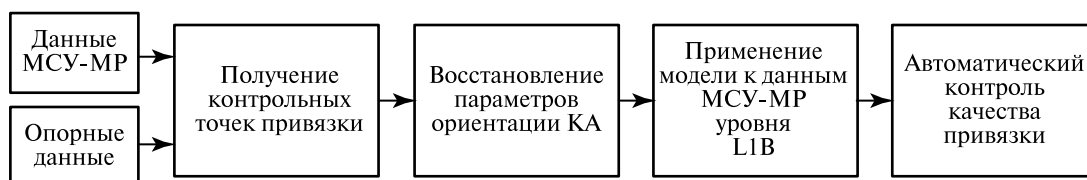


Рис. 1. Предлагаемая схема геопривязки данных прибора МСУ-МР

Следует отметить, что выбор схемы, которая не фокусируется на организации преобразования изображений, обеспечивающего их гладкую трансформацию и максимальное соответствие выбранным контрольным точкам, а направлена на уточнение параметров системы наблюдения на основе данных о привязке контрольных точек, связан со следующими основными моментами:

- для осуществления гладкой трансформации изображений, обеспечивающей хорошую точность географической привязки всех элементов снимка, обычно требуется значительное число контрольных точек, равномерно распределённых по изображению. В то же время восстановление параметров системы наблюдения может быть проведено с помощью информации, полученной по достаточно ограниченному числу контрольных точек;
- перепроецирование изображений неизбежно приводит к потере части информации при преобразовании данных, вызванной интерполяцией пикселей при их смещении.

Именно для исключения подобных искажений было решено восстанавливать входные параметры для модели сенсора и с помощью неё привязывать исходные данные МСУ-МР.

Для модели сенсора необходимыми входными параметрами представляются углы ориентации аппарата, параметры орбиты и характеристики съёмочной системы. Задача по их восстановлению решается исходя из предположения, что точность значений параметров орбиты КА «Метеор-М», вычисляемых на основе актуальных TLE (*англ.* two-line element set) — свободно распространяемых двухстрочных массивов данных, включающих в себя элементы орбиты из модели SGP4 (*англ.* Simplified General Perturbations 4) (Vallado, Cefola, 2012), и стабильность известных характеристик прибора МСУ-МР обеспечивают расчёт координат аппарата с точностью, достаточной для проведения субпиксельной привязки данных прибора МСУ-МР. В данном приближении восстановление углов ориентации проводится путём минимизации суммарной ошибки определения положения полученных ранее контрольных точек следующим образом. После нахождения уточнённых координат контрольных точек на изображении строится набор пар найденных точек с исходными (ошибочными) координатами и уточнёнными координатами. Для каждой точки координаты переводятся из географических координат проекции EPSG:4326 в декартовы координаты в системе WGS84 (*англ.* World Geodetic System 1984). Для этого набора вычисляется функционал R как сумма расстояний между точками с исходными и уточнёнными координатами по формуле:

$$R = \sum_{i=1}^N r_i(\mathbf{d}, \mathbf{d}'),$$

где N — размерность полученного набора точек; r_i — расстояние между парой точек для i -го элемента набора точек (в км); \mathbf{d} и \mathbf{d}' — векторы координат (x, y, z) для исходной и уточнённой точек соответственно.

Ориентация КА описывается матрицей вращения, определяемой на основе углов ориентации КА на заданный момент времени. Стартовые значения всех углов ориентации принимаются равными нулю. После определения матрицы вращения КА, получения набора точек и расчёта функционала R проводится его численная вариация по трём переменным — углам ориентации с шагом, эквивалентным 0,1 пространственного разрешения прибора на поверхности Земли — и вычисляется его минимум методом градиентного спуска. В случае если точность найденного минимума неудовлетворительна, т.е. результирующая средняя ошибка более одного элемента разрешения, сцена отбраковывается. Необходимо отметить, что подобные подходы к восстановлению ориентации КА распространены достаточно широко и описаны, например, в работах (Baldwin, Emery, 1995; Iwasaki, 2011).

Найденные уточнённые параметры ориентации КА подаются на вход в модель сенсора, после чего специализированным программным обеспечением разработки Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) осуществляется привязка данных МСУ-МР уровня обработки L1B.

Стоит подчеркнуть, что в используемом подходе точность допривязки в значительной степени зависит от корректности определения контрольных точек и их смещений. Именно поэтому данному вопросу в настоящей работе было уделено особое внимание.

Организация автоматического поиска контрольных точек

Несмотря на то, что задача уточнения привязки спутниковых данных посредством методов поиска контрольных точек на опорных снимках достаточно традиционна (см. например, (Van Wie, Stein, 1977; Lim et al., 2004)), она, как правило, чаще решается применительно к данным видимого диапазона и высокого разрешения, съёмка которых производится достаточно локально. В отличие от таких данных, снимки прибора МСУ-МР имеют большую полосу захвата (3000 км) и ИК-каналы съёмки. Поэтому для обеспечения необходимого

качества их допривязки требуется наличие опорных данных, охватывающих достаточно большие территории, чтобы гарантировать полное покрытие всей площади снимков МСУ-МР. Кроме того, необходимо иметь опорные данные не только в видимом диапазоне, но и в инфракрасном, что особенно важно для уточнения привязки ночных данных. В связи с этим методы подбора контрольных точек и определения их смещения должны быть адаптированы для работы с данными как в видимом диапазоне, так и в инфракрасном.

Методы поиска контрольных точек и особенности их использования для работы с данными МСУ-МР

Существует множество методов поиска контрольных точек для совмещения пары изображений. Наиболее распространены два основных их типа — основанные на извлечении уникальных признаков из изображений, таких как углы и границы, и основанные на поиске паттернов в распределении пикселей совмещаемых снимков (Zitova, Flusser, 2003).

К первому типу относятся такие алгоритмы, как SIFT (*англ.* Scale-Invariant Feature Transform) (Lowe, 2004), SURF (*англ.* Speeded Up Robust Features), ORB (*англ.* Oriented FAST and Rotated BRIEF), FREAK (*англ.* Fast Retina Keypoint), KAZE и др. Данные алгоритмы работают следующим образом. На первом этапе на каждом из двух совмещаемых снимков детектируются ключевые (контрольные) точки — особые пиксели, которые заметно отличаются от своих соседей. После их обнаружения для каждой ключевой точки создаётся дескриптор, т. е. вектор, представляющий собой набор уникальных признаков, описывающих локальные характеристики окрестности ключевой точки. После этого проводится сопоставление пар точек и их дескрипторов на двух совмещаемых снимках.

Методы второго типа, также известные как корреляционные (или корреляционно-подобные), в отличие от методов первого типа, работают, как правило, с заранее определёнными участками совмещаемых изображений фиксированного размера — окнами, что позволяет учитывать информацию обо всей области, а не только о выделенных ключевых точках. Такие методы разбивают совмещаемые снимки на окна и затем сопоставляют соответствующие окна для определения смещения между изображениями. Сопоставление окон может осуществляться на основе кросс-корреляции, фазовой корреляции, методов взаимной информации и др. В результате каждому окну первого снимка присваивается соответствующее ему смещение относительно окна второго снимка.

Выбор методов для поиска контрольных точек зависит от конкретных условий задачи, в том числе от ожидаемых исходных ошибок и требований к точности. В данной работе используются методы второго типа. Это решение обусловлено тем, что ошибка привязки снимков, полученных с помощью прибора МСУ-МР, обычно не превышает 10–15 пикселей, а методы, основанные на области, вычислительно эффективны для задач, когда смещения невелики. Однако стоит отметить, что для устранения больших исходных смещений такие методы требуют значительных вычислительных ресурсов, что существенно снижает их производительность.

Для совмещения проецированных снимков (МСУ-МР и опорного) был использован программный пакет AROSICS (Scheffler et al., 2017), в основе работы которого лежит фазовая корреляция (обзор методов допривязки изображений с использованием фазовой корреляции приведён, например, в работе (Brown, 1992)). AROSICS представляет собой библиотеку с открытым исходным кодом на языке программирования Python, предназначенную для автоматического совмещения спутниковых снимков с субпиксельной точностью.

Алгоритм имеет два режима работы:

1. *Глобальный.* Находит одно общее смещение для снимка и применяет этот вектор сдвига ко всему изображению. Такой подход требует меньше вычислительных ресурсов, но может работать некорректно, если выбранное окно содержит области, имеющие принципиально другую структуру по сравнению с опорным изображением: облака, шумы или другие локальные искажения, а также в случае нелинейных смещений снимка.

2. *Локальный.* Разбивает снимки на регулярную сетку окон и для каждого окна привязываемого снимка находит сдвиг относительно соответствующего ему окна опорного снимка. В результате каждому окну ставится в соответствие контрольная точка и соответствующий ей сдвиг.

Для привязки снимков МСУ-МР был выбран локальный режим работы программного пакета, так как на снимках могут присутствовать как облачность, так и нелинейные искажения. Кроме того, для восстановления параметров ориентации прибора необходимо получение значительного числа опорных точек.

Выбор опорных данных для автоматического поиска контрольных точек

Для получения качественных результатов допривязки крайне важным является вопрос выбора опорного снимка, по которому будет осуществляться поиск контрольных точек. Такое изображение должно соответствовать большому количеству критериев по качеству, пространственному покрытию, спектральному и временному разрешениям и т.п. Вопросы выбора такого покрытия для разных сценариев допривязки данных прибора МСУ-МР рассмотрены ниже.

Требования к опорным данным для уточнения привязки данных МСУ-МР

Выбор опорных данных для поиска контрольных точек определяет качество полученной привязки. Для опоры важны следующие критерии:

- 1) качественная субпиксельная географическая привязка;
- 2) соответствие спектральному диапазону привязываемого снимка;
- 3) сопоставимое пространственное разрешение; в оптимальном случае более высокое. В то же время необходимо отметить, что в ряде случаев возможно и использование опоры более низкого пространственного разрешения (Плотников и др., 2022);
- 4) сопоставимые условия, при которых были получены привязываемый и опорный снимки (например, одинаковый сезон съёмки);
- 5) полное или значительное перекрытие территории привязываемого снимка;
- 6) отсутствие или незначительное количество облачности, шумов и локальных искажений.

Указанные критерии должны выполняться как для дневных наблюдений, где можно осуществлять привязку данных, полученных в видимом диапазоне, так и для ночных наблюдений, при которых съёмка проводится исключительно в ИК-диапазоне. Подбор опорных данных для дневных и ночных снимков имеет свои особенности, которые будут рассмотрены далее.

Выбор опоры для привязки дневных данных

Существует множество данных, которые соответствуют первым четырём требованиям, описанным в предыдущем разделе. К ним относятся данные, полученные с помощью таких приборов, как MODIS, VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), OLI (*англ.* Operational Land Imager) и MSI (*англ.* Multi-Spectral Instrument). Однако использование отдельных снимков этих приборов для привязки сеансов МСУ-МР не представляется возможным, так как единичные снимки не отвечают оставшимся требованиям для опорных данных. В первую очередь, снимки указанных приборов имеют недостаточное пересечение по территории с привязываемым сеансом (МСУ-МР) из-за различий в полосе захвата (OLI,

MSI) и в траектории съёмки (MODIS, VIIRS). Кроме того, минимизировать облачность, шумы на единичных снимках — при этом максимизировав открытую территорию — достаточно сложно.

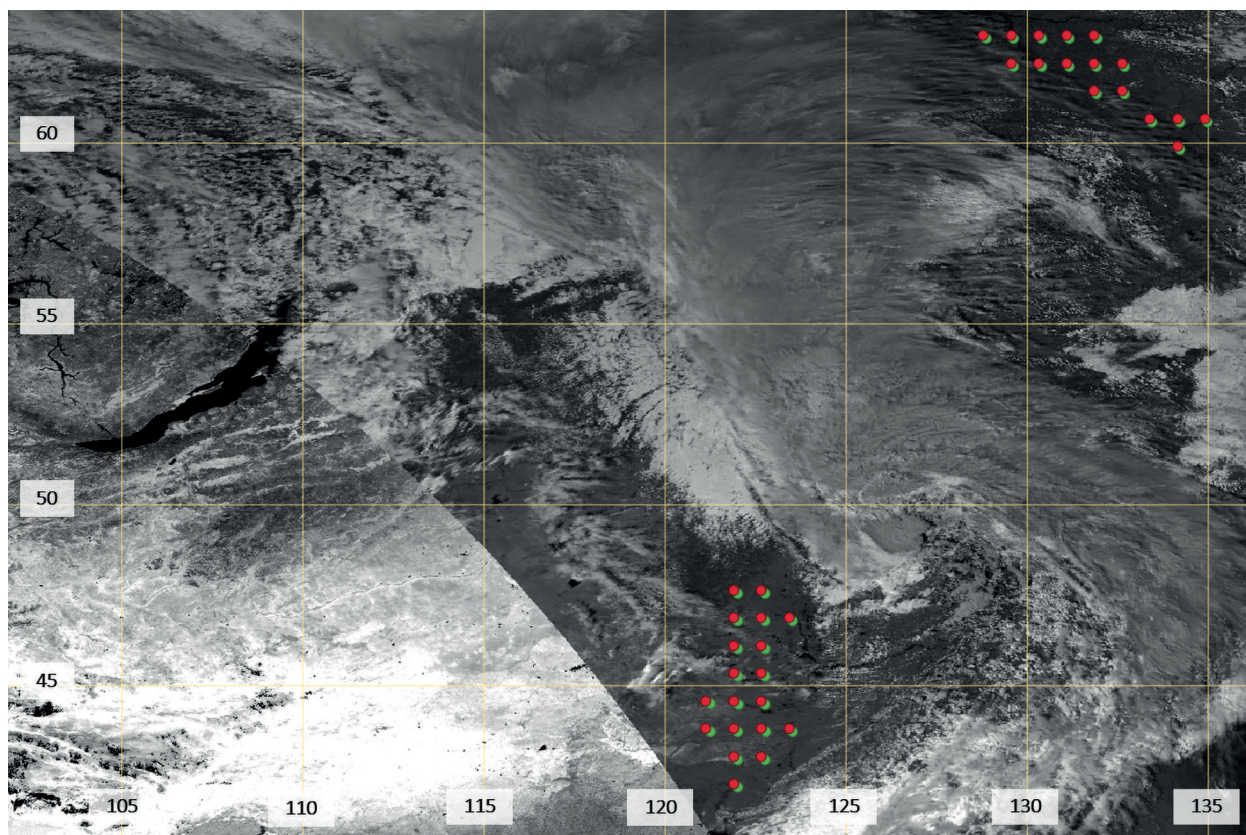


Рис. 2. Фрагмент снимка МСУ-МР и опорного SWIR-композиата MODIS с найденной сеткой контрольных точек. Зелёным цветом показаны точки, обнаруженные на опоре, красным — на привязываемом снимке МСУ-МР

Проблемы недостаточного перекрытия данных по территории и наличия облачности позволяет решить использование безоблачных композитных изображений. В ИКИ РАН разработана технология построения таких изображений (Барталев и др., 2016). Безоблачные композиты MSI (Sentinel-2), OLI (Landsat-8/9), MODIS (Aqua, Terra) удовлетворяют всем критериям подходящих опорных данных. Для дневных снимков МСУ-МР в качестве опорных данных были выбраны ежемесячные композитные изображения прибора MODIS в SWIR-диапазоне (*англ.* Short Wave InfraRed, коротковолновый инфракрасный) (~1,6 мкм). Такая опора имеет стабильную качественную субпиксельную географическую привязку и пространственное разрешение лучше, чем у привязываемых данных (250 м против 1 км), а также очищена от облачности, что уменьшает число ложных срабатываний алгоритма корреляционной привязки. Кроме того, ежемесячный композит имеет значительно меньше пропусков в данных по сравнению с еженедельным и вместе с тем, в отличие от ежегодного, удовлетворяет четвертому требованию. Выбор композита SWIR-диапазона обусловлен более стабильной и качественной работой корреляционного алгоритма с такими данными по сравнению с NIR-композиатом (*англ.* Near-InfraRed, ближний инфракрасный). Композиты MSI и OLI имеют существенно лучшее пространственное разрешение (10 и 30 м соответственно), что в условиях нашей задачи избыточно. Пример использования SWIR-композиата MODIS для допривязки с выведенной картой найденных точек и смещений приведён на рис. 2.

Выбор опоры для привязки ночных данных

Ночная съёмка МСУ-МР производится только в трёх спектральных диапазонах: MWIR (*англ.* Mid-Wave InfraRed, средневолновый инфракрасный) (3,5–4,1 мкм) и двух TIR (*англ.* Thermal InfraRed, тепловой инфракрасный) (10,5–11,1 мкм и 11,5–12,5 мкм). Опорные данные необходимо искать для подобных каналов, так как для привязки важно соответствие спектральных диапазонов опоры и привязываемого снимка. Существуют способы яркостных преобразований изображений, которые могут помочь при допривязке снимков разных спектральных диапазонов (например, в работе (Schott, 1989)). Эксперименты показывают, что подобный подход становится ограниченно возможным для привязки MWIR-канала МСУ-МР к SWIR-композиту MODIS, однако стабильного качества работы процедур поиска контрольных точек и автоматического контроля качества привязки такими преобразованиями достичь не удалось.

К сожалению, в настоящее время отсутствуют технологии, позволяющие создавать качественные безоблачные композиты для каналов MWIR и TIR. Также стоит отметить, что традиционный автоматический метод поиска расхождений между изображениями с использованием береговых линий для ИК-данных работает нестабильно. В этой связи фактически единственным вариантом остаётся выбор опорных данных среди снимков приборов, обладающих ИК-каналом с хорошей привязкой и близким спектральным диапазоном к одному из ИК-каналов МСУ-МР. Такие приборы доступны как на геостационарных, так и на низкоорбитальных КА.

Основное преимущество использования данных, поступающих с геостационарных спутников, заключается в том, что они осуществляют съёмку в каналах диапазонов MWIR и TIR, спектральные характеристики которых близки к каналам, используемым в приборах МСУ-МР. К таким спутникам, данные которых охватывают территорию России, относятся спутники серий Himawari (Bessho et al., 2016), Meteosat (Schumann et al., 2002) и «Электро-Л» (Асмус и др., 2012). Достаточно высокая точность географической привязки данных этих спутников достигается благодаря стабильным параметрам съёмки (включая положение спутника относительно Земли, полосу захвата и другие факторы) и, как следствие, возможности формирования и использования модели работы установленных на этих аппаратах наблюдательных систем.

В то же время ключевым недостатком информации, поступающей с геостационарных систем, при использовании её в качестве опоры для привязки данных МСУ-МР является пространственное разрешение, которое составляет 2 км для снимков АНИ (*англ.* Advanced Himawari Imager, КА Himawari-8/9), 3 км для SEVIRI (*англ.* Spinning Enhanced Visible Infra-Red Imager, КА MSG (*англ.* Meteosat Second Generation)) и 4 км для МСУ-ГС (многозональное сканирующее устройство геостационарное, КА «Электро-Л»), что значительно ниже разрешения МСУ-МР. Тем не менее во многих случаях на снимках МСУ-МР удаётся найти значительное количество контрольных точек, которые сопоставляются с точками на выбранном для опоры изображении, полученном с геостационарного спутника. Как показывает практика, даже если смещения в разных точках имеют ошибки, превышающие размер пикселя МСУ-МР, за счёт минимизации интегральных отклонений во всех выбранных точках при подборе параметров модели съёмки возможно уточнить модель до уровня, необходимого для пиксельной или субпиксельной привязки данных МСУ-МР.

Такая ситуация наиболее часто наблюдается для снимков МСУ-МР, которые территориально попадают в зону видимости прибора АНИ (Himawari-8/9). Проведённые эксперименты показали, что оптимальным является выбор в качестве опоры пары снимков АНИ в ИК-канале (~3,6 мкм) с временной разницей в 1 ч: за 24 и 25 ч до привязываемого снимка. При этом для повышения качества выборки опорных данных и исключения ложных низкокачественных оценок смещения в ключевых точках используется пересечение множеств контрольных точек на этих двух снимках для построения модели наблюдений. Пример опорного изображения прибора АНИ в MWIR-диапазоне с нанесёнными контрольными точками и смещениями приведён на *рис. 3* (см. с. 56).

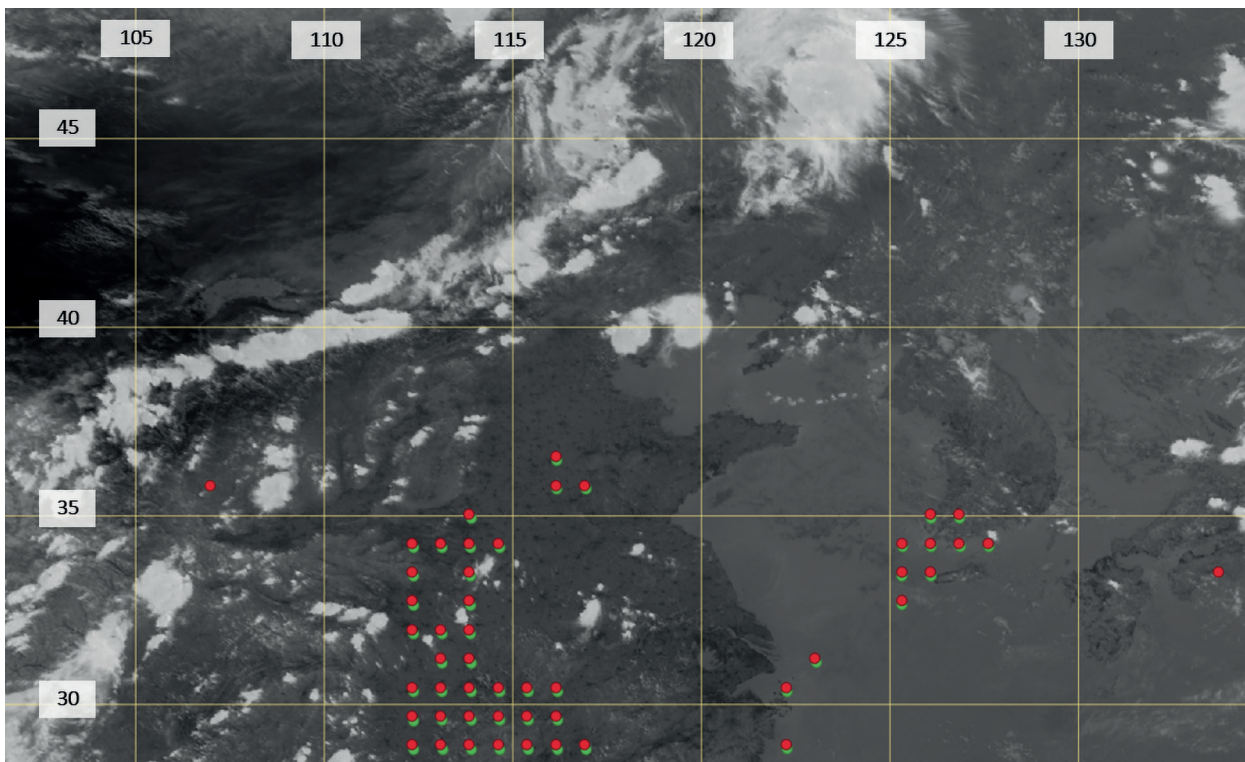


Рис. 3. Фрагмент опорного MWIR-снимка АНІ с найденной сеткой контрольных точек. Зелёным цветом показаны точки, обнаруженные на опоре, красным — на привязываемом снимке МСУ-МР

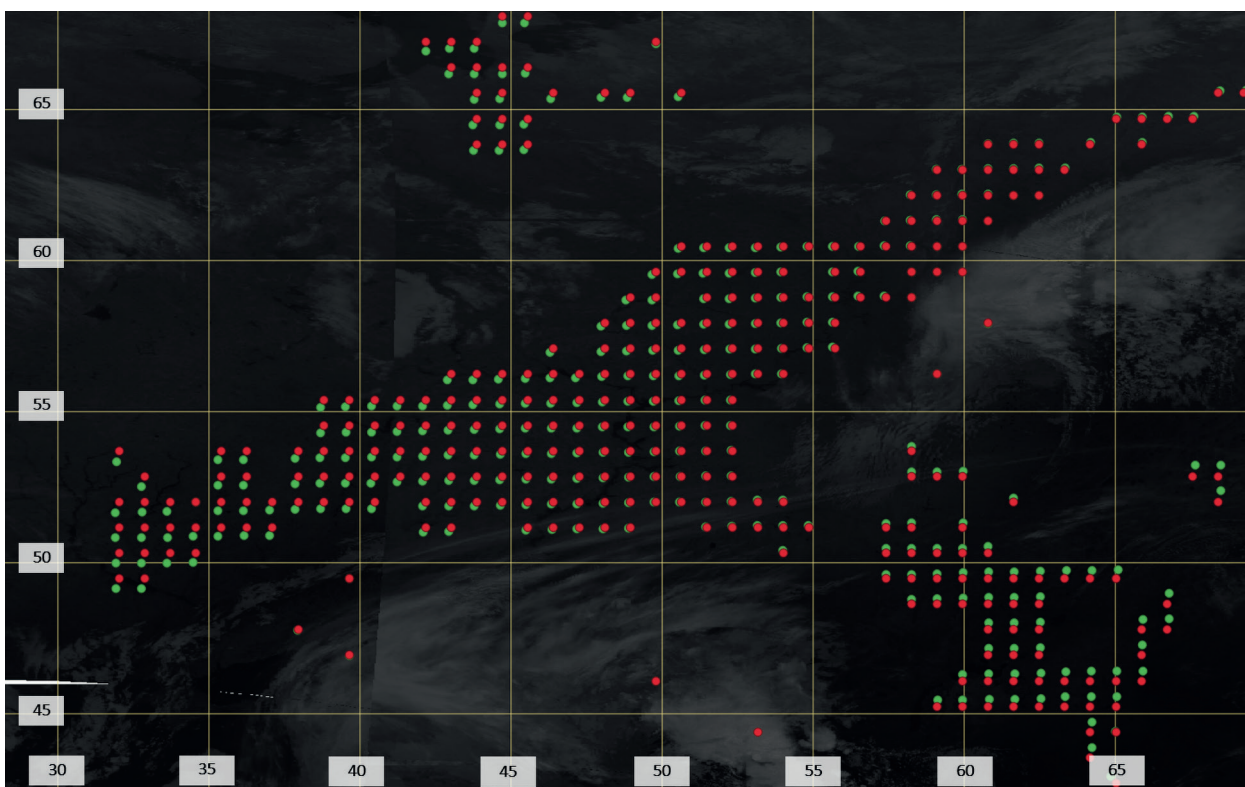


Рис. 4. Фрагмент опорной мозаики MODIS с найденной сеткой контрольных точек. Зелёным цветом показаны точки, обнаруженные на опоре, красным — на привязываемом снимке МСУ-МР

Однако следует отметить, что область видимости КА Himawari-8/9 находится между 80 и -160° по долготе и -60 и 60° по широте, поэтому для привязки снимков, не входящих в указанный диапазон, требуются опорные данные с другим покрытием. В таких случаях можно использовать данные, полученные с приборов SEVIRI и МСУ-ГС. В то же время из-за существенно более низкого пространственного разрешения этих данных по сравнению с данными приборов АНИ и МСУ-МР информацию о совмещённых наборах контрольных точек, необходимую для построения модели, обеспечивающей даже пиксельную привязку данных МСУ-МР, практически не удаётся получить.

В этом случае фактически единственным возможным решением для построения опорных данных остаются отдельные снимки прибора MODIS в ИК-каналах. В силу более узкой полосы обзора по сравнению с МСУ-МР и разницы в орбитах спутников одного опорного изображения MODIS, как правило, не хватает для достаточного перекрытия снимка МСУ-МР и, соответственно, для качественной привязки. Поэтому было решено использовать мозаику из нескольких снимков MODIS, покрывающих как минимум 90 % привязываемого изображения МСУ-МР. Пример использования такой мозаики MODIS для допривязки приведён на *рис. 4* (см. с. 56).

Таким образом, для ночных снимков МСУ-МР в качестве опоры невозможно выбрать какой-то один тип данных. Поэтому приходится реализовывать схему последовательного использования различных вариантов опорных данных, т.е. в тех случаях, когда не удалось обеспечить нахождение необходимого числа контрольных точек с применением одних опорных данных, запускать процедуру поиска с задействованием другого вида опоры. Для реализации такой схемы мы прибегли к следующей последовательности использования опорных данных: данные геостационарных КА (при наличии), мозаики MODIS, береговые линии.

Такой подход позволяет осуществить успешный поиск необходимых для привязки контрольных точек у значительного (до 60–70 %) количества ночных данных МСУ-МР.

Организация автоматического контроля качества привязки

Для потоковой автоматизированной оценки качества данных, получаемых на основе уточнённой модели прибора, должна быть создана процедура автоматического контроля качества привязки. Это необходимо также для автоматической отбраковки данных, для которых не удалось выполнить привязку в соответствии с установленными требованиями.

Для этого была разработана следующая достаточно простая процедура. Для каждого снимка уточнённые координаты контрольных точек, полученные на первом этапе допривязки, сохраняются и впоследствии сравниваются с координатами тех же точек, полученными в результате последующего применения модели сенсора с восстановленными параметрами ориентации КА. Если средняя разница абсолютных величин расстояния между сохранёнными контрольными точками и восстановленными точками составляет менее 1,5 км, то привязка считается удовлетворительной для дальнейшего использования данного снимка. В противном случае сцена считается неудовлетворительно привязанной. После окончания процедуры контроля полученная средняя ошибка привязки сохраняется для каждой обработанной сцены.

Анализ работоспособности разработанной схемы автоматизированной допривязки данных МСУ-МР

На основе предложенных подходов в Европейском (ЕЦ), Сибирском (СЦ) и Дальневосточном (ДЦ) центрах Научно-исследовательского центра космической гидрометеорологии «Планета» (НИЦ «Планета») (Бурцева, Абросимов, 2009), в которых осуществляется регулярный приём данных КА серии «Метеор-М», в интересах работы Информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз)

(Ковалев и др., 2020) была реализована схема автоматизированной обработки данных, представленная на *рис. 1*.

Результаты работы созданной схемы на собранных тестовых выборках, описанных в разд. «Анализ качества...», показали, что схема является работоспособной и обеспечивает достижение требуемого качества привязки данных. Сравнительное распределение ошибок привязки данных КА «Метеор-М» № 2-2 и № 2-3 до и после процедуры допривязки приведено на *рис. 5* и *б* соответственно.

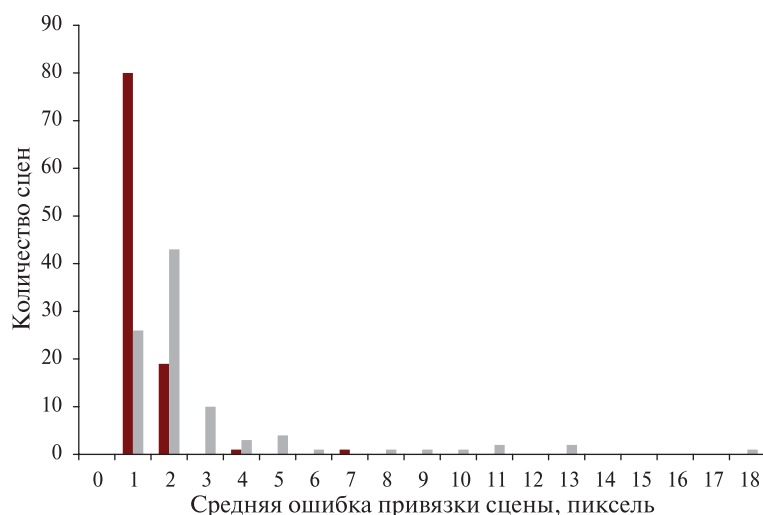


Рис. 5. Распределение ошибок привязки для данных МСУ-МР КА «Метеор-М» № 2-2 до (серый цвет) и после (красный) допривязки

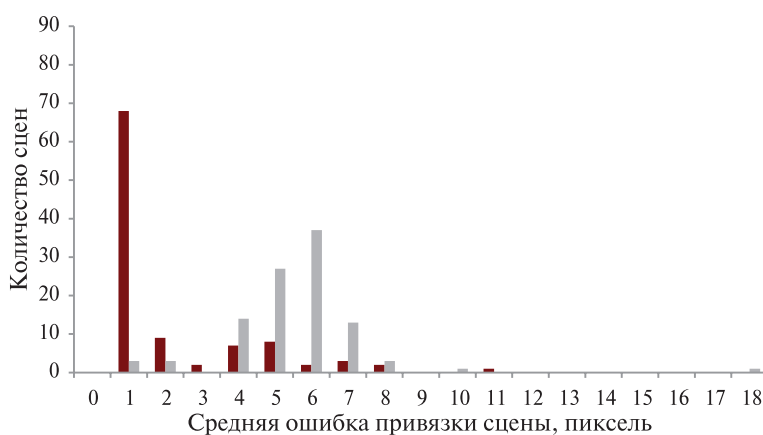


Рис. 6. Распределение ошибок привязки для данных МСУ-МР КА «Метеор-М» № 2-3 до (серый цвет) и после (красный) допривязки

После проверки работоспособности реализованная схема была запущена в потоковом режиме и с её использованием была проведена обработка 10 615 сцен прибора МСУ-МР КА «Метеор-М» № 2-2 и № 2-3, полученных в центрах с сентября 2023 г. по август 2024 г. Оценка точности проведённой привязки показала, что 7681 сцена (72 % от общего числа сцен, прошедших обработку) была привязана с требуемым качеством. Из общего набора 7583 сцены были сняты в дневное время, из них было допривязано 5797 сцен, т. е. 76 %. Ночных снимков было обработано 3032, из них допривязано — 1884, т. е. 62 %.

Распределение обработанных дневных и ночных сцен по способам допривязки приведено в *таблице*. В каждой строке указан способ допривязки, абсолютное количество снимков, для которых этот способ позволил привязать данные, и доля сцен от общего числа сцен этого типа (в %).

Статистика привязки данных по центрам с сентября 2023 г. по август 2024 г.

	Дневные данные	Ночные данные	Итого
Привязано по композиту	3637/48 %	537/18 %	4174
Привязано по береговым линиям	2027/27 %	1248/41 %	3275
Привязано по данным Himawari	133/1 %	99/3 %	232
Не привязано	1786/24 %	1148/38 %	2934
Всего обработано	7583/71 %	3032/29 %	10615

Следует отметить, что использование данных КА Himawari в качестве опорных показало себя достаточно эффективным и позволило увеличить долю допривязанных с требуемым качеством сцен на 6 % для дневных и почти на 10 % для ночных данных, принятых в Дальневосточном центре. К сожалению, как уже отмечалось выше, такая привязка может осуществляться только для данных по территории Дальнего Востока и восточной Сибири (восточнее 100° в.д.). В связи с этим одной из ближайших задач развития реализованной схемы представляется внедрение допривязки данных МСУ-МР, в первую очередь ночных, по мозаике изображений с низкоорбитальных КА с приборами MODIS и VIIRS.

Заключение

В настоящей работе была предложена схема автоматического уточнения географической привязки данных прибора МСУ-МР КА серии «Метеор-М», в том числе представлен вариант выбора опорных данных для её реализации. На основе этой схемы разработана полностью автоматическая процедура уточнения привязки данных МСУ-МР, получаемых в центрах НИЦ «Планета» в интересах системы ИСДМ-Рослесхоз.

С использованием предложенной схемы и реализованной процедуры потоковой допривязки данных было обработано более 10 000 сцен прибора МСУ-МР. Результаты показали, что с применением созданной процедуры удаётся обеспечить привязку не хуже пиксельной для около 70 % данных. Это в целом подтверждает работоспособность предложенной схемы и корректность сделанных при её разработке приближений. Следует отметить, что эта схема выступает достаточно универсальной (включая подходы к выбору опорных данных для допривязки) и может быть использована для уточнения привязки как данных прибора МСУ-МР последующих КА серии «Метеор-М», так и для данных других приборов, установленных на низкоорбитальных КА, имеющих сходные параметры и проблемы.

В настоящее время разработанная процедура обработки данных в полностью автоматическом режиме функционирует в центрах НИЦ «Планета». Это, в частности, позволяет вести постоянное накопление данных и сбор статистики для регулярной проверки качества работы предложенной схемы в интересах её дальнейшего совершенствования. Также это позволило начать реализовывать схемы использования данных МСУ-МР для решения различных задач дистанционного мониторинга, в которых требуется обеспечение пиксельной или субпиксельной привязки данных, например, в задачах количественного полностью автоматизированного учёта площадей, пройденных лесными пожарами (Ковалев и др., 2020; Лозин и др., 2024).

Работа выполняется при поддержке Минобрнауки РФ (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8) с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019).

Литература

1. *Акимов Н. П., Бадаев К. В., Гектин Ю. М., Рыжаков А. В., Смелянский М. Б., Фролов А. Г.* Многозональное сканирующее устройство малого разрешения МСУ МР для космического информационного комплекса «Метеор-М»: Принцип работы, эволюция, перспективы // Ракетно-косм. приборостроение и информ. системы. 2015. Т. 2. Вып. 4. С. 30–39.
2. *Асмус В. В., Дядюченко В. Н., Загребаев В. А., Милехин О. Е., Соловьев В. И., Успенский А. Б.* Развитие космического комплекса гидрометеорологического обеспечения на базе геостационарных спутников серии «Электро-Л» // Вестн. ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина. 2012. № 1. С. 3–14.
3. *Асмус В. В., Загребаев В. А., Макриденко Л. А., Милехин О. Е., Соловьев В. И., Успенский А. Б., Фролов А. В., Хайлов М. Н.* Система полярно-орбитальных метеорологических спутников серии «Метеор-М» // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 5–16.
4. *Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
5. *Бурцева Т. Н., Абросимов Н. И.* Научно-исследовательский центр «Планета» // Земля и Вселенная. 2009. № 1. С. 46–50.
6. *Волкова Е. В.* Оценки параметров облачного покрова и осадков по данным радиометра МСУ-МР полярно-орбитального метеоспутника «Метеор-М» № 2 для Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 300–320. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-300-320.
7. *Зубкова К. И., Гришанцева Л. А., Куревлев Т. Г. и др.* Алгоритм анализа спектральных характеристик снежного и облачного покрова по данным МСУ-МР/«Метеор-М» № 2 // Ракетно-косм. приборостроение и информ. системы. 2019. Т. 6. № 2. С. 68–79. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2019.6.2.68.79.
8. *Катаманов С. Н.* Разработка автоматического метода географической привязки изображений МСУ-МР полярно-орбитального спутника «Метеор-М» № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 276–285.
9. *Катаманов С. Н., Качур В. А.* Результаты географической привязки изображений МСУ-МР полярно-орбитального спутника «Метеор-М» № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 9–18. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-9-18.
10. *Кашицкий А. В., Бурцев М. А., Прошин А. А.* Технология создания безоблачных композитных изображений по данным спутников серии Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 76–85. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-76-85.
11. *Ковалев Н. А., Лупян Е. А., Балашов И. В. и др.* ИСДМ-Рослесхоз: 15 лет эксплуатации и развития // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 283–291. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-283-291.
12. *Кузнецов А. Е., Соловьёв В. И.* Программное обеспечение комплекса тематической обработки целевой информации космического аппарата «Метеор-М» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 68–77.
13. *Лозин Д. В., Лупян Е. А., Балашов И. В. и др.* Адаптация алгоритма детектирования пожаров MOD14 для работы с данными прибора МСУ-МР // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 1. С. 231–245. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-231-245.
14. *Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др.* Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
15. *Плотников Д. Е., Колбудаев П. А., Матвеев А. М. и др.* Автоматическая технология построения ежедневных безоблачных композитных изображений КМСС для количественной оценки состояния земной поверхности // Материалы 19-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021. М.: ИКИ РАН, 2021. С. 451. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
16. *Плотников Д. Е., Колбудаев П. А., Лупян Е. А.* Автоматический метод субпиксельной географической привязки спутниковых изображений КМСС-М на основе актуализируемого эталона низкого пространственного разрешения // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46. № 5. С. 818–827. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1098.
17. *Филей А. А.* Восстановление высоты верхней границы облачности по данным спутникового прибора МСУ-МР КА «Метеор-М» № 2-2 // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 12. С. 918–925. DOI: 10.15372/AOO20201203.
18. *Baldwin D., Emery W.J.* Spacecraft attitude variations of NOAA-11 inferred from AVHRR imagery // Remote Sensing. 1995. V. 16. No. 3. P. 531–548. DOI: 10.1080/01431169508954417.

19. *Bessho K., Date K., Hayashi M. et al.* An introduction to Himawari-8/9 — Japan's new-generation geostationary meteorological satellites // *J. Meteorological Soc. of Japan. Ser. II.* 2016. V. 94. No. 2. P. 151–183. DOI: 10.2151/jmsj.2016-009.
20. *Brown L. G.* A survey of image registration techniques // *ACM Computing Surveys.* 1992. V. 24. No. 4. P. 325–376. DOI: 10.1145/146370.146374.
21. *Iwasaki A.* Detection and estimation of satellite attitude jitter using remote sensing imagery // *Advances in Spacecraft Technologies.* 2011. V. 13. P. 257–272. DOI: 10.5772/14402.
22. *Lim Y.-J., Kim M.-G., Kim T. et al.* Automatic precision correction of satellite images using the GCP chips of lower resolution // 2004 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS 2004). 2004. P. 1394–1397. DOI: 10.1109/IGARSS.2004.1368679.
23. *Lowe D. G.* Distinctive image features from scale-invariant keypoints // *Intern. J. Computer Vision.* 2004. V. 60. P. 91–110. <https://doi.org/10.1023/B%3AVISI.0000029664.99615.94>.
24. *Scheffler D., Hollstein A., Diedrich H. et al.* AROSICS: An automated and robust open-source image co-registration software for multi-sensor satellite data // *Remote Sensing.* 2017. V. 9. Article 676. DOI: 10.3390/rs9070676.
25. *Schott J.* Image processing of thermal infrared images // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,* 1989. V. 55. No. 9. P. 1311–1321.
26. *Schumann W., Stark H., McMullan K., Aminou D., Luhmann H. J.* The MSG system // *ESA Bull.* 2002, P. 11–14.
27. *Vallado D. A., Cefola P.* Two-line element sets — practice and use // *Proc. 63rd Intern. Astronautical Congress.* 2012. 14 p.
28. *Van Wie P., Stein M.* A Landsat digital image rectification system // *IEEE Trans. Geoscience Electronics.* 1977. V. 15. No. 3. P. 130–137. DOI: 10.1109/TGE.1977.6498970.
29. *Zitova B., Flusser J.* Image registration methods: a survey // *Image and Vision Computing.* 2003. V. 21. P. 977–1000. DOI: 10.1016/S0262-8856(03)00137-9.

Technology of Meteor-M satellite MSU-MR data automatic georeferencing correction

**E. E. Volkova¹, A. I. Andreev², M. A. Burtsev¹,
A. A. Mazurov¹, A. M. Matveev¹, E. I. Kholodov²**

¹ *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: volkova@d902.iki.rssi.ru*

² *Far Eastern Center of SRC “Planeta”, Khabarovsk 680000, Russia
E-mail: a.andreev@dvrcpod.ru*

The paper discusses the application of correlation methods to improve the accuracy of georeferencing of low-resolution multiband scanning device (MSU-MR) data installed on domestic Meteor-M series spacecraft. The analysis of key obstacles preventing the automatic construction of stable base products based on MSU-MR data with the help of “standard” streamline georeferencing procedures used in Russian reception centers is carried out. Possible methods and approaches to georeferencing correction are considered. The developed automatic two-stage georeferencing scheme, realized on the basis of automatic search for control points and calculation of their displacements by means of phase correlation calculation between the georeferenced and reference images, is described. The scheme includes identification of control points from reference data, subsequent restoration of spacecraft orientation parameters, data reprocessing with the found parameters and automatic quality assessment of the obtained georeferencing. The description of the developed software solution and features of its realization is also given. The results of estimation of accuracy of automatic georeferencing of the MSU-MR data of Meteor-M No. 2-2 and No. 2-3, obtained on the basis of the proposed solution, which for about 70 % of data does not exceed one pixel, are presented.

Keywords: georeferencing of satellite data, satellite data pipeline processing, MSU-MR instruments, Meteor-M satellites, AROSICS, phase correlation

Accepted: 28.11.2024
DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-48-63

References

1. Akimov N. P., Badaev K. V., Gektin Yu. M., Ryzhakov A. V., Smelyansky M. B., Frolov A. G., Multispectral low-resolution MSU MR scanning device for the Meteor-M space information complex: Principle of operation, evolution, prospects, *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2015, Vol. 2, Iss. 4, pp. 30–39 (in Russian).
2. Asmus V. V., Dyadyuchenko V. N., Zagrebaev V. A., Milekhin O. E., Soloviev V. I., Uspensky A. B., Development of the space complex for hydrometeorological support based on geostationary satellites of the “Electro-L” series, *Vestnik FGUP NPO S.A. Lavochkina*, 2012, No. 1, pp. 3–14 (in Russian).
3. Asmus V. V., Zagrebaev V. A., Makridenko L. A., Milekhin O. E., Soloviev V. I., Uspensky A. B., Frolov A. V., Khailov M. N., System of polar-orbiting meteorological satellites of the Meteor-M series, *Meteorologiya i gidrologiya*, 2014, No. 12, pp. 5–16 (in Russian).
4. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAS, 2016, 208 p. (in Russian).
5. Burtseva T. N., Abrosimov N. I., Scientific research center Planeta, *Zemlya i Vseennaya*, 2009, No. 1, pp. 46–50 (in Russian).
6. Volkova E. V., Estimates of cloud cover and precipitation parameters based on data from the MSU-MR radiometer of the polar-orbiting meteorological satellite “Meteor-M” No. 2 for the European territory of Russia, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 5, pp. 300–320 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-300-320.
7. Zubkova K. I., Grishantseva L. A., Kurevlev T. G. et al., Algorithm for analyzing spectral characteristics of snow and cloud cover based on MSU-MR data from the “Meteor-M” No. 2 satellite, *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2019, Vol. 6, No. 2, pp. 68–79 (in Russian), DOI: 10.30894/issn2409-0239.2019.6.2.68.79.
8. Katamanov S. N., Development of an automatic method for geographic referencing of images from the MSU-MR polar-orbiting satellite “Meteor-M” No. 1, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 276–285 (in Russian).
9. Katamanov S. N., Kachur V. A., Results of geographic referencing of images from the MSU-MR polar-orbiting satellite “Meteor-M” No. 2, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 2, pp. 9–18 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-9-18.
10. Kashnitsky A. V., Burtsev M. A., Proshin A. A., Technology for creating cloud-free composite images based on data from Sentinel-2 satellites, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 5, pp. 76–85 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-76-85.
11. Kovalev N. A., Loupian E. A., Balashov I. V. et al., ISDM-Rosleskhoz: 15 years of operation and development, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 7, pp. 283–291 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-283–291.
12. Kuznetsov A. E., Solovyov V. I., Software for thematic processing of target information from the “Meteor-M” spacecraft, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 68–77 (in Russian).
13. Lozin D. V., Loupian E. A., Balashov I. V. et al., Adaptation of the MOD14 fire detection algorithm for use with MSU-MR data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, Vol. 21, No. 1, pp. 231–245 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-231-245.
14. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al., Experience in the operation and development of the collective use center for archiving, processing, and analyzing satellite data (CKP “IKI-Monitoring”), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
15. Plotnikov D. E., Kolbudaev P. A., Matveev A. M. et al., Automatic technology for building daily cloud-free composite images from KMSS for quantitative assessment of the state of the Earth’s surface, *Materialy 19-i Mezhdunarodnoi konferentsii “Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa”* (Proc. 19th Intern. Conf. “Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space”), 15–19 Nov. 2021, Moscow: IKI RAS, 2021, p. 451 (in Russian), DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
16. Plotnikov D. E., Kolbudaev P. A., Loupian E. A., An automatic method for subpixel registration of KMSS-M imagery based on coarse-resolution actualized reference, *Computer Optics*, 2022, Vol. 46, No. 5, pp. 818–827 (in Russian), DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1098.
17. Filei A. A., Retrieval of the cloud top height from Meteor-M No. 2-2 MSU-MR measurements, *Optika atmosfery i okeana*, 2020, Vol. 33, No. 12, pp. 918–925 (in Russian), DOI: 10.15372/AOO20201203.
18. Baldwin D., Emery W. J., Spacecraft attitude variations of NOAA-11 inferred from AVHRR imagery, *Remote Sensing*, 1995, Vol. 16, No. 3, pp. 531–548, DOI: 10.1080/01431169508954417.

19. Bessho K., Date K., Hayashi M. et al., An introduction to Himawari-8/9 — Japan's new-generation geostationary meteorological satellites, *J. Meteorological Soc. of Japan*, Ser. II, 2016, Vol. 94, No. 2, pp. 151–183, DOI: 10.2151/jmsj.2016-009.
20. Brown L. G., A survey of image registration techniques, *ACM Computing Surveys*, 1992, Vol. 24, No. 4, pp. 325–376, DOI: 10.1145/146370.146374.
21. Iwasaki A., Detection and estimation of satellite attitude jitter using remote sensing imagery, *Advances in Spacecraft Technologies*, 2011, Vol. 13, pp. 257–272, DOI: 10.5772/14402.
22. Lim Y.-J., Kim M.-G., Kim T. et al., Automatic precision correction of satellite images using the GCP chips of lower resolution, *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS 2004)*, 2004, pp. 1394–1397, DOI: 10.1109/IGARSS.2004.1368679.
23. Lowe D. G., Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *Intern. J. Computer Vision*, 2004, Vol. 60, pp. 91–110, <https://doi.org/10.1023/B%3AVISI.0000029664.99615.94>.
24. Scheffler D., Hollstein A., Diedrich H. et al., AROSICS: An automated and robust open-source image co-registration software for multi-sensor satellite data, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, Article 676, DOI: 10.3390/rs9070676.
25. Schott J., Image processing of thermal infrared images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1989, Vol. 55, No. 9, pp. 1311–1321.
26. Schumann W., Stark H., McMullan K., Aminou D., Luhmann H.J., The MSG system, *ESA Bull.*, 2002, pp. 11–14.
27. Vallado D.A., Cefola P., Two-line element sets — practice and use, *Proc. 63rd Intern. Astronautical Congress*, Naples, Italy, 2012, 14 p.
28. Van Wie P., Stein M., A Landsat digital image rectification system, *IEEE Trans. Geoscience Electronics*, 1977, Vol. 15, No. 3, pp. 130–137, DOI: 10.1109/TGE.1977.6498970.
29. Zitova B., Flusser J., Image registration methods: a survey, *Image and Vision Computing*, 2003, Vol. 21, pp. 977–1000, DOI: 10.1016/S0262-8856(03)00137-9.