

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ**

УДК 528.854 DOI 10.30894/issn2409-0239.2022.10.1.53.62 EDN VGNOPU

**Безоблачное композитное изображение
по данным КА «Арктика-М»
для задач мониторинга ледовой обстановки**

А. С. Штангей, *shtangey@kos-com.ru*

ООО «Космические коммуникации», Москва, Российская Федерация

Л. Е. Долгобородов, *dolgorodov_le@spacecorp-rkd.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

И. В. Савосин, *к. воен. н., с. н. с.*, *savosin_iv@spacecorp-rkd.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В данной статье описан алгоритм создания безоблачного композитного изображения поверхности Земли на основе серий снимков, получаемых с российского метеорологического спутника «Арктика-М» № 1. Исследованы новые подходы к очистке серий снимков от облачности. Обоснован выбор статистического метода, не требующего использования маски облачности. Рассмотрены метрики качества результата работы алгоритмов очистки серий снимков от облачности. Показана возможность автоматического синтеза безоблачного композитного изображения поверхности Земли в Арктическом регионе с актуальностью до нескольких часов, обеспечивающей мониторинг ледовой обстановки.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, безоблачные покрытия, временная серия космических снимков, композитные изображения, космический аппарат «Арктика-М», алгоритмы, мониторинг ледовой обстановки, Северный морской путь

**Algorithm for Generating Cloudless Composite Images
for Ice Monitoring using Arktika-M Spacecraft Imagery**

A. S. Shtangey, *shtangey@kos-com.ru*

Limited Liability Company “Space communications”, Moscow, Russian Federation

L. E. Dolgorodov, *dolgorodov_le@spacecorp-rkd.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

I. V. Savosin, *Cand. Sci. (Mil.)*, *savosin_iv@spacecorp-rkd.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. This article presents an algorithm for generating cloudless composite images of the Earth’s surface from a series of images captured by the Russian meteorological satellite Arktika-M No. 1. New approaches to clearing a series of images from clouds are investigated, and the choice of a statistical method that does not require the use of a cloud mask is justified. The quality metrics of the algorithm results for cloudless images are considered. The article also shows the possibility of automatic synthesis of a cloudless composite image of the Earth’s surface in the Arctic region, providing monitoring of the ice situation with up-to-date information. This research has significant implications for remote sensing of the Earth, particularly for monitoring the ice situation and the Northern Sea Route.

Keywords: remote sensing of the Earth, cloudless cover, satellite image time series, composite images, Arktika-M spacecraft, algorithms, monitoring of the ice situation, Northern Sea Route

Введение

В последние годы активно ведется хозяйственное освоение Арктического региона. Климатические условия Арктики делают оценку гидрометеорологических условий существенно важной для любой деятельности в регионе, в том числе для проводки судов по Северному морскому пути [1]. В силу значительных географических масштабов Арктики и недостаточного покрытия территории наземными системами наблюдений наиболее перспективным, а часто и единственным способом получения гидрометеорологической информации в этом регионе является технология дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса. При этом у региональных пользователей наиболее востребованы максимально готовые к применению геоинформационные сервисы [2].

Космический аппарат на высокоэллиптической орбите «Арктика-М» предназначен для решения целого ряда гидрометеорологических задач: измерений параметров облачности, ветра, температуры, влажности, границ снежного покрова и других наблюдений в Арктическом регионе. Съёмочная система КА «Арктика-М» включает сканеры, которые обеспечивают получение оптических мультиспектральных изображений полного диска Земли в десяти спектральных каналах: трех в видимом диапазоне 0,5–0,9 мкм с пространственным разрешением 1 км в центре поля зрения и семи инфракрасных каналах в диапазоне 3,5–12,5 мкм с пространственным разрешением 4 км.

КА «Арктика-М» на высоком участке эллиптической орбиты повторяет сеансы съёмки каждые 15 минут. Период составляет около 12 часов, таким образом, в течение суток космический аппарат дважды выполняет проход по высокому участку орбиты, обеспечивая получение двух временных серий из 21–22 сеансов съёмки.

Применение снимков в видимом диапазоне спектра для мониторинга поверхности Земли в Арктическом регионе сильно ограничено облачностью: как в летний, так и в зимний периоды доля общей облачности на полученных снимках в Арктике заметно превосходит половину [3]. Для создания безоблачных покрытий традиционно используется предварительная детекция облаков, на основе

которой создается маска облачности для каждого исследуемого изображения [4, 5]. Для Арктического региона создание масок облачности затруднено из-за низкой температуры поверхности, малого температурного и яркостного контраста между облаками и заснеженной территорией. Из-за постоянной дымки или сплошной облачности на значительной части снимка технологии маскирования облачности для условий Арктики становятся малополезными, оставляя слишком мало безоблачной поверхности.

Задача выделения облаков наиболее успешно решается с привлечением методов глубокого машинного обучения (deep learning). Но такие методы имеют высокую вычислительную сложность и малоприменимы для оперативной обработки сеансов съёмки КА «Арктика-М», повторяющихся каждые 15 минут. Например, предложенный в [6] метод выделения облаков по данным КА «Метеор-М» также требует и трудоемкого процесса создания обучающих датасетов.

Высокая частота съёмки и продолжительная временная серия снимков КА «Арктика-М» дают возможность применить специфические алгоритмы очистки от облачности, используя данные сразу сотен сеансов съёмки. При этом можно получать практически безоблачное композитное изображение поверхности Земли со скоростью обновления до единиц часов. Такие временные параметры композитного изображения позволяют применять его для оперативного мониторинга ледовой обстановки в акватории Северного морского пути.

Представленный алгоритм обеспечивает существенное снижение облачности на снимках, позволяя применять данные КА «Арктика-М» не только для решения гидрометеорологических задач и наблюдений атмосферных явлений, но и для оперативного мониторинга территорий и акваторий Арктики. На рис. 1 приведен фрагмент съёмки в районе Норвежского и Баренцевого морей. Слева — изображение одного сеанса съёмки КА «Арктика-М» с высокой облачностью над акваторией, справа — безоблачное композитное изображение, построенное в результате работы алгоритма на серии сеансов съёмки за 7 дней (более 300 сеансов съёмки). Особо отметим, что очищенное изображение имеет высокую актуальность, необходимую для мониторинга ледовой обстановки. Приведенное

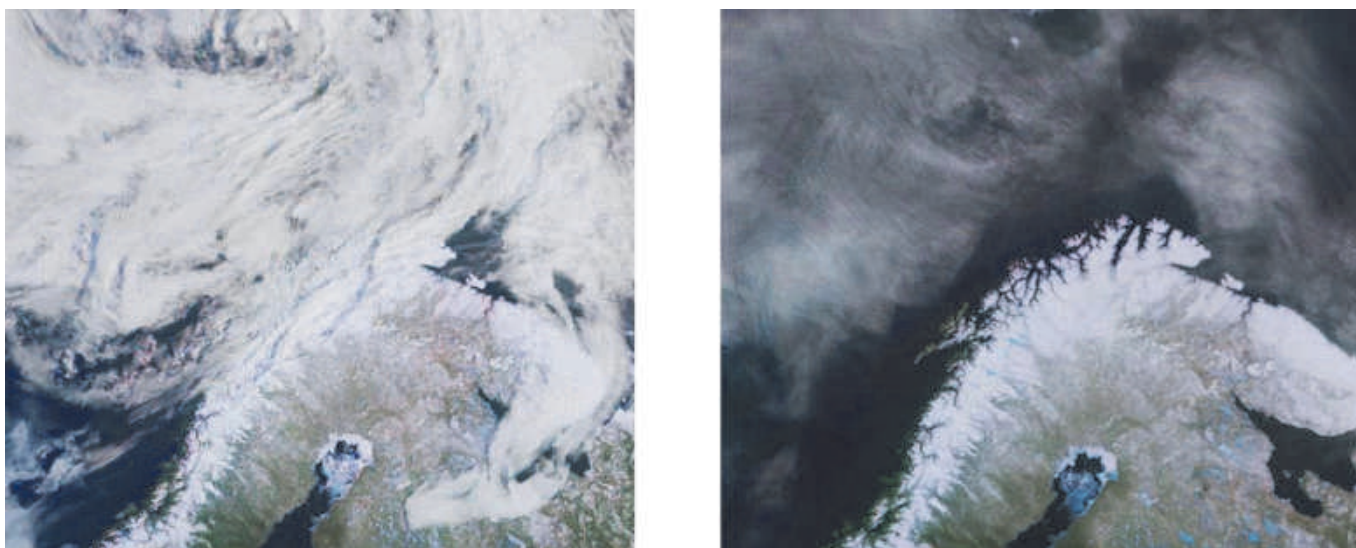


Рис. 1. Слева фрагмент изображения одного сеанса съемки КА «Арктика-М» № 1, справа результат работы алгоритма на серии сеансов съемки за 7 дней (308 снимков). На фрагменте изображения — акватории Норвежского и Баренцева морей

композитное изображение не содержит ни одного пикселя ранее 7 дней от момента последнего сеанса съемки, самые новые пиксели получены с задержкой 2 часа от времени последнего сеанса, а сеансы повторяются каждые 15 минут.

Алгоритм обработки

Алгоритм очистки снимков от облачности для использования на сериях снимков, получаемых с КА «Арктика-М», включает этапы, показанные на рис. 2.

Этап получения данных КА

Данные КА «Арктика-М» принимаются через наземный комплекс приема, обработки и распространения информации от этого космического аппарата (НКПОР-АМ) в составе Единой территориально-распределенной информационной системы дистанционного зондирования Земли (ЕТРИС ДЗЗ), выделяется информация сканеров съемочной системы, собирается изображение полного диска для каждого канала. Для построения изображений поверхности используются каналы 0,6 мкм, 0,7 мкм и 0,9 мкм, изображение облаков строится с использованием каналов 3,8 мкм и 10,8 мкм. Формируется

цветосинтезированное изображение в цветах, приближенных к естественным. Отметим, что съемочная аппаратура гидрометеорологического назначения КА «Арктика-М» не имеет ни «голубого», ни «зеленого» канала. Зеленый цвет растительности формируется путем инвертирования цвета по координате a в цветовом пространстве CIELAB.

Этап предварительной обработки снимков

Для каждого сеанса выполняется коррекция дефектов съемки [7] (дестрайпинг), однако полностью устранить все артефакты для всех сеансов съемки не удастся. Это требует разработки алгоритма, устойчивого к дефектам съемки, и минимизации переноса артефактов с исходных снимков.

Для различных сеансов съемки КА «Арктика-М» имеет разную ориентацию платформы, положение на орбите и разную высоту орбиты. Спутник снимает весь видимый диск планеты, захватывая почти полусферу. Длительность серии снимков составляет около 6 часов. За это время существенно меняются и область съемки и условия освещения. Поэтому при пространственном совмещении изображений в картографической проекции и эффективное пространственное разрешение и яркость пикселей для разных сеансов будут существенно

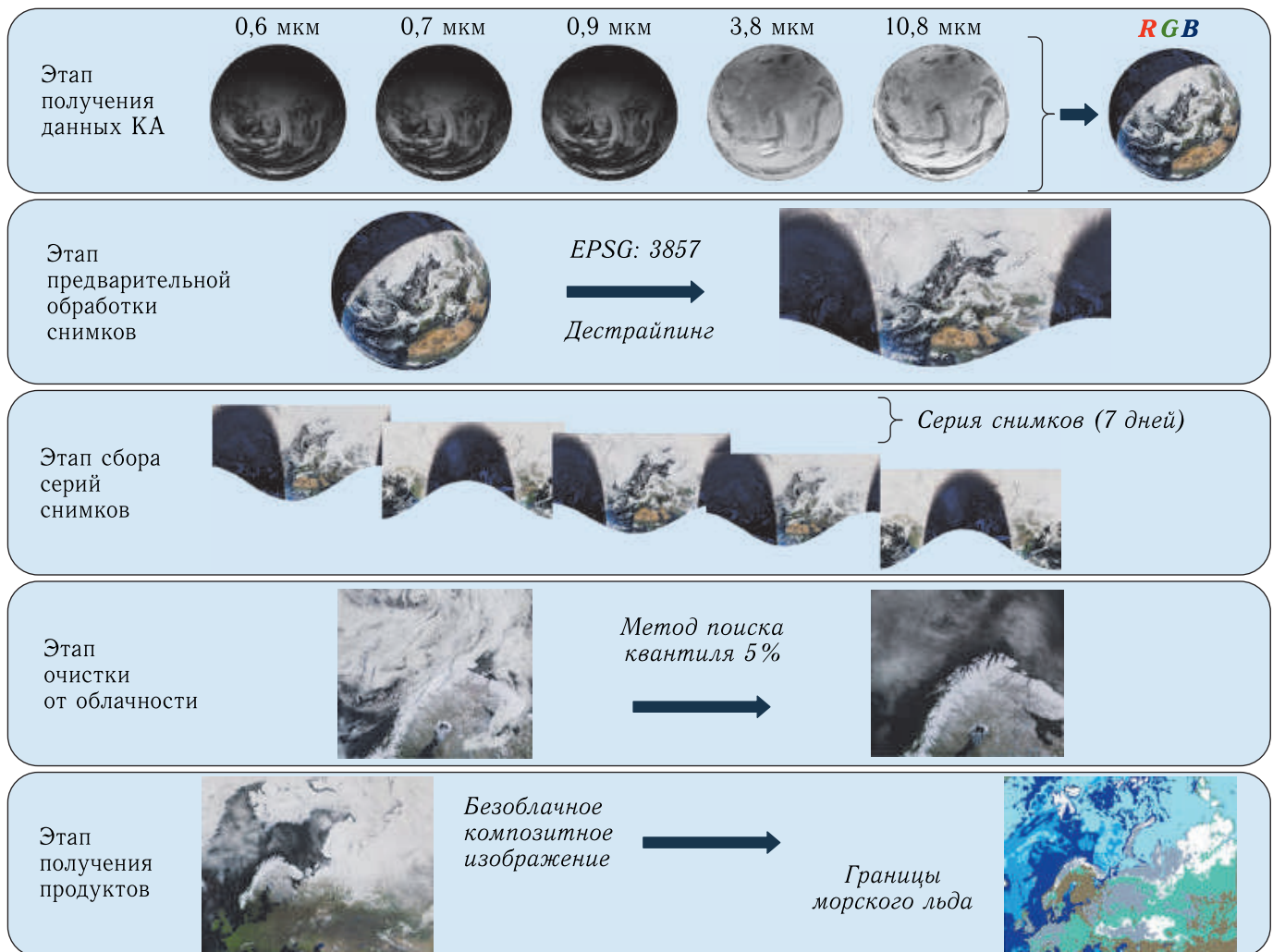


Рис. 2. Этапы алгоритма очистки серии снимков от облачности на серии сеансов съемки КА «Арктика-М»

отличаться, что необходимо учитывать в алгоритме обработки.

Для каждого пикселя на освещенной части снимка рассчитывается угол Солнца и выполняется коррекция яркости изображения в зависимости от географического положения пикселя, сезона (даты) и времени суток. Выполняется коррекция влияния атмосферы в зоне терминатора и на краях видимого диска.

Выполняется проецирование изображения полного диска Земли в картографическую проекцию EPSG:3857 (проекция Меркатора). Для исключения потерь информации из-за вариаций пространственного разрешения используется пространственное разрешение 1 км на пиксель и минимальное

сглаживание при проецировании изображений. Вся дальнейшая обработка ведется в этой картографической проекции.

Этап сбора серий снимков

Для каждого сеанса съемки применяется маска «день–ночь», рассчитываемая в зависимости от положения и ориентации спутника на орбите на момент съемки. Маска «день–ночь» расширяется в зону терминатора с целью исключения сумеречной зоны, для которой характерны существенные искажения цвета.

Для реального пространственного разрешения съемки КА «Арктика-М» (несколько километров

на пиксель) и высоты рабочего участка орбиты спутника (более 40 000 км) можно пренебречь влиянием теней от облаков, влияющих на освещенность поверхности. Тени от облаков, имеющие размер в один–два пикселя и наблюдаемые при очень низких углах Солнца (т.е. в зоне терминатора), будут маскированы маской «день–ночь».

На этом этапе также производится разбиение снимков на сегменты с характерным размером около сотни километров, с контурами, приближенными к контурам природных структур (береговая линия и т.п.). Для деления на сегменты использован алгоритм суперпиксельной сегментации SLIC [8]. Для изображения полного диска Земли получено более 50 000 таких сегментов. Дальнейшая обработка выполняется параллельно по таким сегментам, предполагая, что внутри сегмента изображение имеет преимущественно однородные свойства.

Серии снимков за заданный период (час, день или 7 дней) после разделения на сегменты собираются отдельно для каждого из каналов цветосинтезированного изображения. Для каждой точки изображения при этом доступны три временные серии.

Этап очистки от облачности

При разработке алгоритма очистки апробированы различные статистические методы. Для этого создано несколько программ обработки, которые применены на данных КА «Арктика-М». Проведено экспериментальное сравнение следующих групп методов:

- 1) описательные статистики (минимум, квантиль, локальные минимумы);
- 2) построение гистограмм (поиск левой точки гистограммы, поиск левого пика гистограммы);
- 3) переменный порог бинаризации (методом Оцу);
- 4) машинное обучение для задач регрессии (линейные алгоритмы, методы регуляризации, байесовский подход, многослойный перцептрон, алгоритмы бинарных деревьев).

Результаты сравнивались с помощью трех метрик качества, специально разработанных авторами для экспертного сравнения покрытий: *vis_metrics* (визуальная экспертная оценка), *SSIM* (индекс

структурного сходства) и *gms_delta* (средняя квадратическая цветовая разница).

Наилучшие результаты были получены в процессе очистки серий снимков, собранных таким образом, что каждый снимок дает равный вклад в итоговое покрытие, без учета порядка сеансов съемки во времени. Наиболее качественный результат дали методы описательной статистики и машинное обучение для задачи регрессии. Они более подробно описаны в следующем разделе.

Этап получения продуктов

После очистки от облачности 2-часовой серии спутниковых изображений формируется композитное изображение со сниженной облачностью за этот период. Продукт предназначен для последующей обработки другими алгоритмами.

После очистки от облачности серии из 308 спутниковых изображений формируется безоблачное композитное изображение за период 7 дней. Продукт дает обзор всей Арктической зоны и применяется для распознавания поверхности (типов и контуров льда, снега, видов растительности) вдоль Северного морского пути на последующих этапах обработки.

Методы очистки от облачности

Методы, использующие описательные статистики

Облака с точки зрения их цветовых характеристик выглядят на снимках белыми или имеющими светлые тона. Будем предполагать, что изображение подстилающей поверхности Земли имеет более темные цвета, чем облака. Тогда если рассмотреть ряд значений яркости в каждой точке, то наиболее темные пиксели более вероятно дадут поверхность Земли без облаков.

Эти предположения не верны для льда и снега — они тоже светлые, и могут быть даже светлее облаков. В свою очередь, предполагая, что если пиксель изображения всегда светлый на протяжении всей временной серии, то это либо лед или снег, либо сплошная облачность, причем без возможности очистки в этом временном диапазоне.

В Арктическом регионе вполне вероятно картина, когда целую неделю участок поверхности Земли не открывается от облачности ни на одном из 300 сеансов съемки.

Метод поиска минимальных значений при обработке данных ДЗЗ использовался в [9]. При практической проверке метод оказался очень чувствителен к нормировке средней яркости снимков в серии. Практически нереально обеспечить равную яркость пикселей по всему полю зрения для всех сеансов съемки в разное время суток и в разные дни. Метод поиска минимальных значений также захватывает артефакты с любого снимка из серии, а добиться предварительной обработкой идеального изображения для каждого из 300 сеансов съемки крайне трудно.

Лучшие результаты дает метод с усреднением минимального и максимального значения по квантилям. Экспериментально подобрана величина квантиля в 5%, и именно такую величину обычно принимают в качестве нижней границы доверительного интервала в статистических методах.

Методы машинного обучения для задачи регрессии

В нашем случае решение задачи регрессии означает, что для разметки данных понадобится опорный безоблачный снимок [10]. В качестве опорного снимка можно использовать либо небольшие фрагменты разных снимков, где видна поверхность Земли без облаков, либо ранее полученное безоблачное композитное изображение в близкий временной период. Для разметки данных для машинного обучения использовался алгоритм суперпиксельной сегментации SLIC. Он автоматически делит изображение поверхности на сегменты условно-однородной структуры. Таким образом, разметка не требует больших трудозатрат.

Использовались несколько типов признаков для машинного обучения — в набор признаков добавлялись статистические и гистограммные характеристики. Все модели тестировались на одинаковых наборах признаков.

Сравнивались результаты обработки серий снимков с использованием различных методов (линейные алгоритмы, методы регуляризации, байе-

совский подход): линейная регрессия (*Linear regression*), байесовская гребневая регрессия (*Bayesian ridge regression*), эластичная сеть (*Elastic net*), регрессия с автоматическим определением релевантности (*Automatic Relevance Determination Regression, ARD*), регрессия с оценочной функцией Тейла–Сена (*Theil–Sen estimator*). Методы близки по требованиям к вычислительным ресурсам. Были изучены и другие методы машинного обучения (многослойный перцептрон, алгоритмы бинарных деревьев), но они не дали уверенных качественных результатов в поставленной задаче.

Метрики качества

Тестирование и сравнение результатов очистки серии снимков от облачности проводилось с использованием трех метрик качества, с учетом рекомендаций ГОСТ 59898-2021 [11]:

- 1) метрика качества путем визуальной экспертной оценки;
- 2) индекс структурного сходства (*Mean Structural Similarity Index, SSIM*);
- 3) средняя квадратическая цветовая разница в пространстве CIELAB.

Для визуальной экспертной оценки качества разработаны следующие критерии:

clouds — визуальное сравнение количества остатков облачности на изображении (0 — нет, 1 — небольшие остатки, 2 — много облаков, 3 — облачность не была очищена);

uneven_brightness — искажения цветов и яркости (0 — нет, 1 — заметны изменения яркости, 2 — заметна неравномерность и яркости, и цвета, 3 — после обработки цвет объектов сильно изменен);

artifacts — устранение имеющихся на снимках артефактов (0 — нет заметных артефактов, перенесенных со снимков, 1 — небольшое количество артефактов, 2 — присутствуют артефакты, 3 — перенесены все артефакты исходных снимков);

distortion — искажения, создаваемые самим методом (0 — метод не оставляет заметных искажений, 1 — небольшое количество искажений, 2 — присутствуют искажения, 3 — неинформативный результат).

Количественная мера визуальной экспертной оценки вычислялась по формуле

$$vis_metrics = 100\% - 100\% \cdot (clouds + uneven_brightness + artifacts + distortion) / (max_mark \cdot n),$$

где $max_mark = 3$ — максимальная оценка по каждому пункту, $n = 4$ — количество параметров для оценки.

Индекс структурного сходства, обозначающий меру сходства между изображениями в процентном соотношении (100% — полное сходство), вычислен по формуле

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)},$$

где x, y — точки, принадлежащие двум сравниваемым изображениям; μ_x — среднее x ; μ_y — среднее y ; σ_x^2 — дисперсия x ; σ_y^2 — дисперсия y ; σ_{xy} — ковариация x и y ; $c_1 = (k_1L)^2$ и $c_2 = (k_2L)^2$ — переменные; L — динамический диапазон пикселей ($2^{(bits\ per\ pixel)} - 1$), $k_1 = 0,01$ и $k_2 = 0,03$ — константы.

Средняя квадратическая цветовая разница rms_{delta_e} в пространстве CIELAB определена как:

$$rms_{delta_e} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n delta_e(ab)^2},$$

где

$$delta_e(ab) = \sqrt{(L_y^2 - L_x^2)^2 + (a_y^2 - a_x^2)^2 + (b_y^2 - b_x^2)^2}$$

— цветовая разница в пространстве CIELAB, L, a, b — координаты в данном пространстве, x, y — точки, принадлежащие двум сравниваемым изображениям; n — количество пикселей в изображении.

Следует заметить, что первые две метрики имеют смысл метрик качества, они приближаются к 100% при приближении качества к идеальному. Третья метрика rms_{delta_e} имеет смысл оценки ошибки (при приближении качества к идеальному стремится к минимуму).

После подсчета трех метрик и измерения времени выполнения алгоритмов подсчитывался общий

результат (рейтинг). В качестве ведущей метрики для рейтинга использовалась визуальная оценка, позволяющая выбрать методы, не привносящие видимых искажений в изображение поверхности Земли. В качестве второго по значимости критерия использовался индекс структурного сходства.

Тестирование алгоритмов

Алгоритмы были реализованы с использованием языка программирования Python и библиотек numpy, хатгау, гюхатгау, scikit-image, dask, pytorch. Где возможно, вычисления организованы в параллельные потоки, а алгоритмы машинного обучения задействовали графический процессор.

Вычисления производились на сервере под управлением операционной системы Ubuntu 20, монополюно использовались следующие вычислительные ресурсы: процессор Intel i9-9900K, оперативная память 82 Гб, видеокарта GeForce RTX 2080.

Для тестирования было использовано 308 изображений размера 11 000 на 14 500 пикселей. Изображения содержали одинаковые фрагменты снимков, включающие акватории Норвежского, Карского, Баренцева морей и материковой части. Снимки были проецированы в картографическую проекцию EPSG:3857 (проекция Меркатора) с пространственным разрешением 1 км/пиксель.

Рассмотрены модели, использующие описательные статистики: 1 — метод поиска минимума, 2 — метод поиска квантиля 3%, 3 — метод поиска квантиля 5%, 4 — метод поиска квантиля 10%, а также модели машинного обучения: 5 — линейная регрессия (признаки I типа), 6 — байесовская гребневая регрессия (признаки I типа), 7 — эластичная сеть (признаки I типа), 8 — регрессия с автоматическим определением релевантности (признаки I типа), 9 — регрессия с оценочной функцией Тейла–Сена (признаки I типа), 10 — константная модель. Полученные результаты приведены в таблице.

Из всех исследуемых методов наилучший результат очистки серии снимков от облачности дал метод поиска квантиля 5% (рис. 3). Данный метод довольно устойчив к изменению величины квантиля в пределах нескольких процентов. Стабильные результаты с несколько меньшим качеством также дают методы машинного обучения, среди них

Таблица. Сравнение результатов тестирования алгоритмов очистки серии снимков от облачности

Модель, №	vis_metrics, %	SSIM, %	rms_delta	Время обучения, с	Общий результат, рейтинг
1	58,0	76,0	16,02	9	
2	75,0	84,0	11,34	2244	1
3	75,0	85,0	10,53	2226	1
4	58,0	86,0	9,35	2205	
5	75,0	80,0	13,28	4080	3
6	75,0	80,0	13,28	4080	3
7	75,0	80,0	13,18	4080	2
8	75,0	80,0	13,28	4080	3
9	75,0	79,0	14,45	4119	3
10	50	30	22		



Рис. 3. Результат работы алгоритма очистки от облачности на серии сеансов съемки КА «Арктика-М» №1 за 7 дней (308 снимков)

лучшая модель — эластичная сеть. Наиболее быстрым алгоритмом является метод поиска минимума, возможно его применение в тех случаях, когда нет потребности в максимальном качестве получаемого результата.

Для определения оптимального размера серии снимков для совмещения в композитное изображение было выполнено тестирование нескольких временных серий разного размера с использованием лучшего метода — поиска квантиля 5%. Рассчитаны метрики качества для 10 временных серий разной длины — от двух соседних сеансов съемки до серии за 14 дней (616 снимков). Чем длиннее была временная серия, тем выше качество очистки от облаков. То есть длину временной серии следует выбирать исходя из необходимых параметров актуальности покрытия, а качество очистки будет определяться задачей мониторинга.

Алгоритм позволяет автоматически распознавать типы льда и различать границы льда для мониторинга ледовой обстановки в Арктическом регионе.

Выводы

Разработан и реализован в программном коде алгоритм для автоматической обработки данных КА «Арктика-М», создающий цветосинтезированные RGB-изображения в естественных цветах с коррекцией дефектов съемки.

Разработан и реализован в программном коде алгоритм, основанный на методе описательной статистики, для создания безоблачного композитного изображения из серий спутниковых снимков.

Реализованы метрики качества очистки изображений КА «Арктика-М» от облачности.

На основе серий снимков КА «Арктика-М» № 1 показана возможность автоматического создания безоблачных композитных изображений в Арктическом регионе с оперативностью, достаточной для мониторинга ледовой обстановки вдоль Северного морского пути. Определен лучший метод создания безоблачных композитных изображений — метод поиска квантиля 5%.

Этот метод позволяет четко различать границы льда в районе акватории северных морей. Полученный результат дает возможность применять рас-

работанный метод в автоматических процедурах распознавания типов льда в задачах мониторинга ледовой обстановки в Арктическом регионе.

Список литературы

1. *Маков А.Б., Прохоренко П.А.* Анализ возможностей получения гидрометеорологической информации в Арктическом регионе // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Вып. 652 / Под общ. ред. Ю.В. Кулешова. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. С. 91–98.
2. *Заичко В.А., Емельянов А.А., Сизов О.С., Шевелев Ф.А.* Исследование потребностей пользователей российских данных ДЗЗ из космоса в 2020 году // Дистанционное зондирование Земли из космоса в России, 2020, вып. 3. С. 21–35.
3. *Чернокульский А.В.* Климатология облачности в арктических и субарктических широтах по спутниковым и наземным наблюдениям и данным реанализа // Солнечно-земная физика, 2012, № 21 (134). С. 73–78.
4. *Kenji Enomoto, Ken Sakurada, Weimin Wang, Hiroshi Fukui, Masashi Matsuoka, Ryosuke Nakamura, Nobuo Kawaguchi.* Filmy Cloud Removal on Satellite Imagery with Multispectral Conditional Generative Adversarial Nets / 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW).
5. *Васильев А.И., Крылов А.В., Панкин А.В.* Стандартная обработка данных КШМСА КА «Ресурс-П» в обеспечение автоматического формирования бесшовного сплошного покрытия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019, т. 16, № 2. С. 18–28.
6. *Крамарева Л.С., Андреев А.И., Симоненко Е.В., Холодов Е.И., Шамилова Ю.А., Сорокин А.А.* Детектирование снега и облачности с использованием сверточной нейронной сети по данным прибора МСУ-МР КА «МЕТЕОР-М» № 2 / Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли — RORSE 2018. Электронный сборник статей 16-й конференции (12–16 ноября 2018 г.). М.: ИКИ РАН. С. 60–67.
7. *Гектин Ю.М., Смелянский М.Б., Сулиманов Н.А., Коляда В.С., Бадаев К.В., Зайцев А.А., Андреев Р.В.* Первые результаты работы аппаратуры МСУ-ГС/ВЭ на КА «Арктика-М» № 1 // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2022, т. 9, вып. 1. С. 30–41.

8. Белов А.М., Денисова А.Ю. Алгоритм выявления случайных искажений в составе сцены на серии разновременных изображений ДЗЗ одной и той же территории // Компьютерная оптика, 2019, т. 43, № 5. С. 869–885.
9. Ramoimo F., Tutunaru F., Pera F., Arino O. *Thermometer Sentinel-2A Cloud-Free Composite – Southern Africa 2016* // Remote Sensing, 2017, 9(7). P. 652.
10. Игнатьев В.Ю., Матвеев И.А., Мурынин А.Б., Трекин А.Н. Оценка качества изображений при повышении разрешения на основе пространственного спектрального синтеза // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки, 2017, № 1 (70). С. 124–141.
11. Оценка качества систем искусственного интеллекта. Общие положения: ГОСТ Р 59898-2021. Введ. 2022-03-01. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 24 с.

Дата поступления рукописи
в редакцию 16.12.2022
Дата принятия рукописи
в печать 27.02.2023