Верификация, обновление и использование спутникового бесшовного покрытия в практических задачах

А. И. Алексанин[1,3], М. Г. Алексанина[1,3], С. М. Краснопеев[2], М. А. Морозов[1], Е. В. Фомин[1]

[1] *Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, 690041, Россия*
E-mail: aleks@iacp.dvo.ru
[2] *Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, 690041, Россия*
[3] *Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 690922, Россия*

Решение многих практических задач, связанных с мониторингом поверхности Земли по изображениям, получаемым с различных мобильных платформ, предполагает знание о точной географической привязке изображений. Решением проблемы может быть географическая привязка изображений по единому хорошо верифицированному бесшовному покрытию. Предоставленное Научным центром оперативного мониторинга Земли бесшовное покрытие всей страны, построенное по изображениям с космических аппаратов серии «Канопус-В», позволяет устранить подобную проблему. Была проведена верификация покрытия юга Приморского края на основе реперных точек, полученных с помощью высокоточного геодезического оборудования. Средняя точность привязки оказалась около 5 м с максимальными ошибками в лесистой малонаселённой местности, имеющей значительные перепады высот рельефа. Предложена технология обновления бесшовного покрытия за счёт использования метода автоматического совмещения изображений с изображениями со спутников «Ресурс-П». Она позволяет улучшить пространственное и яркостное разрешение покрытия с сохранением исходной точности географической привязки. Несмотря на временную разницу между совмещаемыми изображениями в несколько лет, несовпадение сезонов съёмок и значительные различия в пространственном разрешении, предоставленное бесшовное покрытие продемонстрировало высокий потенциал для совмещения изображений как с космических аппаратов «Ресурс-П», так и с беспилотных летательных аппаратов. Приведено сравнение бесшовного покрытия с отдельными фрагментами ортотрансформированных географически привязанных изображений приборов Геотон-Л1 спутников «Ресурс-П» и глобального покрытия компании Maxar Technologies inc. Рассмотрены возможности подпиксельной географической привязки изображений спутников «Канопус-В» с целью обновления бесшовного покрытия и повышения точности его географической привязки.

Ключевые слова: спутниковое бесшовное покрытие НЦ ОМЗ, географическая привязка изображений, мониторинг поверхности Земли, БПЛА

Одобрена к печати: 11.08.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-121-135

Введение

Развитие автоматических робототехнических средств мониторинга различных объектов и доставки грузов обуславливает актуальность решения задачи геолокации изображений, получаемых с различных мобильных платформ. В частности, использование высоко-детальных географически привязанных спутниковых изображений для совмещения с ними изображений с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) остаётся нерешённой проблемой (Gong et al., 2024). Предварительная обработка изображений с БПЛА при слабой изменчивости рельефа местности успешно решается (Ташлинскийи др., 2026). Основная сложность заключается в идентификации пространственной структуры на разномасштабных изображениях, снятых в разное время и в разных спектральных диапазонах.

Для пространственных изображений с БПЛА можно использовать высокодетальные, хорошо географически привязанные ортотрансформированные спутниковые композиционные изображения поверхности Земли. Подразделение геологической службы США (*англ.*

United States Geological Survey — USGS) EROS (*англ.* Earth Resources Observation and Science) и Европейское космическое агентство (*англ.* European Space Agency — ESA) работают вместе над гармонизацией своих продуктов обработки спутниковых изображений для обеспечения их согласованности по пространству и времени (Rengarajan et al., 2020, 2024; Storey et al., 2014) на суше. Используются данные спутников Landsat и Sentinel-2 в видимом и инфракрасном спектральных диапазонах. Методика построения высокоточной географической привязки таких бесшовных композиционных покрытий, очищенных от влияния облачности, применяет следующие основные технологии.

Используется географическая привязка изображений по орбитальным данным. Применяется подход, разработанный для привязки изображений низкого пространственного разрешения с метеорологических полярно-орбитальных спутников (Brunel, Marsouin, 2000). На основе модели движения спутника по орбите SGP4 и геоида Земли WGS84, а также точной модели работы сканера рассчитываются географические координаты каждого пикселя. Параметры моделей уточняются посредством минимизации рассогласований между автоматически определяемыми на изображениях положениями реперных точек и их модельными значениями. В качестве реперных точек обычно выбираются особенности береговой черты морей и озёр. Наиболее сложная часть подхода — это расчёт углов положения пикселя относительно надира. Для изображений с полярно-орбитальных спутников километрового пространственного разрешения требуется точность около миллирадиана, для геостационарных с тем же пространственным разрешением — 0,02 мрад. В работе (Storey et al., 2014) показана возможность добиться точности близкой к пиксельной для спутника Landsat-8 (пространственное разрешение панхроматического канала — 15 м). В данном случае реперные точки берутся на географически привязанных с высокой точностью референсных изображениях (*англ.* Global Reference Image). Их положения на привязываемом изображении находятся с помощью меры сходства, такой как нормализованная кросс-корреляция. При этом учитывается рельеф местности. Для получения субпиксельной точности географической привязки применяется аппроксимация поверхности полиномом второго порядка с целью уточнения положения реперных точек.

Продукты обработки изображений с разных спутников, например Landsat и Sentinel-2, не совпадают с пиксельной точностью, так как используются разные референсные изображения. Поэтому делается гармонизация продуктов так, чтобы пространственные рассогласования положений реперных точек не превышали заданной величины (Rengarajan et al., 2024). Для этого рассчитывается критерий CE90 — радиус круга, в который укладывается 90 % оценок положения реперных точек при их расчёте по серии географически привязанных по данной технологии изображений. Критерий даёт относительные рассогласования положений реперных точек, но не абсолютные. Вопрос получения абсолютных ошибок для конкретной местности остаётся открытым.

В рамках национальной программы «Цифровая экономика» Роскосмосом реализуется проект «Цифровая Земля» (Заичко и др., 2019). Проект посвящён созданию информационной системы, позволяющей обеспечивать доступ потребителей к спутниковой информации и сервисам её тематической обработки. Концепция информационной системы базируется на создании единого сплошного многослойного динамического покрытия территории данными дистанционного зондирования Земли. Базовыми спутниками являются шесть спутников «Канопус-В», обеспечивающие регулярное наблюдение земной поверхности нашей страны. Подробная методика построения единого сплошного многослойного динамического покрытия приведена в работе (Марков и др., 2020). Географическая привязка изображений осуществляется по реперным точкам, для отбора которых применяется уже созданное покрытие, предоставляемое PlanetLabs (пространственное разрешение 3 м), точность геодезической привязки которого не хуже 10 м. Используется также доступный рельеф местности. Разработаны процедуры контроля точности пространственной привязки изображений (Васильев, Соколов, 2025). Следует отметить, что применение методики трудоёмко. Значительное количество времени обработки проходит с участием оператора, основная функция которого — обнаружение реперных точек на изображении, совмещаемом с отсчёт-

ным (референсным). Для хорошего совмещения требуется плотная сеть точек, которых может и не быть, особенно на заснеженных участках.

В настоящее время подразделениями Роскосмоса реализованы две технологии построения бесшовного покрытия (Марков и др., 2024; Федоткин и др., 2025). К началу 2025 г. было доступно только одно покрытие за летний сезон, созданное для всей территории России (Марков и др., 2024). Это позволяло протестировать его на территории Приморского края. Решались две задачи: оценка точности географической привязки бесшовного покрытия и возможность его использования для пространственной привязки изображений с БПЛА.

Используемые данные и методики

Для сравнения применялись фрагменты бесшовного покрытия в проекции сферический Меркатор (пространственное разрешение около 2 м), предоставленное Научным центром оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) Роскосмоса. Ранее с помощью высокоточного геодезического оборудования была измерена 41 реперная точка. Точность измерения 5–10 см. В качестве реперных точек (опознаков), подлежащих измерению, подбирались точки, хорошо идентифицируемые на изображениях, полученных приборами Геотон-Л1 космических аппаратов «Ресурс-П». Это могут быть центры колодцев, углы инфраструктурных объектов и т. п. (*рис. 1*).



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Примеры реперных точек: *а*, *в* — на местности; *б*, *г* — на ортокорректированных изображениях Геотона-Л1

Невысокое пространственной разрешение бесшовного покрытия и недостаточное яркостное разрешение (только 8 бит на пиксель конкретного спектрального канала), а также значительные временные рассогласования между датами создания бесшовного покрытия и измерениями делали затруднительным определение положения реперной точки с пиксельной точностью. С целью уточнения положения реперной точки для данного измерения использовались ортотрансформированные изображения спутников «Ресурс-П» № 1, 2.

При построении ортотрансформированных изображений (ортомозаики) использовалась гидрологически корректная цифровая модель рельефа Airbus Defense and Space WorldDEM4Ortho с пространственным разрешением 24 м и вертикальной точностью 4 м. Данная цифровая модель рельефа создавалась посредством интерферометрической обработки радарной съёмки космическими аппаратами TerraSAR-X и TanDEM-X. Доступ к её загрублённой версии был предоставлен в 2018 г. пользователям программного обеспечения ArcGIS for Desktop, находящимся на активной технической поддержке. Исключением была цифровая модель рельефа острова Русский, которая строилась самостоятельно с использованием результатов топосъёмки местности. При проведении ортокоррекции изображений применялись также упомянутые реперные точки. Ортомозаика строилась по изображениям Геотона-Л1 за 2017–2020 гг.

Ортокоррекция выполнялась в среде цифровой фотограмметрической станции Фотомод для семи изображений спутников «Ресурс-П» № 1, 2 уровня стандартной обработки 1А. Зенитный угол съёмки космических аппаратов варьировался от 5 до 29°. Расхождения на реперных точках не превышали 0,8 м (1–2 пикселя панхроматического изображения).

Для верификации бесшовного покрытия была выбрана область, ограниченная южными районами Приморского края, включающими районы городов Владивостока, Уссурийска, а также восточное побережье Уссурийского залива (*рис. 2*).

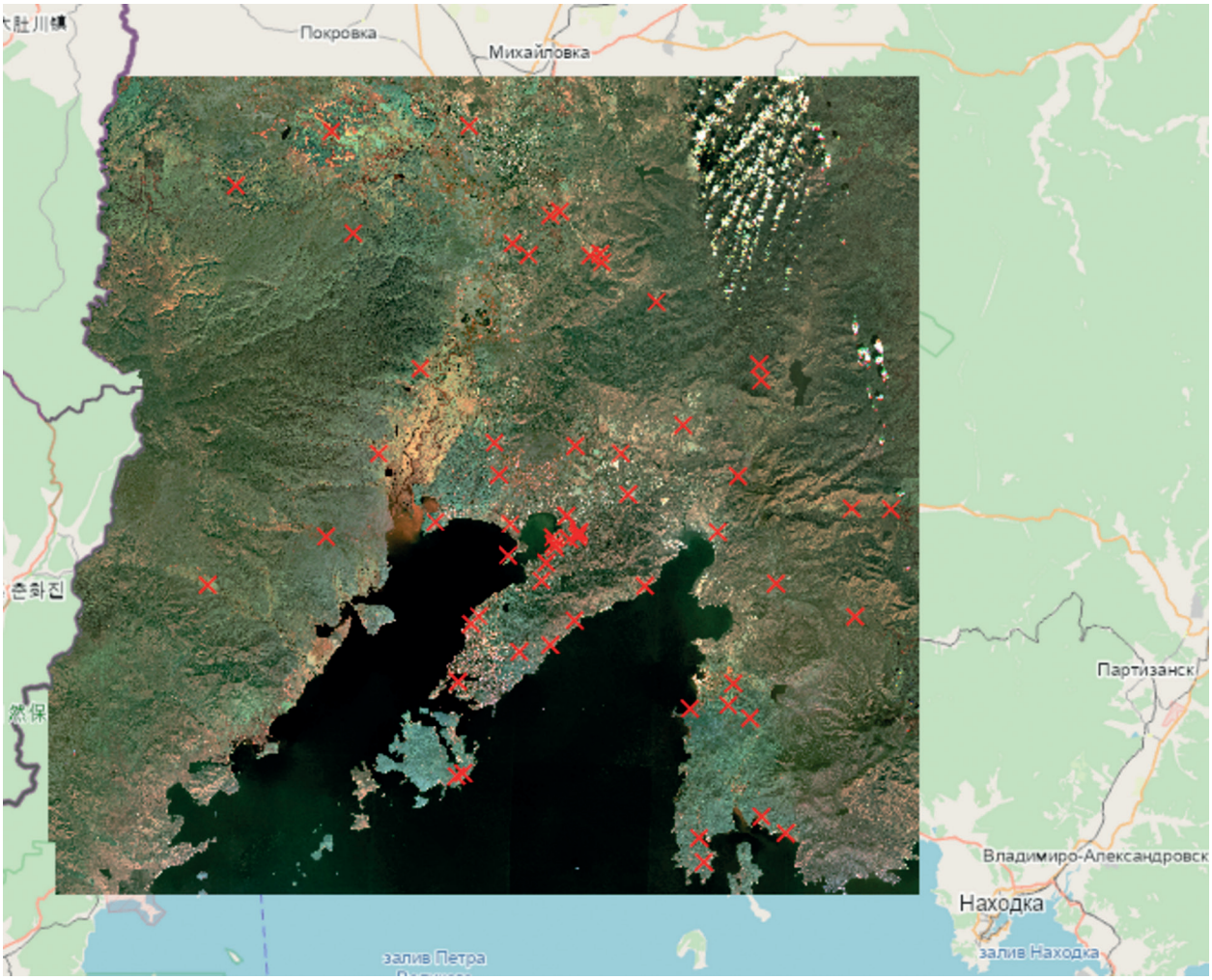
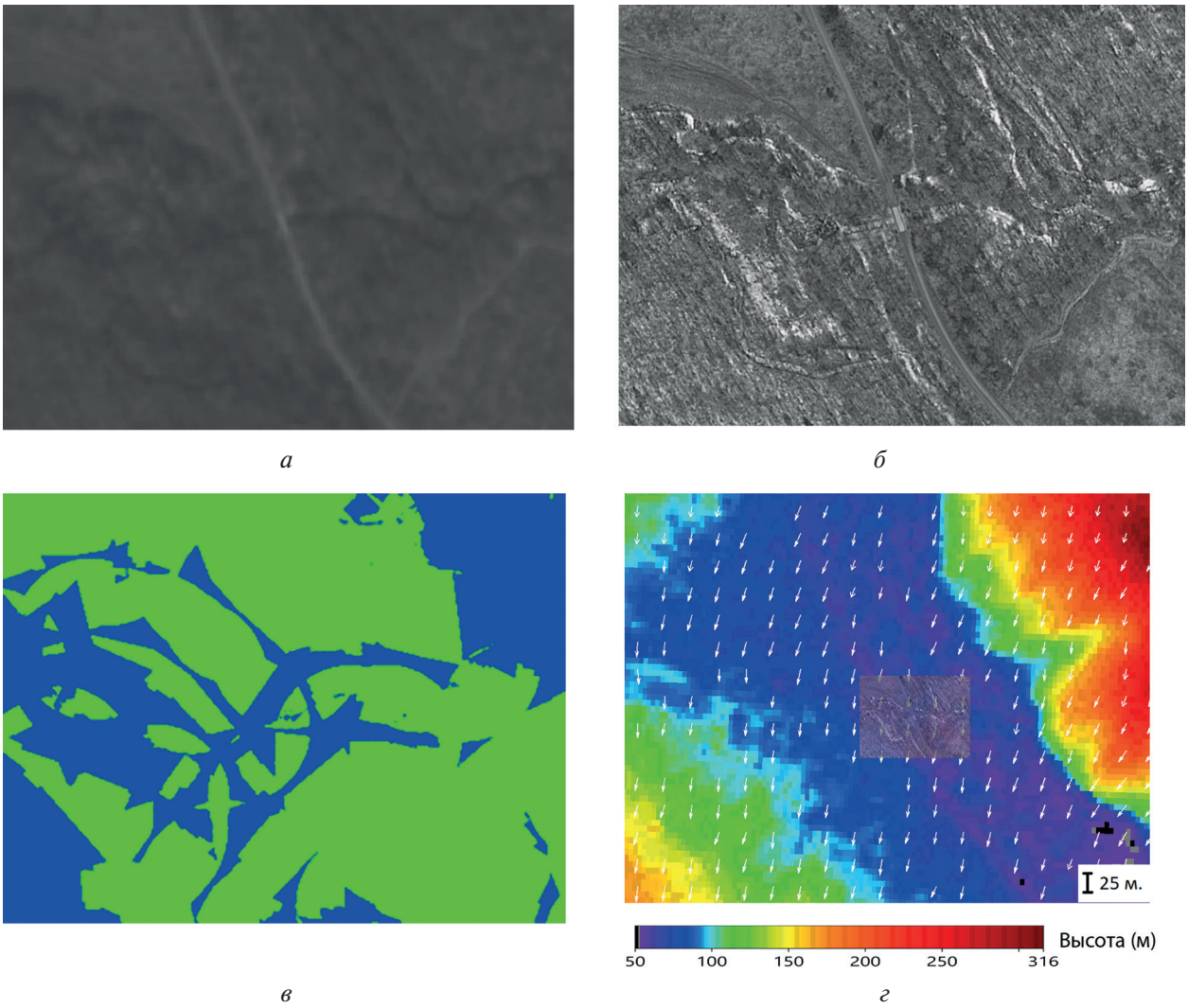


Рис. 2. Карта юга Приморского края с нанесённым бесшовным покрытием и положения реперных точек

Для пространственной привязки изображений со спутников и БПЛА использовался разработанный метод совмещения изображений с заданной точностью (Алексанин и др., 2018). Метод совмещает панхроматическое корректируемое изображение с соответствующим референсным посредством автоматического нахождения оптических неоднородностей на референсном изображении и их образов на совмещаемом. Рассогласование географических координат найденных неоднородностей задаёт вектор сдвижки. Строится карта точности совмещения. Точность совмещения пикселя рассчитывается при условии нахождения в его окрестности заданного размера необходимого количества векторов сдвижки. Метод работает по схеме алгоритма SURF (Bay et al., 2008), но имеет следующие особенности. Применяется новый алгоритм идентификации реперных точек на основе произвольных неоднородностей яркости, что позволило многократно увеличить число выделяемых реперных точек для различных типов местности. Используется три типа дескрипторов реперных точек в зависимости от качества сравниваемых изображений. Реперные точки двух небольших фрагментов изображений должны преобразовываться друг в друга аффинным преобразованием с заданной точностью. Несоответствующие преобразованию вектора отфильтровываются. Число векторов в окрестности конкретного пикселя должно при усреднении надёжно пода-

влять случайную ошибку их расчёта, обусловленную неточностью совпадений дескрипторов. Величина стандартного отклонения отобранных векторов от аффинного преобразования считается ошибкой совмещения в заданном пикселе. На *рис. 3* приведён пример работы метода. Фрагмент бесшовного покрытия (см. *рис. 3а*) автоматически совмещается с фрагментом ортотрансформированного изображения спутника «Ресурс-П» (см. *рис. 3б*), предварительно огрублённого до пространственного разрешения фрагмента бесшовного покрытия с заданной точностью (1 пиксель референсного изображения). После совмещения новые координаты пикселей переносятся на трансформированный фрагмент с исходным пространственным разрешением (0,7 м в данном случае) и строится карта точности совмещения (см. *рис. 3в*) в размерах пикселей референсного изображения (бесшовного покрытия). Зелёным цветом выделены участки, где точность совмещения не более одного пикселя, синим — где оценить точность не представляется возможным. При совмещении фрагментов с реперными точками использовались площадки ортомозаики с линейным размерном не более километра.



а *б* *в* *г*

Рис. 3. Фрагмент бесшовного покрытия (лесистая местность Шкотовского района) (*а*), совмещённый с бесшовным покрытием фрагмент ортотрансформированного изображения прибора Геотон-Л1 (*б*), карта точности совмещения (*в*), карта рельефа местности в окрестности фрагмента (серый квадрат) с нанесёнными векторами смещений (*г*)

Метод работает в двух режимах. Для верификации бесшовного покрытия используется первый режим, когда два изображения совмещаются друг с другом аффинным преобразованием. Здесь совмещаются ортотрансформированные изображения, построенные с учётом

рельефа местности. Если трансформирование проведено корректно, то такие изображения будут совмещаться аффинным преобразованием с пиксельной точностью. Области, где вектора смещений не будут соответствовать аффинному преобразованию, покажут неточности ортотрансформации. Это часто связано с неточностью используемого рельефа местности. В частности, такое совмещение на фрагментах изображений морского льда (плоские изображения) позволило показать отсутствие значимых аберраций съёмочных камер спутников «Ресурс-П» и «Канопус-В» (Алексанин и др., 2019). Совмещение ортотрансформированных изображений с помощью аффинного преобразования должно позволять обновлять бесшовное покрытие даже в местах, где из-за изменчивости местности невозможно найти вектора совмещения на части изображения. Второй режим работы метода — это нелинейное совмещение изображений. Он позволяет совмещать с заданной точностью только те участки, где удаётся построить карту точности. Этот режим использовался для совмещения бесшовного покрытия с изображениями с БПЛА. Задача обновления и улучшения покрытия на основе таких изображений не рассматривалась, так как требует разработки специальных технологий.

При расчёте точности географической привязки бесшовного покрытия использовалось два вида оценок. Визуальная оценка положения реперной точки на бесшовном покрытии, которая позволила распознать 34 реперных точки. И положения реперных точек, которые были распознаны на ортотрансформированных изображениях спутников «Ресурс-П», совмещённых автоматически с бесшовным покрытием. В последнем случае точность расчёта оценивалась для всех реперных точек.

Устанавливалась также возможность использования бесшовного покрытия для пространственной привязки изображений с БПЛА. Были проведены съёмки острова Русский (Японское море). Изображения сделаны камерой M3E (12,29 мм) в период с октября (на деревьях ещё присутствовала листва) по декабрь (листвы уже не было) 2024 г. Высота съёмки была небольшой — не более 500 м. При совмещении использовались ортофотомозаики, построенные по результатам, полученным с БПЛА. В процессе совмещения RGB-изображения преобразовывались в панхроматические, в основном по стандартной формуле:

$$I = 0{,}299\mathrm{R} + 0{,}587\mathrm{G} + 0{,}144\mathrm{B}, \qquad (1)$$

где I — яркость пикселя панхроматического изображения, а R, G и B — яркость соответствующих пикселей красного, зелёного и голубого каналов. Для совмещения изображений разных сезонов веса каналов преобразования подбирались оптимально так, чтобы было максимальное число корректных построенных векторов трансформации.

Оценка точности координатной привязки бесшовного покрытия

В районах городов Владивостока и Уссурийска достаточно много реперных точек с хорошо определёнными координатами, что показало довольно высокую точность координатной привязки покрытия. Наиболее сложной областью для построения бесшовного покрытия считается район восточного побережья Уссурийского залива, где мало населённых пунктов, область в основном покрыта лиственным лесом и присутствует значительная изменчивость рельефа (перепады в несколько сотен метров на дистанциях в несколько километров).

Результаты оценки точности бесшовного покрытия приведены в *таблице*. Во втором столбце указан идентификатор реперной точки и соответствующего фрагмента. В третьем — приведены смещения реперных точек, которые были оценены для ортотрансформированных изображений спутников «Ресурс-П». В четвёртом столбце указаны смещения положений реперных точек, найденных экспертом на бесшовном покрытии. В пятом — приведены смещения, получившиеся при автоматическом совмещении фрагмента ортотрансформированного изображения с бесшовным покрытием. Это разность между положением реперной точки на исходном фрагменте ортотрансформированного изображения и новым положением, получившимся в результате его совмещения с бесшовным покрытием. В шестом столбце дана оценка точности совмещения окрестности пикселя, пришедшегося на реперную точку. Отсутствие значения означает, что окрестность пикселя не была найдена автоматически на бесшовном покрытии (обычно из-за значительного изменения местности или условий съёмки).

Оценки смещений положений реперных точек

№	Идентификатор реперной точки	Смещения на ортомозаике (м)	Смещения на бесшовном покрытии (оценки эксперта)	Смещения, рассчитанные автоматически (м)	Точность совмещения фрагментов (м)
1	К52011Гг_002	0,7–1,4	4,09	5,37	0,44
2	К52012Бг_001	0,7–1,4	8,70	7,28	0,44
3	К52012Вг_002	0,7–1,4	–	1,97	0,44
4	К52012Гг_002	0,7–1,4	4,69	4,41	0,44
5	К52012Гг_003	1,4	–	3,25	0,44
6	К52024Бв_001	0,7	2,97	2,96	–
7	К52024Вг_006	0,7–1,4	–	3,13	0,44
8	К52024Гб_002	0,7	6,22	6,19	0,44
9	К52024Гг_006	0,7–1,4	3,26	2,69	0,44
10	К52035Бг_002	0,7	6,88	6,69	0,44
11	К52036Ба_004	0,7	0,89	0,87	0,44
12	К52036Бб_004	0,7	1,81	4,04	–
13	К52036Бб_005	0,7–1,4	8,10	1,16	0,48
14	К52036Бг_001	0,7–1,4	–	4,34	0,44
15	К52036Бг_002	0,7	–	4,05	0,44
16	К52048Бб_002	0,7	6,09	5,50	0,44
17	К53013Аб_001	0,7–1,4	12,25	12,25	0,44
18	К53013Бг_002	0,7–1,4	18,59	19,75	–
19	К53013Бг_003	0,7–1,4	21,97	22,21	0,44
20	К53013Ва_001	1,4–2,1	5,79	7,51	0,44
21	К53013Га_003	0,7–1,4	8,83	9,14	0,44
22	К53013Гг_001	1,4–2,1	3,14	3,80	0,44
23	К53014Вв_001	0,7	2,37	2,29	–
24	К53014Вг_001	0,7–1,4	6,78	6,06	0,44
25	К53025Аа_001	0,7	1,82	1,91	0,44
26	К53025Аа_002	0,7–1,4	1,58	1,55	0,44
27	К53025Аа_003	0,7–1,4	–	0,75	0,44
28	К53025Аа_005	0,7–1,4	4,73	4,19	0,44
29	К53025Аа_006	0,7–1,4	5,71	6,09	0,44
30	К53025Аа_007	0,7–1,4	6,24	5,35	0,44
31	К53025Аа_009	0,7–1,4	4,00	3,12	0,44
32	К53025Аа_010	0,7–1,4	–	3,75	0,44
33	К53025Ав_002	0,7–1,4	3,96	6,19	0,44
34	К53025Аг_001	0,7	10,08	10,68	0,44
35	К53025Ба_001	0,7–1,4	7,53	7,09	–
36	К53025Ва_001	0,7–1,4	0,61	0,89	0,44
37	К53025Гб_008	0,7–1,4	3,90	3,49	0,44
38	К53025Гв_003	0,7–1,4	6,20	5,63	0,44
39	К53025Гг_001	0,7–1,4	3,47	4,12	0,44
40	К53025Гг_002	0,7–1,4	6,52	6,40	0,44
41	К53026Ав_002	0,7–1,4	3,05	3,74	0,44

Эксперт нашёл 34 реперные точки на бесшовном покрытии. У ненайденных точек в четвёртом столбце стоит прочерк. Среднее рассогласование по оценкам эксперта составило 5,90 м. Временные рассогласования совмещаемого изображения с бесшовным покрытием могут превышать несколько лет, за которые меняются характеристики не только реперных точек, но и ландшафт. На тех же данных алгоритм автоматического совмещения получил рассогласование 5,92 м. При исключении двух точек-выбросов средняя ошибка составляет около 5 м. Если сравнить смещения, установленные ручным и автоматическим способом, то наблюдается их близость. Среднее рассогласование смещений оказалось равно –0,06 м, что указывает на отсутствие существенных систематических отклонений. Стандартное отклонение имело значение 1,5 м, что не превышает пространственного разрешения бесшовного покрытия. На точках, положения которых эксперт не смог распознать на изображении, а алгоритм рассчитал, рассогласования составили около 3 м.

Следует отметить, что часть автоматически рассчитанных положений реперных точек соответствуют областям, где в окрестностях реперных точек не было исходных векторов смещений, т. е. окрестности не были похожи друг на друга. Тем не менее смещения реперных точек, полученные совмещением всего фрагмента, лежат в пределах 5 м.

Наибольшее рассогласование было обнаружено на одном фрагменте и составило около 20 м на двух реперных точках. На *рис. 3г* приведён этот фрагмент. Это небольшой лесистый участок в долине, обрамлённой сопками с перепадами высот до 250 м. Из возможных реперных точек, которые можно было бы уверенно распознать на референсном изображении при построении бесшовного покрытия — это небольшой мостик через речку. Ещё две точки наземных измерений, где рассогласования были больше 10 м, расположены также в лесистой местности со значительными перепадами высот.

Использование бесшовного покрытия для географической привязки изображений с БПЛА

Построение спутникового бесшовного покрытия представляет собой трудоёмкую и дорогостоящую процедуру. Спутниковое изображение имеет довольно грубое пространственное разрешение, обусловленное исходным пространственным разрешением, и строится не часто. Но оно хорошо географически привязано. Имеющееся программное обеспечение позволяет его автоматически обновлять. Лучшее пространственное разрешение дают БПЛА. Аэрофотосъёмка с БПЛА может быть использована для обновления бесшовного покрытия и улучшения пространственного разрешения до 5–10 см. С этой целью были проведены некоторые эксперименты.

Оценивались возможности обновления бесшовного покрытия при разных условиях наблюдения. В первом эксперименте совмещалось изображение с БПЛА за 24 октября 2024 г. с изображением со спутника «Канопус-В» за 16 октября 2024 г. (*рис. 4а*). Строилась карта точности расчётов смещений в пикселях изображения спутника «Канопус-В». Синим цветом обозначаются области, где оценить априорно точность совмещения не удаётся. Изображения были получены за один и тот же сезон с небольшими временными различиями. Карта точности показывает подпиксельную точность совмещения для всего изображения с БПЛА (в углах изображения точность не оценивалась, так как окрестности пикселей в этих областях включали значительное количество «пустого» пространства).

На *рис. 4в*, *г* приведены результаты совмещения того же изображения с БПЛА, но уже с бесшовным покрытием. Временное рассогласование между совмещаемыми изображениями было в несколько лет (от 5 до 8), но сезоны совпадали. Местность изменилась как за счёт растительности, так и из-за строительных работ. Большая часть площади позволяет получить вектора трансформации с подпиксельной точностью (в пикселях бесшовного покрытия). Но на значительной площади точность неудовлетворительная или вектора отсутствуют. Но если построить по изображению с БПЛА ортотрансформированное изображение, то аффинным преобразованием можно было бы совместить такое изображение с бесшовным покрытием по всей площади и получить приемлемую точность.

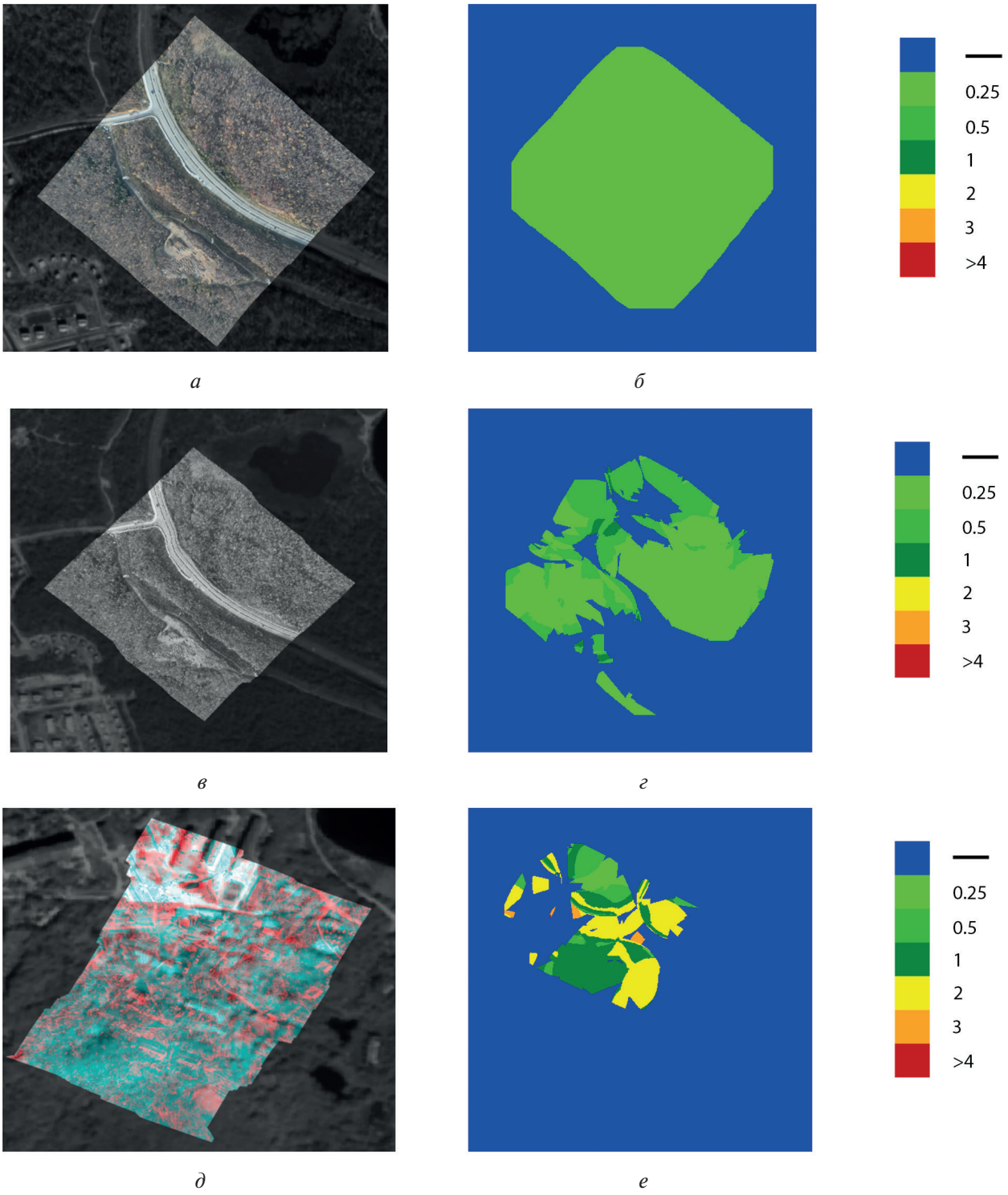


Рис. 4. RGB-изображение с БПЛА за 24.10.2024, наложенное на панхроматическое изображение спутника «Канопус-В» № 6 за 16.10.2024 (*а*); карта точности совмещения (*б*); то же изображение с БПЛА, наложенное на бесшовное покрытие (*в*), с соответствующей картой точности (*г*); преобразованное RGB-изображение с БПЛА за 24.12.2024, наложенное на бесшовное покрытие (*д*), с соответствующей картой точности (*е*)

Существенная проблема заключается в совмещении изображений, полученных в разные сезоны. Векторов трансформации, имеющих приемлемую точность совмещения, крайне мало. Однако преобразование RGB-изображения с БПЛА в полутоновое по формуле (1) с другими весовыми коэффициентами позволяет решать эту проблему. Оптимальна подгонка

весовых коэффициентов осуществляется посредством достижения максимального количества корректных векторов сдвижки. На *рис. 4д*, *е* приведён такой пример нелинейной трансформации с соответствующей картой точности. На бесшовное покрытие нанесено RGB-изображение с получившимися весами. Можно отметить, что оно значительно отличается от естественного сочетания весов.

Обсуждение

Приведённые оценки применимости бесшовного покрытия при решении различных задач позволяют сделать следующие выводы. Несмотря на то, что покрытие сделано на основе данных спутников «Канопус-В» с пространственным разрешением панхроматического канала около 2 м, точность географической привязки (среднее отклонение реперных точек) довольно высокая — около 5 м. При этом наиболее значительные ошибки географической привязки, как и ожидалось, наблюдаются в лесистой малонаселённой местности со значительными перепадами высот рельефа. Автоматическое совмещение фрагментов ортотрансформированных изображений, построенных по данным приборов Геотон-Л1, с последующим расчётом положения реперных точек не уступает по точности обнаружения точек экспертом. Такой расчёт возможен даже при сложностях идентификации реперной точки на бесшовном покрытии из-за временной разницы между изображениями в несколько лет.

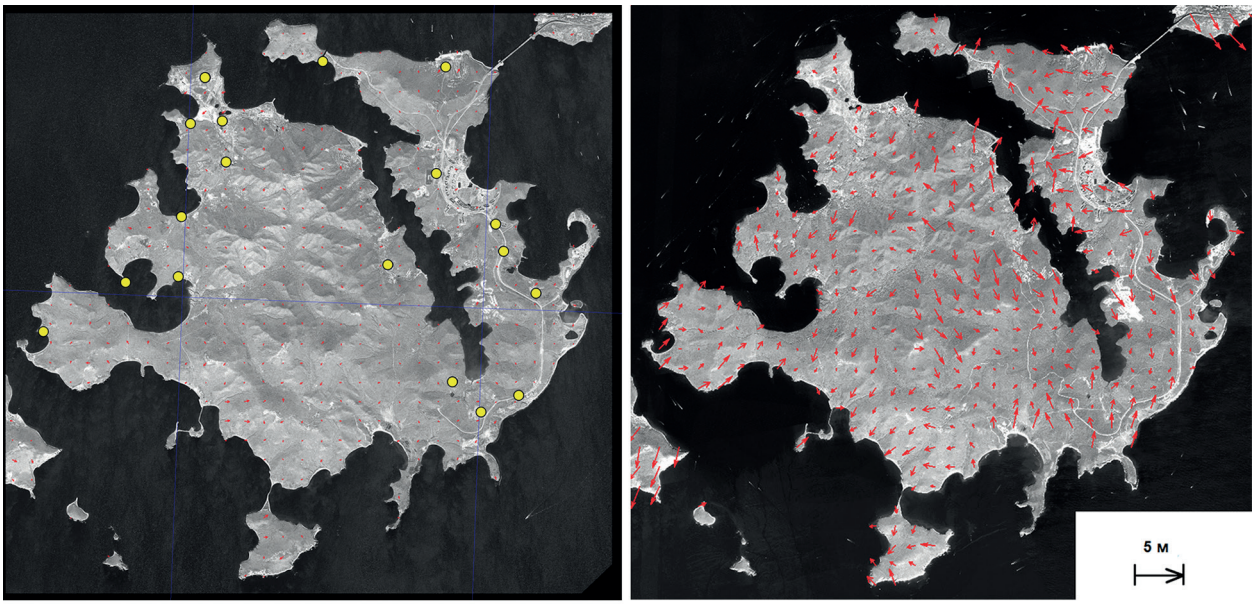
Для оценки использования метода автоматического совмещения изображения с целью обновления и коррекции бесшовного покрытия был проведён следующий эксперимент. Был взят фрагмент бесшовного покрытия и фрагмент ортотранформированного изображения острова Русский, построенного по данным спутника «Ресурс-П» № 2 за 9 апреля 2017 г. с зенитным углом съёмки около 6° и пространственным разрешением около 70 см. Из числа реперных точек, использовавшихся для ортокоррекции всего изображения со спутника «Ресурс-П», только две точки располагались на территории острова Русский. Помимо них имелось ещё 15 точек на острове Русский, которые применялись для оценки точности географической привязки ортотрансформированного изображения. Среднее рассогласование этих реперных точек с их положениями на изображении острова было около 60 см, максимальное — не превышало 1 м. Для анализа результатов автоматического совмещения использовался аналогичный фрагмент глобального покрытия от компании Maxar Technologies Inc. с пространственным разрешением около 1 м (https://hub.arcgis.com/datasets/esri::world-imagery/explore?location=-0.000000%2C0.000000%2C2.09&showTable=true).

Совмещение изображения спутника «Ресурс-П» № 2 с изображением компании Maxar (*рис. 5а*) показало линейное смещение всей сцены около 5 м (точность абсолютной географической привязки). Усреднённые вектора смещений, после вычитания из них смещений, вызванных аффинным преобразованием, показывают нелинейные рассогласования, обусловленные в основном неточностями рельефа местности. Усреднение проводилось в окрестности пикселей сетки с размером не более 100×100 пикселей с подавлением случайного шума до величины, не превышающей размер пикселя референсного изображения. В местах, где усреднённых векторов нет, их либо не было, либо не было гарантии совмещения с точностью до размера пикселя. Можно отметить, что максимальные нелинейные смещения не превосходят 1 м (точность относительной привязки).

При совмещении изображения со спутника «Ресурс-П» с бесшовным покрытием смещение всей сцены составило около 7 м (точность абсолютной географической привязки). На *рис. 5б* приведены усреднённые вектора нелинейных рассогласований совмещённых изображений бесшовного покрытия и глобального покрытия компании Maxar. Можно отметить максимальные рассогласования в 5–6 м (максимальная ошибка относительной привязки) в районе гор с высотой около 300 м.

Использование изображений с БПЛА для их географической привязки по бесшовному покрытию также возможно несмотря на многократное расхождение изображений по пространственному разрешению. Совмещение изображений с БПЛА со спутниковым изобра-

жением при небольшой временной разнице в съёмках не вызывает проблем. При временном рассогласовании в несколько лет провести совмещение также возможно. Метод совмещения находит достаточное количество векторов трансформации, чтобы оценить положение снимка на бесшовном покрытии. Это может позволить на основе точного рельефа местности в данном районе провести ортотрансформацию с последующим совмещением с бесшовным покрытием и его обновлением на основе данных БПЛА.



а *б*

Рис. 5. Фрагмент ортотрансформированного изображения острова Русский со спутника «Ресурс-П», вектора нелинейных рассогласований с фрагментом глобального покрытия компании Maxar и положения использованных реперных точек (*а*); фрагмент бесшовного покрытия и вектора нелинейных рассогласований с фрагментом ортотранформированного изображения со спутника «Ресурс-П» (*б*)

Технологии построения Роскосмосом единого сплошного многослойного динамического покрытия используют устоявшиеся подходы. К основным недостаткам таких технологий можно отнести следующие. Для построения покрытия нужны проверенные реперные точки и хорошо привязанные референсные изображения. И даже при наличии спутниковых данных с пространственным разрешением в 30 см точность географической привязки лучших на сегодня глобальных покрытий составляет несколько метров. Используемая информация для построения сплошного покрытия устаревает и требует постоянного обновления, что связано с большим количеством ручной работы. А что делать с местностью, где нет проверенных реперных точек? Как контролировать географическую привязку над морем, над движущимися ледниками, в областях катастроф, приводящих к изменению ландшафта? Это тупиковая и трудоёмкая технология.

Возможна альтернатива, основанная на процедурах прогноза абсолютной географической привязки. Географическую привязку можно делать по орбитальным данным (Storey et al., 2014) и модели сканирующей системы на основе автоматического распознавания реперных точек на изображении. Но географическую привязку с пиксельной точностью нужно делать с прогнозом изменчивости её параметров вдоль траектории полёта. Для метеорологических спутников, как геостационарных, так и полярно-орбитальных, прогноз работает (Катаманов, 2012, 2016) на несколько дней. Для этого к моделям движения добавляются стационарные функции поправок, постоянные в случае полярно-орбитальных спутников для заданной трассы. Технология используется в оперативной работе Спутникового центра ДВО РАН с 2005 г. и проверена на десятке спутников.

В настоящее время совмещать изображения можно с подпиксельной точностью. Так, например, совмещения изображений спутников Landsat возможно с точностью в 3–6 м по критерию CE90 (Rajagopalan et al., 2024; Storey et al., 2014) при пространственном разрешении изображений в 15 м. Такая технология рассчитывает положение спутника на орбите и углы сканирования каждого пикселя с подпиксельной точностью. В частности, проверка подобной технологии была проведена в Спутниковом центре ДВО РАН посредством переноса параметров географической привязки, полученной по изображениям радиометра МСУ-МР (километровое разрешение), на изображения прибора КМСС того же спутника (камера МСУ-100 с пространственным разрешением 60 м). Перенос показал, что погрешность привязки лежит в пределах 2–5 пикселей изображений МСУ-100М (Катаманов и др., 2018), т. е. точность подпиксельная. В свете возможностей прогноза географической привязки по орбитальным данным, изображения с космических аппаратов серии «Канопус-В» имеют одно неоспоримое достоинство. Основная масса съёмок соответствует длинным трекам, когда спутник летит без использования наведения камер на объект сканирования. В таком режиме технологии расчёта привязки с подпиксельной точностью и её прогноза будут работать. Точные модели сканирования для этого уже построены (технология АПОИ (Федоткин и др., 2025)). Для произвольной местности изображения с плоским рельефом должны автоматически привязываться с такой же точностью без использования реперных точек на основе предшествующих привязок. Поскольку на изображениях камер МСУ-100 и прибора Геотон-Л1 нелинейных аберраций не обнаружено (Алексанин и др., 2019), то неточности географической привязки на различных изображениях могут быть обусловлены только рельефом. Применяемый нами метод совмещения будет указывать проблемные места и необходимые корректирующие сдвижки. Поэтому можно надеяться получать абсолютную географическую привязку лучше, чем имеющиеся сейчас в мире. А использование БПЛА может улучшить пространственное разрешение бесшовного покрытия до фактически любого. Метод совмещения изображений для его использования в исследовательских и коммерческих целях интегрирован в качестве сервиса в Информационную систему обработки и поставки данных дистанционного зондирования Земли Роскосмоса.

Заключение

Протестированное бесшовное покрытие НЦ ОМЗ на примере юга Приморского края имеет среднюю точность географической привязки около 5 м. Наибольшие ошибки происходят в безлюдной местности со значительной изменчивостью рельефа. Используемый метод совмещения изображений позволяет автоматически привязывать на основе покрытия как спутниковые изображения, так и изображения с БПЛА без потери точности привязки. Такая географическая привязка возможна даже при несовпадении пространственного разрешения, сезона съёмки и рассогласования в несколько лет.

Рассматриваются технологии обновления бесшовного покрытия, в том числе и с использованием изображений с БПЛА. На примере совмещения изображений острова Русский сравниваются бесшовное покрытие НЦ ОМЗ и глобальное покрытие компании Maxar Technologies Inc. Общей проблемой можно считать неточность абсолютной географической привязки. Обсуждаются возможности её решения за счёт процедуры прогноза автоматической привязки изображений с космических аппаратов «Канопус-В».

Работа выполнялась в рамках госбюджетного задания FWFW-2026-0008. Авторы выражают благодарность сотрудникам Национального центра оперативного мониторинга Земли за предоставленную возможность поработать с создаваемым бесшовным сплошным покрытием территории России.

Литература

1. *Алексанин А. И.*, *Краснопеев С. М.*, *Морозов М. А.*, *Фомин Е. В.* Совмещение изображений с российских спутников «Ресурс-П» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 18–28. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-18-28.
2. *Алексанин А. И.*, *Морозов М. А.*, *Фомин Е. В.* Проблемы совмещения изображений с пиксельной точностью // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 9–16. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-9-16.
3. *Васильев А. И.*, *Соколов С. М.* Верификация качества георефернцирования данных и информационных продуктов российских космических систем дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 3. С. 33–52. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-33-52.
4. *Заичко В. А.*, *Шведов Д. О.*, *Сизов О. С.* Особенности реализации проекта «Цифровая Земля» в Российской федерации // Дистанционное зондирование Земли из космоса в России. 2019. Вып. 2. С. 6–13.
5. *Катаманов С. Н.* Точная географическая привязка изображений геостационарного спутника MTSAT-1R в формате HRIT // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 97–105.
6. *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.
7. *Катаманов С. Н.*, *Алексанин А. И.*, *Громов А. В.* Точная географическая привязка изображений МСУ-МР и МСУ-100М спутника «Метеор-М» № 2 без использования целевых данных // Ракетно-косм. приборостроение и информац. технологии: тр. 9-й Всероссийской научно-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-косм. приборостроения и информац. технологий». М.: Российские космические системы, 2018. С. 91–105.
8. *Марков А. Н.*, *Васильев А. И.*, *Крылов А. В. и др.* Особенности обработки данных сенсора «Геотон-Л1» космического аппарата «Ресурс-П» при формировании бесшовных сплошных покрытий регионов РФ // Ракетно-косм. приборостроение и информац. системы. 2020. Т. 7. Вып. 1. С. 72–83. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2020.7.1.72.83.
9. *Марков А. Н.*, *Васильев А. И.*, *Крылов А. В. и др.* Технология создания бесшовного сплошного покрытия территории России по данным космических аппаратов «Канопус-В» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 97–115. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-97-115.
10. *Ташлинский А. Г.*, *Белов А. А.*, *Сафина Г. Л.* Преобразование серии снимков камеры БПЛА для совместной обработки со спутниковыми изображениями // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2026. Т. 23. № 1. С. 49–62. DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-49-62.
11. *Федоткин Д. И.*, *Боровенский Е. Н.*, *Сысенко Д. В.*, *Ядыкин А. В.* Результаты автоматического построения бесшовных паншарп-ортомозаичных покрытий на 12 субъектов РФ по данным с КА серии «Канопус-В» // Геопрофи. 2025. № 5. С. 24–31.
12. *Bay H.*, *Ess A.*, *Tuytelaars T.*, *Van Gool L.* Speeded-Up Robust Features (SURF) // Computer Vision and Image Understanding. 2008. V. 110. No. 3. P. 346–359. DOI: 10.1016/j.cviu.2007.09.014.
13. *Brunel P.*, *Marsouin A.* Operational AVHRR navigation results // Intern. J. Remote Sensing. 2000. V. 21. No. 5. P. 951–972. DOI: 10.1080/014311600210371.
14. *Gong N.*, *Li L.*, *Sha J. et al.* A satellite-drone image cross-view geolocalization method based on multi-scale information and dual-channel attention mechanism // Remote Sensing. 2024. V. 16. Article 941. DOI: 10.3390/rs16060941.
15. *Rengarajan R.*, *Storey J. C.*, *Choate M. J.* Harmonizing the Landsat ground reference with the Sentinel-2 global reference image using space-based bundle adjustment // Remote Sensing. 2020. V. 12. Article 3132. DOI: 10.3390/rs12193132.
16. *Rengarajan R.*, *Choate M.*, *Hasan M. N.*, *Denevan A.* Co-registration accuracy between Landsat-8 and Sentinel-2 orthorectified products // Remote Sensing of Environment. 2024. V. 301. Article 113947. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113947.
17. *Storey J.*, *Choate M.*, *Lee K.* Landsat 8 Operational Land Imager on-orbit geometric calibration and performance // Remote Sensing. 2014. V. 6. P. 11127–11152. DOI: 10.3390/rs61111127.

Verification, updating and use of satellite seamless coverage in practical applications

A. I. Aleksanin[1,3], M. G. Aleksanina[1,3], S. M. Krasnopeev[2], M. A. Morozov[1], E. V. Fomin[1]

[1] *Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia*
E-mail: aleks@iacp.dvo.ru
[2] *Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia*
[3] *Far Eastern Federal University, Vladivostok 690922, Russia*

Solving many practical problems related to monitoring the Earth's surface using images obtained from various mobile platforms requires precise georeferencing of the images. A solution to this problem could be georeferencing images using a single well-verified seamless coverage. The seamless coverage of the entire country constructed by Research Center for Earth Operative Monitoring on the basis of images from the Kanopus-V series of satellites is a solution to the problem. The coverage of the south of Primorsky Krai was verified based on reference points obtained with high-precision geodetic equipment. The average georeferencing accuracy was approximately 5 m, with maximum errors in forested, sparsely populated areas with significant elevation changes. A technology for updating the seamless coverage by automatically aligning images with images from Resurs-P satellites is proposed. This technology improves the spatial and brightness resolution of the coverage while maintaining the original georeferencing accuracy. Despite a time lag of several years between the combined images, mismatched survey seasons, and significant differences in spatial resolution, the resulting seamless coverage demonstrated a high potential for merging imagery from both Resurs-P satellites and unmanned aerial vehicles. A comparison of the seamless coverage with individual fragments of orthorectified georeferenced imagery from the Geoton-L1 instruments of the Resurs-P satellites and global coverage from Maxar Technologies Inc. is provided. The potential for subpixel georeferencing of Kanopus-V satellite images is explored to update the seamless coverage and improve its georeferencing accuracy.

Keywords: NC OMZ seamless satellite coverage, image georeferencing, Earth surface monitoring, UAV

Accepted: 11.08.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-121-135

References

1. Aleksanin A. I., Krasnopeev S. M., Morozov M. A., Fomin E. V., Superimposition of images from Russian Resource-P satellites, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 1, pp. 18–28 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-18-28.
2. Aleksanin A. I., Morozov M. A., Fomin E. V., The problems of image superimposition with one-pixel accuracy, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 1, pp. 9–16 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-9-16.
3. Vasilyev A. I., Sokolov S. M., Verification of georeferencing quality of data and information products of Russian remote sensing space systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 3, pp. 33–52 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-33-52.
4. Zaichko V. A., Shvedov D. O., Sizov O. S., Features of the "Digital Earth" project implementation in the Russian Federation, *Distantsionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa v Rossii*, 2019, Iss. 2, pp. 6–13 (in Russian).
5. Katamanov S. N., Accurate HRIT image navigation for geostationary satellite MTSAT-1R, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, V. 9, No. 2, pp. 97–105 (in Russian).
6. 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.
7. Katamanov S. N., Aleksanin A. I., Gromov A. V., Accurate geographic mapping of the MSU-MR and MSU-100M images of the Meteor-M satellite No. 2 without using target data, In: *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye tekhnologii: trudy 9-i Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Aktual'nye problemy raketno-kosmicheskogo priborostroeniya i informatsionnykh tekhnologii"* (Rocket

and Space Instrumentation and Information Technology: Proc. 9th All-Russian Scientific and Technical Conf. "Actual Problems of Rocket and Space Instrumentation and Information Technology"), Moscow: Rossiiskie kosmicheskie sistemy, 2018, pp. 91–105 (in Russian).
8. Markov A. N., Vasilyev A. I., Krylov A. V. et al., Generation of seamless continuous coverages of the Russian regions using Resurs-P very-high resolution data, *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2020, V. 7, Iss. 1, pp. 72–83 (in Russian), DOI: 10.30894/issn2409-0239.2020.7.1.72.83.
9. Markov A. N., Vasilyev A. I., Krylov A. V. et al., Technology for creating seamless continuous coverage of Russian territory based on Kanopus-V satellites data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 5, pp. 97–115 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-97-115.
10. Tashlinskii A. G., Belov A. A., Safina G. L., Conversion of a series of UAV camera images for joint processing with satellite images, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2026, V. 23, No. 1, pp. 49–62 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-49-62.
11. Fedotkin D. I., Borovenskii E. N., Sysenko D. V., Yadykin A. V., Results of automatic construction of seamless pansharp-orthomosaic coverings for 12 subjects of the Russian Federation based on data from the Kanopus-V series satellites, *Geoprofi*, 2025, No. 5, pp. 24–31 (in Russian).
12. Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L., Speeded Up Robust Features (SURF), *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, V. 110, No. 3, pp. 346–359, DOI: 10.1016/j.cviu.2007.09.014.
13. Brunel P., Marsouin A., Operational AVHRR navigation results, *Intern. J. Remote Sensing*, 2000, V. 21, No. 5, pp. 951–972, DOI: 10.1080/014311600210371.
14. Gong N., Li L., Sha J. et al., A Satellite-drone image cross-view geolocalization method based on multiscale information and dual-channel attention mechanism, *Remote sensing*, 2024, V. 16, Article 941, DOI: 10.3390/rs16060941.
15. Rengarajan R., Storey J. C., Choate M. J., Harmonizing the Landsat ground reference with the Sentinel-2 global reference image using space-based bundle adjustment, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, Article 3132, DOI: 10.3390/rs12193132.
16. Rengarajan R., Choate M., Hasan N., Denevan A., Co-registration accuracy between Landsat-8 and Sentinel-2 orthorectified products, *Remote Sensing of Environment*, 2024, V. 301, Article 113947, DOI: 10.1016/j.rse.2023.113947.
17. Storey J., Choate M., Lee K., Landsat 8 operational land imager on-orbit geometric calibration and performance, *Remote Sensing*, 2014, V. 6, pp. 11127–11152, DOI: 10.3390/rs61111127.