Географическая привязка изображений МСУ-100М спутника «Метеор-М» № 2 без использования данных комплекса координатно-временного обеспечения

С. Н. Катаманов

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
Владивосток, 690041, Россия
E-mail: sergey@satellite.dvo.ru

Представлены результаты исследований, проведённых при разработке автоматического метода географической привязки изображений, получаемых многозональными съёмочными устройствами МСУ-100М спутника «Метеор-М» № 2 в течение полного сеанса приёма. Метод основан на орбитальной модели движения SGP4 (*англ.* Simplified General Perturbation 4) в сочетании с математической моделью формирования изображения, которая достаточно точно учитывает все аспекты работы камеры на орбите. Коррекция географической привязки изображений выполняется вычислением оптимальных значений углов ориентации спутниковой платформы в пространстве (крен, тангаж и рысканье) по реперным точкам или прогнозированием. Уточнены и приведены оценки величин фокусных расстояний для всех каналов обеих камер МСУ-100М спутника «Метеор-М» № 2. Вычислены и представлены оценки углов пространственного рассогласования (крен, тангаж и рысканье) оптических осей каналов обеих камер МСУ-100М относительно базового канала. Также были найдены оценки углов пространственного рассогласования между приборными системами радиометра МСУ-МР (многозональное сканирующее устройство малого разрешения) и обеими камерами МСУ-100М. Использование последних оценок позволило уточнять привязку изображений, получаемых камерами МСУ-100М, с помощью значений углов ориентации спутниковой платформы, вычисленных по автоматически рассчитанным реперным точкам на изображениях МСУ-МР. Приведены и обсуждаются результаты апробации разработанного метода географической привязки данных МСУ-100М.

Ключевые слова: «Метеор-М», КМСС-М, МСУ-100М, МСУ-МР, географическая и межканальная привязка, реперные точки, углы ориентации спутниковой платформы, крен, тангаж, рысканье, прогноз географической привязки

Одобрена к печати: 30.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-101-111

Введение

Комплекс многозональной спутниковой съёмки (КМСС-М), установленный на спутнике «Метеор-М» № 2, предназначен для съёмки земной и водной поверхности в шести зонах видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра электромагнитных волн (Аванесов и др., 2013). В состав КМСС-М входят три многозональных съёмочных устройства (МСУ), выполненные в виде отдельных конструктивных блоков: два МСУ-100М (разрешение в надире 60 м), предназначенные для съёмки поверхности суши, и одно МСУ-50М (разрешение в надире 120 м) — для съёмки водных объектов. Данные КМСС-М могут быть использованы для экоприродного мониторинга в научных, природоохранных и хозяйственных целях, таких как состояние и динамика лесного покрова, ледового покрова морских акваторий, снежного покрова, динамика загрязнения морей и океанов, структура облачного покрова, аэрозольные загрязнения атмосферы, лесные пожары, паводки и наводнения, извержения вулканов, крупные антропогенные катастрофы и т. п. Спутниковые данные КМСС-М автоматически принимаются, обрабатываются в потоковом режиме, архивируются и каталогизируются на наземных приёмных станциях научно-исследовательских центров космической гидрометеорологии (НИЦ «Планета») Росгидромета в следующих городах России: Москва, Новосибирск и Хабаровск (Аванесов и др., 2013; Бекренёв и др., 2015). Также в состав целевой аппаратуры спутника «Метеор-М» № 2 входит многозональное сканирующее устройство

малого разрешения (МСУ-МР № 2), предназначенное для съёмки земной и водной поверхности в шести зонах видимого и инфракрасного диапазонов спектра электромагнитных волн (разрешение в надире — 1000 м).

Данные КМСС-М дополнены синхронной навигационной информацией, получаемой с бортового комплекса координатно-временного обеспечения (ККВО), в состав которого входят: аппаратура формирования бортового времени, система спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS (*англ.* Global Positioning System) и два прибора звёздной ориентации БОКЗ-М (блок определения координат звёзд). В работе (Бекренёв и др., 2015) было заявлено, что при отсутствии синхронной навигационной информации при приёме данных КМСС-М ошибка географической привязки изображений МСУ-100М с использованием общедоступных баллистических данных NORAD (*англ.* North American Aerospace Defense Command) может достигать 5 км. В следующей публикации (Плотников и др., 2022) приведено распределение (полученное на значительной выборке) величин найденных ошибок привязки изображений МСУ-100М с использованием данных ККВО, где среднее значение ошибки составило 3 км. Также в данной работе было указано, что максимальная ошибка привязки в некоторых случаях может достигать нескольких десятков километров. В другом исследовании (Васильев и др., 2021) показано, что наблюдаются случаи, когда ошибка географической привязки изображений МСУ-100М может достигать 60 км. При этом в этой же публикации была приведена оценка количества данных МСУ-100М (полученных за полный месяц) со сбойной синхронной навигационной информацией, которая достигала 50 % от всего количества изображений.

Основные цели настоящей работы — разработка метода географической привязки изображений МСУ-100М (без использования данных ККВО) и оценка возможности уточнения привязки данных МСУ-100М с помощью параметров коррекции, вычисленных по реперным точкам (которые были автоматически рассчитаны по изображениям МСУ-МР № 2). Также в рамках разработки метода привязки рассмотрены и решены следующие проблемы, связанные с обработкой данных МСУ-100М. Первая проблема заключается в том, что номинальные величины фокусного расстояния для каждого канала обеих камер МСУ-100М не соответствуют наблюдаемым. В результате чего, при использовании номинальных величин для обеих камер МСУ-100М, ошибка привязки увеличивается от центра к краям изображения и достигает нескольких пикселей. Следующая проблема заключается в том, что оптические оси всех каналов обеих камер МСУ-100М отклонены от номинальных положений. Вследствие чего параметры коррекции привязки (крен (*англ.* roll), тангаж (*англ.* pitch) и рысканье (*англ.* yaw)), вычисленные по реперным точкам на изображении, одного канала нельзя использовать для коррекции привязки изображения другого канала. Для каждой из камер МСУ-100М ошибка привязки при переносе параметров коррекции привязки с одного канала на другой может достигать величины более 10 пикселей. В работе (Жуков и др., 2018) рассмотрены вышеуказанные проблемы для камер МСУ-100М и приведено одно из возможных решений для них. Также если рассчитать углы пространственного рассогласования (крен, тангаж и рысканье) между приборными системами радиометра МСУ-МР № 2 и каждой из камер МСУ-100М, то это позволит уточнять привязку изображений МСУ-100М с помощью вычисленных значений углов ориентации спутниковой платформы, которые были рассчитаны по реперным точкам на изображениях МСУ-МР № 2.

Используемые методы и данные

На платформе спутника «Метеор-М» № 2 установлены два прибора МСУ-100М (условно обозначаемые МСУ-201 и МСУ-202) таким образом, что их оптические оси отклонены от вертикальной оси (направленной в надир) на углы ±14° в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты (т. е. по углу крена). Инструмент МСУ-100М регистрирует электромагнитное излучение в трёх диапазонах спектра электромагнитных волн: зелёном (0,535–0,575 мкм), красном (0,63–0,68 мкм) и ближнем инфракрасном (0,76–0,90 мкм). Оптическое изображе-

ние каждой из камер МСУ-100М формируется с помощью оснащённого блендой объектива (с номинальным фокусным расстоянием, равным 100 мм) в плоскости фотоприёмников, в качестве которых используются три линейных прибора с зарядовой связью (ЛПЗС). Все ЛПЗС (соответствующие разным спектральным каналам) разнесены в фокальной плоскости прибора МСУ-100М, в результате чего соответствующие друг другу элементы разрешения на земной поверхности наблюдаются в разных спектральных каналах под разными углами в орбитальной плоскости (–8,67, 0 и +8,67° соответственно по углу тангажа). Временная задержка между ближайшими каналами равна 19,4 с. За четыре секунды камерой МСУ-100М формируется 625 строк изображения. Полная длина строки изображения МСУ-100М составляет 7926 пикселей, а размер элементарного детектора ЛПЗС равен 7×7 мкм (Аванесов и др., 2013).

При разработке метода географической привязки данных МСУ-100М был использован подход, который ранее применялся для изображений, получаемых с других приборных систем (Катаманов, 2015, 2016; Катаманов, Качур, 2018). Суть подхода состоит в моделировании всех основных аспектов формирования изображения приборной системой на орбите. Для предсказания положения «Метеор-М» № 2 на орбите используется широко известная модель орбитального движения SGP4 (*англ.* Simplified General Perturbation #4) (Vallado et al., 2006) в сочетании с прогнозными телеграммами NORAD (*англ.* North American Aerospace Defense Command) TLE (*англ.* Two-Line Element) (Kelso, 1996), которые могут быть получены с общедоступных интернет-ресурсов. Математическая модель формирования изображения камерой МСУ-100М, применяемая в разработанном методе, учитывает все геометрические аспекты работы камерой типа *push-broom* и практически не отличается от предложенных подходов в альтернативных методах (Patt, Gregg, 1994). Решение прямой и обратной задачи географической привязки изображений реализовано так же, как в работе (Катаманов, 2016). Для достижения пиксельной точности привязки данных МСУ-100М в разработанном методе используется процедура коррекции, которая вычисляет оптимальные значения углов ориентации спутниковой платформы с камерой в пространстве (крен, тангаж и рысканье) по реперным точкам. При вычислении значений углов принимается гипотеза о том, что для изображения (сформированного в течение полного сеанса приёма длительностью до 15 мин.) они постоянны. Для расчёта истинных положений реперных точек используется метод, который был ранее разработан и апробирован для изображений, получаемых другими спутниковыми приборными системами (Катаманов, 2015, 2016; Катаманов, Качур, 2018).

Геометрическая калибровка камер

Уточнение номинальных величин фокусного расстояния для каждого канала обеих камер МСУ-100М было выполнено с помощью реперных точек на изображениях так же, как для углового поля зрения радиометра AVHRR/3 (*англ.* Advanced Very High Resolution Radiometer), установленного на спутниках серии MetOp (Катаманов, 2015). В *табл. 1* приведены вычисленные оценки величин фокусного расстояния для каждого канала обеих камер МСУ-100М. Приведённые значения одного порядка с оценками, полученными в работе (Жуков и др., 2018).

Таблица 1. Величины фокусного расстояния для каждого канала обеих камер МСУ-100М спутника «Метеор-М» № 2

№ канала (спектральный диапазон, мкм)	Фокусное расстояние для МСУ-201, мм	Фокусное расстояние для МСУ-202, мм
1 (0,535–0,575)	101,16	101,33
2 (0,630–0,680)	100,11	100,17
3 (0,760–0,900)	101,27	101,34

Вычисление отклонений оптических осей каналов обеих камер МСУ-100М от номинальных положений было выполнено следующим образом. Для каждой из камер 2-й канал был выбран как базовый, так как лежит в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты (смотрите выше). Далее относительно базового канала для остальных каналов были вычислены три угла поворота: крен, тангаж и рысканье. Для оценки величин этих углов использовался метод реперных точек. Для этого были рассчитаны реперные точки по изображениям каждого канала относительно эталонной цифровой карты береговой линии (Wessel, Smith, 1996). После чего с помощью метода наименьших квадратов по невязкам в реперных точках были получены оценки трёх углов поворота (крен, тангаж и рысканье) для каждого изображения. Для этого использовался подход, предложенный в работе (Rosborough et al., 1994), с помощью которого решение последней задачи сводится к системе линейных уравнений. Для расчётов была использована серия данных МСУ-100М, сформированных с октября 2015 г. по май 2017 г. (всего 87 сеансов). Вычисленные наборы углов были отобраны согласно условиям, которым удовлетворяла искомая конфигурация реперных точек на каждом изображении: количество точек не меньше 50 шт., величина *база по строке* не меньше 0,8 и значения RMS (*англ.* Root Mean Square) остаточных невязок в реперных точках не превышали двух пикселей. Параметр *база по строке* — это отношение максимальной разницы координат реперных точек вдоль строки на изображении к количеству пикселей в строке. После чего были вычислены разности углов относительно базового канала для каждого изображения. Далее рассчитывались средние оценки для последних величин, полученных по всем изображениям. В *табл. 2* приведены вычисленные оценки средних значений (в мрад) углов для каждого канала (относительно базового) обеих камер МСУ-100М. Значения угла тангажа приведены без учёта номинальных величин разнесения ЛПЗС каналов в фокальной плоскости камеры (смотрите выше).

Таблица 2. Углы пространственного рассогласования каналов (относительно базового) обеих камер МСУ-100М спутника «Метеор-М» № 2

№ канала (спектральный диапазон, мкм)	Углы для МСУ-201			Углы для МСУ-202 (в мрад)		
	Крен	Тангаж	Рысканье	Крен	Тангаж	Рысканье
1 (0,535–0,575)	1,896417	–0,210748	0,059226	2,683471	0,042736	–0,536098
2 (0,630–0,680)	–	–	–	–	–	–
3 (0,760–0,900)	3,185906	0,724153	0,738412	0,521684	0,039582	0,061907

Результаты географической привязки изображений

Для совместного использования углов ориентации платформы, рассчитанных по реперным точкам на изображениях МСУ-МР № 2, были вычислены углы пространственного рассогласования (крен, тангаж и рысканье) между приборными системами радиометра МСУ-МР № 2 и обеими камерами МСУ-100М. В *табл. 3* представлены полученные оценки средних значений (в мрад) углов между приборными системами радиометра МСУ-МР № 2 и обеими камерами МСУ-100М. Значения угла крена приведены без учёта номинальных величин отклонения оптических осей (обеих камер МСУ-100М) от вертикальной оси (направленной в надир) в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты (смотрите выше). В результате чего использование последних оценок позволяет применять вычисленные углы (для изображений МСУ-МР № 2) для уточнения привязки данных МСУ-100М.

Предварительные результаты такого способа привязки данных МСУ-100М показали, что погрешность привязки в среднем лежит в пределах 2–7 пикселей изображения МСУ-100М. При этом пространственное разрешение в надире изображений МСУ-МР № 2 в 16 раз хуже, чем пространственное разрешение изображений МСУ-100М. На *рис. 1* приведён пример RGB-изображения (*англ.* Red, Green, Blue) в стандартной картографической проекции UTM (*англ.* Universal Transverse Mercator), построенного по данным (трёх каналов) камеры МСУ-202 (длительность сеанса составила около 14,5 мин.).

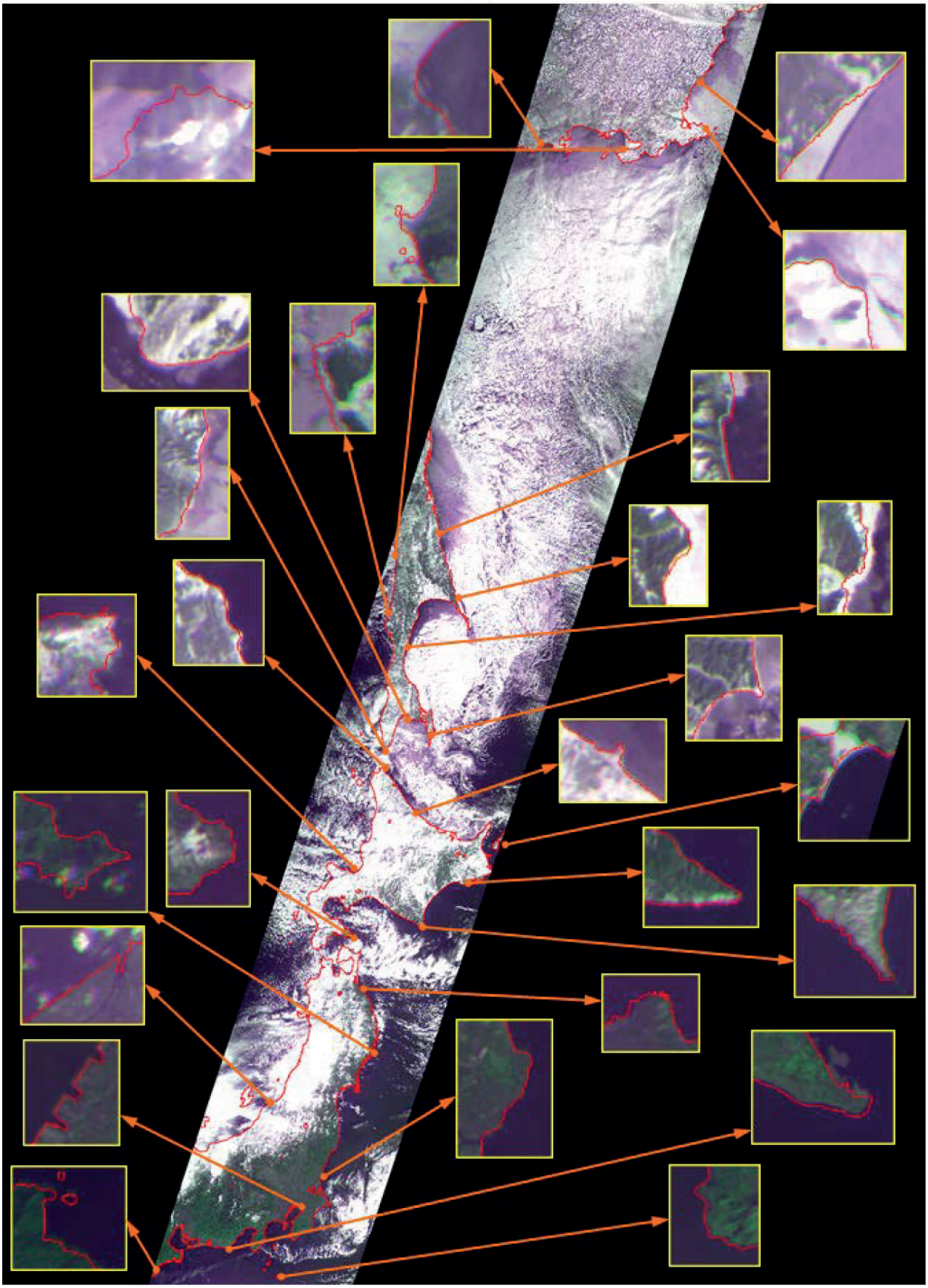


Рис. 1. RGB-изображение в стандартной картографической проекции UTM, построенное по видеоданным камеры МСУ-202 (00:25:52, 26.02.2016 UTC (*англ.* Coordinated Universal Time)). Эталонный береговой контур на изображении отмечен красным тоном

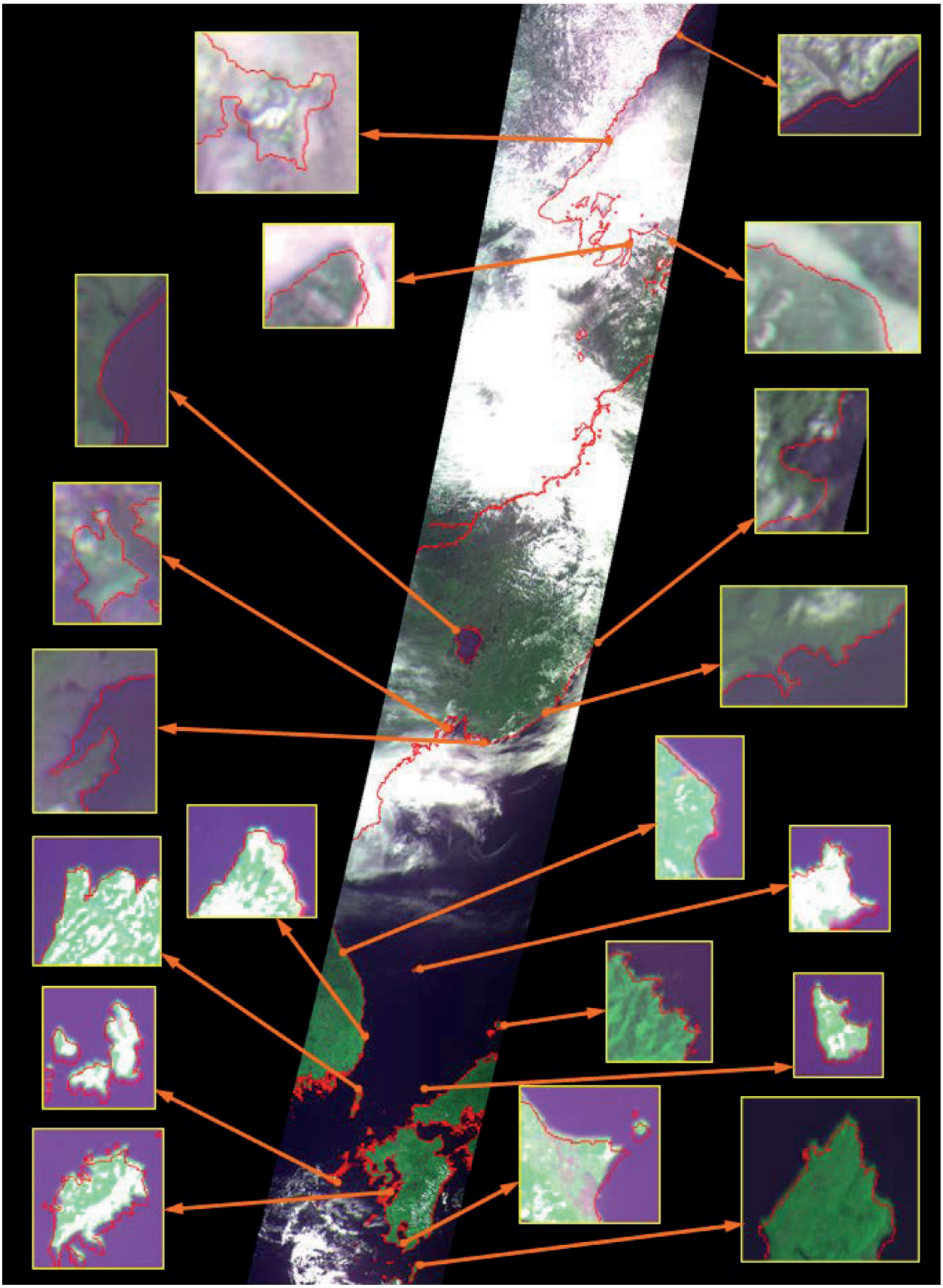


Рис. 2. RGB-изображение в стандартной картографической проекции UTM, построенное по видеоданным камеры МСУ-201 (00:36:14, 24.04.2017 UTC). Эталонный береговой контур на изображении отмечен красным тоном

Привязка для данного изображения выполнялась с использованием величин углов, вычисленных по автоматически рассчитанным реперным точкам на изображении МСУ-МР № 2 (Катаманов, Качур, 2018). Вынесенные фрагменты изображения на *рис. 1* имеют разрешение, сопоставимое с разрешением камер МСУ-100М в надире при работе на орбите. Визуальный анализ *рис. 1* показывает, что для всего изображения рассогласование видимого и эталонного (Wessel, Smith, 1996) береговых контуров лежит в указанных пределах.

Таблица 3. Углы пространственного рассогласования между радиометром МСУ-МР № 2 и камерами МСУ-100М спутника «Метеор-М» № 2

Углы (в мрад)	МСУ-201	МСУ-202
Крен	39,091864	36,591473
Тангаж	–1,678576	–2,178469
Рысканье	–2,467725	–6,967813

Одна из основных проблем получения точной привязки спутниковых данных — изображения, у которых конфигурация реперных точек является неудачной или точки вовсе отсутствуют (сплошная облачность, открытые морские акватории и пр.). Привязку данных такого рода с необходимой точностью можно выполнить прогнозированием параметров коррекции привязки, т. е. используя результаты успешной привязки изображений (сформированных ранее) по реперным точкам (Катаманов, 2016). В работе (Катаманов, Качур, 2018) был предложен и апробирован подход прогнозирования параметров коррекции привязки для изображений радиометра МСУ-МР № 2. Результаты апробации этого подхода на значительной выборке данных показали, что в тех случаях, когда невозможно рассчитать необходимую конфигурацию реперных точек, пиксельная точность привязки изображений в большинстве случаев достижима. Предварительные результаты такого способа привязки данных МСУ-100М показали, что погрешность привязки в среднем лежит в пределах 3–10 пикселей изображения МСУ-100М. На *рис. 2* приведён пример RGB-изображения в стандартной картографической проекции UTM, построенного по данным (трёх каналов) камеры МСУ-201 (длительность сеанса составила около 13 мин.). Привязка для данного изображения выполнялась с использованием прогнозных величин углов, установленных для изображения МСУ-МР № 2 (Катаманов, Качур, 2018). При коррекции привязки приведённого изображения на *рис. 2* применялся набор углов, вычисленный по автоматически рассчитанным реперным точкам на изображении МСУ-МР № 2 (сформированного с разницей в 5 сут. и разницей по долготе восходящего узла орбиты, равной 4,8°). Визуальный анализ *рис. 2* показывает, что для всего изображения рассогласование видимого и эталонного береговых контуров лежит в указанных пределах. При этом надо учесть, что в среднем точность эталонной цифровой карты береговой линии заявлена в пределах 100 м (Wessel, Smith, 1996). Но на некоторых участках эталонного берегового контура ошибки могут достигать до нескольких сотен метров (Wessel, Smith, 1996). Также дополнительным источником ошибок привязки изображений выступает в определённые моменты времени наличие некоторых колебаний спутниковой платформы «Метеор-М» № 2 (с установленной целевой аппаратурой) в пространстве.

Заключение

Получены оценки величин фокусного расстояния для всех каналов обеих камер МСУ-100М, установленных на спутнике «Метеор-М» № 2. Вычислены значения углов пространственного рассогласования (крен, тангаж и рысканье) оптических осей каналов (относительно базового) обеих камер МСУ-100М. Что позволяет проводить межканальную привязку данных МСУ-100М с пиксельной точностью. Также были рассчитаны значения углов пространственного рассогласования (крен, тангаж и рысканье) между приборными системами радиометра

МСУ-МР № 2 и двумя камерами МСУ-100М. Использование последних параметров позволило уточнять привязку данных обеих камер МСУ-100М с помощью значений углов (крен, тангаж и рысканье), вычисленных по реперным точкам на изображениях МСУ-МР № 2. Результаты такого способа привязки данных МСУ-100М показали, что погрешность привязки в среднем лежит в пределах 2–7 пикселей изображений МСУ-100М. Также при прогнозировании параметров коррекции привязки (вычисленных по реперным точкам на изображениях МСУ-МР № 2) погрешность привязки изображений МСУ-100М в среднем лежит в пределах 3–10 пикселей. При этом пространственное разрешение в надире изображений МСУ-МР № 2 в 16 раз хуже, чем пространственное разрешение изображений МСУ-100М.

Разработанные методики позволяют выполнять геометрическую калибровку камер и значительно уточнять географическую привязку изображений МСУ-100М без использования данных ККВО. Они также могут быть применены при обработке изображений от усовершенствованных камер МСУ-100ТМ, которые установлены и функционируют на следующих искусственных спутниках Земли: «Метеор-М» № 2-2 (запущен 5 июля 2019 г.), «Метеор-М» № 2-3 (запущен 27 июня 2023 г.) и «Метеор-М» № 2-4 (запущен 29 февраля 2024 г.). В камерах МСУ-100ТМ, в отличии от МСУ-100М, ЛПЗС всех трёх спектральных каналов совмещены в фокальной плоскости, но, как отмечено в работах (Жуков и др., 2019, 2024; Кондратьева и др., 2025), необходимость проведения геометрической калибровки камер МСУ-100ТМ остаётся актуальной. В другой публикации (Жуков и др., 2021) также отмечено, что в некоторых случаях существует проблема точной привязки изображений камер МСУ-100ТМ в связи с погрешностями синхронной навигационной информации. Поэтому будет крайне эффективно выполнять привязку изображений камер МСУ-100ТМ по реперным точкам, автоматически рассчитанным по изображениям радиометра МСУ-МР (который в качестве целевой аппаратуры установлен на всех искусственных спутниках Земли серии «Метеор-М»). Это позволит значительно уточнять географическую привязку, особенно в тех случаях, когда данные ККВО с искусственных спутников Земли отсутствуют или содержат некорректную информацию.

Автор выражает искреннюю благодарность и глубокую признательность сотрудникам Дальневосточного НИЦ «Планета» Росгидромета (г. Хабаровск) за предоставленные данные МСУ-100М спутника «Метеор-М» № 2, которые были использованы в работе.

Работа выполнялась в рамках госбюджетного задания «Методы и технологии искусственного интеллекта, компьютерного и математического моделирования в исследовании природных, технологических и биомедицинских процессов» (№ госрегистрации 126020416439-8). В работе были использованы информационные ресурсы ЦКП Регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН.

Литература

1. *Аванесов Г. А.*, *Полянский И. В.*, *Жуков Б. С. и др.* Комплекс многозональной спутниковой съемки на борту КА «Метеор-М» № 1: три года на орбите // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 2. С. 74–83. DOI: 10.7868/S0205961413020012.
2. *Бекренёв О. В.*, *Гришанцева Л. А.*, *Жуков Б. С.*, *Полянский И. В.* Особенности автоматической потоковой обработки данных КМСС космического комплекса «Метеор-3М» // Геоматика. 2015. № 2. С. 32–36.
3. *Васильев А. И.*, *Крылов А. В.*, *Пестряков А. А. и др.* Алгоритмы потоковой обработки данных КМСС КА Метеор-М в обеспечение автоматического формирования сплошного покрытия территории РФ // Материалы 19-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2021. С. 14. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
4. *Жуков Б. С.*, *Жуков С. Б.*, *Кондратьева Т. В.*, *Никитин А. В.* Автоматизация полётной геометрической калибровки комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 201–212. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-201-212.
5. *Жуков Б. С.*, *Гришанцева Л. А.*, *Кондратьева Т. В. и др.* Полётная геометрическая калибровка комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2 // Современные

проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 93–100. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-93-100.
6. *Жуков Б. С.*, *Кондратьева Т. В.*, *Полянский И. В.* Коррекция автоматической географической привязки изображений комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 75–81. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-75-81.
7. *Жуков Б. С.*, *Кондратьева Т. В.*, *Никитин А. В.*, *Полянский И. В.* Полётная геометрическая калибровка комплекса аппаратуры КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-3 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 1. С. 185–193. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-185-193.
8. *Катаманов С. Н.* Автоматический метод географической привязки изображений AVHRR/3 от полярно-орбитальных спутников серии MetOp // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 61–72.
9. *Катаманов С. Н.* Результаты географической привязки изображений AVHRR/NOAA в условиях оперативной обработки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 187–202. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-187-202.
10. *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.
11. *Кондратьева Т. В.*, *Жуков Б. С.*, *Никитин А. В.*, *Полянский И. В.* Радиометрические и геометрические характеристики Комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-2 на космическом аппарате «Метеор-М» № 2-4 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 6. С. 137–150. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-137-150.
12. *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 // Компьютер. оптика. 2022. Т. 46. № 5. С. 818–827. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1098.
13. *Kelso T. S.* Orbital Data on the WWW // Satellite Times. 1996. V. 2. No. 5. P. 80–81.
14. *Patt F. S.*, *Gregg W. W.* Exact closed-form geolocation algorithm for Earth survey sensors // Intern. J. Remote Sensing. 1994. V. 15. No. 18. P. 3719–3734. DOI: 10.1080/01431169408954354.
15. *Rosborough G. W.*, *Baldwin D. G.*, *Emery W. J.* Precise AVHRR image navigation // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1994. V. 32. P. 644–657. DOI: 10.1109/36.297982.
16. *Vallado D. A.*, *Crawford P. S.*, *Hujsak R.*, *Kelso T. S.* Revisiting spacetrack report #3 // AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conf. AIAA, 2006. 94 p. DOI: 10.2514/6.2006-6753.
17. *Wessel P.*, *Smith W. H. F.* A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database // J. Geophysical Research: Solid Earth. 1996. V. 101. No. B4. P. 8741–8743. DOI: 10.1029/96JB00104.

Georeferencing of MSU-100M images from the Meteor-M No. 2 satellite without using data from the coordinate and clock referencing system

S. N. Katamanov

Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, 690041, Russia
E-mail: sergey@satellite.dvo.ru

The article presents the results of research conducted during the development of an automatic method for georeferencing images acquired by the MSU-100M multispectral imaging devices of the Meteor-M No. 2 satellite during a complete reception session. The method is based on the SGP4 (Simplified General Perturbation #4) orbital motion model in combination with a mathematical model of image formation, which accurately accounts for all aspects of camera operation in orbit. Image georeferencing is corrected by calculating optimal values of the satellite attitude angles (roll, pitch and yaw) using ground control points or by forecasting. Focal length estimates for individual channels of both MSU-100M cameras of the Meteor-M No. 2 satellite are refined and presented. Spatial misalignment angles

(roll, pitch, and yaw) of the optical axes of the channels of both MSU-100M cameras relative to the base channel are calculated and presented. Estimates of the spatial misalignment angles between the instrumentation systems of the MSU-MR radiometer (multiband scanner of low spatial resolution) and both MSU-100M cameras are also calculated. The use of these estimates allowed for more accurate georeferencing of images obtained by the MSU-100M cameras using satellite attitude angle values computed from automatically calculated ground control points in the MSU-MR images. Test results of the developed method for MSU-100M data georeferencing are presented and discussed.

Keywords: Meteor-M, KMSS-M, MSU-100M, MSU-MR, georeferencing of images, channel-to-channel registration, ground control points, satellite attitude, roll, pitch, yaw, navigation attitude forecasting

Accepted: 30.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-101-111

References

1. Avanesov G.A., Polyanskiy I.V., Zhukov B.S. et al., Multispectral satellite imaging system aboard the Meteor-M No. 1 spacecraft: three years in orbit, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 2, pp. 74–83 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961413020012.
2. Bekrenev O.V., Grishantseva L.A., Zhukov B.S., Polyanskiy I.V., The features of automatic streaming processing for KMSS data "Meteor-3M", *Geomatika*, 2015, No. 2, pp. 32–36 (in Russian).
3. Vasilyev A.I., Krylov A.V., Pestryakov A.A. et al., Algorithms for processing Meteor-M streaming data to automatically ensure continuous coverage of Russian Federation territories, *Materialy 19-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 19th Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2021, p. 14 (in Russian), DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
4. Zhukov B.S., Zhukov S.B., Kondratieva T.V., Nikitin A.V., Automation of in-flight geometric calibration of multispectral satellite imaging system KMSS-M on board Meteor-M No. 2 satellite, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 6, pp. 201–212 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-201-212.
5. Zhukov B.S., Grishantseva L.A., Kondratieva T.V. et al., In-flight geometric calibration of KMSS-2 multispectral satellite imaging system on board Meteor-M No. 2-2 satellite, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 6, pp. 93–100 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-93-100.
6. Zhukov B.S., Kondratieva T.V., Polyanskiy I.V., Correction of automatic image georeferencing for the KMSS-2 multispectral satellite imaging system on board Meteor-M No. 2-2 satellite, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 2, pp. 75–81 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-75-81.
7. Zhukov B.S., Kondratieva T.V., Nikitin A.V., Polyanskiy I.V., In-flight geometric calibration of multispectral satellite imaging system KMSS-2 on board Meteor-M No. 2-2 satellite, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 1, pp. 185–193 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-185-193.
8. Katamanov S.N., Automatic image navigation method for AVHRR/3 imagery from polar-orbital MetOp satellites, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, V. 12, No. 3, pp. 61–72 (in Russian).
9. Katamanov S.N., NOAA/AVHRR images navigation results in operational processing conditions, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, V. 13, No. 6, pp. 187–202 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-187-202.
10. Katamanov S.N., Kachur V.A., Navigation results for MSU-MR imagery of polar-orbital satellite Meteor-M No. 2, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 2, pp. 9–18 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-9-18.
11. Kondratieva T.V., Zhukov B.S., Nikitin A.V., Polyanskiy I.V., Radiometric and geometric characteristics of the KMSS-2 multispectral satellite imaging system on board Meteor-M No. 2-4 satellite, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 6, pp. 137–150 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-137-150.
12. 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, V. 46, No. 5, pp. 818–827 (in Russian), DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1098.

13. Kelso T. S., Orbital Data on the WWW, *Satellite Times*, 1996, V. 2, No. 5, pp. 80–81.
14. Patt F. S., Gregg W. W., Exact closed-form geolocation algorithm for Earth survey sensors, *Intern. J. Remote Sensing*, 1994, V. 15, No. 18, pp. 3719–3734, DOI: 10.1080/01431169408954354.
15. Rosborough G. W., Baldwin D. G., Emery W. J., Precise AVHRR image navigation, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1994, V. 32, pp. 644–657, DOI: 10.1109/36.297982.
16. Vallado D. A., Crawford P. S., Hujsak R., Kelso T. S., Revisiting spacetrack report #3, *AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conf.*, AIAA, 2006, 94 p., DOI: 10.2514/6.2006-6753.
17. Wessel P., Smith W. H. F., A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, V. 101, No. B4, pp. 8741–8743, DOI: 10.1029/96JB00104.