УДК: 912.4 DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-286-297

И.А. Рыльский¹, Е.Н. Ерёмченко², Т.В. Котова³

УСТРАНЕНИЕ ТЕНЕЙ ОТ ОБЛАКОВ НА МАТЕРИАЛАХ АВИАЦИОННЫХ СЪЁМОК В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ

АННОТАЦИЯ

Выполнение аэрофотосъёмочных работ зачастую невозможно из-за наличия высоких облаков с контрастными тенями, не позволяющими получить пригодные для дешифрирования материалы. При этом в значительной доле проектов бесснежный сезон, пригодный для съёмки, очень короток. Невозможность выполнения аэрофотосъёмки с полётами ниже облаков приводит к увеличению сроков и удорожанию работ. В ряде случаев проекты не удаётся завершить.

Существующее программное обеспечение не позволяет решить задачу выравнивания яркостей в тенях по ряду причин. Основная причина — невозможность идентифицировать границы теней с использованием только спектральных характеристик снимков, невозможность определить величину коррекции для затенённых участков.

Для решения данной задачи предлагается использовать эталонные изображения худшего разрешения, полученные со спутника. Эталонные изображения используются для локализации и определения величины спектральной коррекции аэрофотоснимков. Работа ведётся с единичными ортофотоснимками или ортофотомозаиками в единой системе координат. Для определения границ затенённых зон и значений поправок в яркости используются методы картографической алгебры на регулярных массивах данных. Далее полученные матрицы поправок подлежат фильтрации и применяются к аэрофотоснимкам высокого разрешения.

В работе приводится пример использования бесплатных спутниковых снимков для устранения или снижения контрастности теней на аэрофотоснимках с детальностью 20 см. Созданный прототип программного обеспечения позволяет выполнить аддитивную или мультипликативную коррекцию массива отдельных аэрофотоснимков.

Предлагаемый подход требует большего времени на обработку данных, однако даёт гораздо более приемлемые для визуального (ручного) дешифрирования результаты. Метод не рекомендован для использования при работе со снимками детальнее 10 см, при решении мониторинговых задач с частыми повторными съёмками, а также при необходимости проводить автоматизированное дешифрирование по спектральным эталонам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аэрофотосъёмка, космические снимки, дистанционное зондирование, ГИС, геоинформационные данные

-

¹ Московский государственный университет, Географический факультет, Ленинские горы, 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail:* rilskiy@mail.ru

² Московский государственный университет, Географический факультет, Ленинские горы, 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail:* **eugene.eremchenko@gmail.com**

³ Московский государственный университет, Географический факультет, Ленинские горы, 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail:* tatianav.kotova@yandex.ru

Ilya A. Rylskiy¹, Evgeniy N. Eremchenko², Tatiana V. Kotova³

ELIMINATION OF CLOUD SHADOWS ON MATERIALS OF AVIATION SHOOTING IN THE VISIBLE RANGE

ABSTRACT

Aerial photography is often impossible due to the presence of high clouds with contrasting shadows that do not allow to obtain materials suitable for decryption. At the same time, in a significant proportion of projects in Russia, the snowless season suitable for surveying is very short. The inability to perform aerial photography while flying below the clouds leads to cost increasing. In some cases, projects cannot be completed.

Existing software does not allow to solve the problem of equalizing the brightness in the shadows for several reasons. The main reason is the inability to identify the boundaries of the shadows using only the spectral characteristics of the images, the inability to determine the amount of correction for shaded areas.

To solve this problem, it is proposed to use reference images of the worse resolution obtained from the satellites. Reference images are used to localize and determine the magnitude of the spectral correction of aerial photographs. The work is performed with single orthophotographs or orthophotomosaics in the same coordinate system. To determine the boundaries of the shaded zones and the values of the corrections in brightness, methods of cartographic algebra on regular data arrays are used. Further, the obtained correction matrices are subject to filtering and are used to correct high-resolution aerial photographs.

The paper gives an example of the use of free (or cheap) satellite images to eliminate or reduce the contrast of shadows on aerial photographs with a detail of 20 cm. The created prototype software allows to perform additive or multiplicative correction of an array of individual aerial photographs.

The proposed approach requires more time for data processing, but gives much more acceptable results for visual (manual) decryption. The method is not recommended for use when working with images in more than 10 cm, when solving monitoring tasks with frequent repeated surveys, and also, if necessary, to carry out automated decoding using spectral standards.

KEYWORDS: airborne imagery, satellite images, remote sensing, GIS, geoinformation data

ВВЕДЕНИЕ

Проблематика наличия теней на снимках

Выполнение аэрофотосъёмочных работ всегда достаточно сильно зависело и будет зависеть от погодных условий. В эпоху тяжёлых авиационных систем требования по проведению АФС допускали работу только в ясную, безоблачную погоду. Позднее, когда появились цифровые камеры, это требование в целом осталось, однако появилась возможность работать с малых высот, ниже облачного покрова (т.е. в пасмурную погоду). Работа при наличии неблагоприятных явлений (осадки, туман, дымка) не практикуется по объективным причинам и, вероятно, не будет практиковаться в ближайшие годы.

¹ Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Moscow, 119991, Russia; *e-mail:* rilskiy@mail.ru

² Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Moscow, 119991, Russia; *e-mail:* **eugene.eremchenko@gmail.com**

³ Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Moscow, 119991, Russia; *e-mail:* tatianav.kotova@yandex.ru

Тем не менее существует ещё один тип погоды, который встречается очень часто, но в большинстве случаев считается малопригодным для ведения съёмочных работ. Это погода с переменной облачностью или с разорванной облачностью [Руководство..., 1986].

В этом случае осадков нет, а облака могут находиться существенно выше необходимого уровня съёмки (300–1500 м); при этом их тени и крайне изменчивые условия освещённости территории не позволяют выполнить нормализацию оптической плотности по полю кадра. Это приводит к возникновению недоэкспонированных или переэкспонированных кадров, а также кадров, на которых одновременно встречаются пере- и недоэкспонированные участки.

Если солнце стоит низко над горизонтом или присутствуют высотные облака, рассеивающие лучи и смягчающие тени, то дешифровочные свойства материалов, полученных в такую погоду, могут быть приемлемы для визуального (ручного) дешифрирования. Однако если используются автоматизированные методы дешифровки или тени имеют высокую контрастность, то в этом случае результаты залёта будут неприемлемы [Руководство.... 1989]

В то же время огромное количество регионов на территории $P\Phi$ отличают одновременно две особенности:

- короткий бесснежный период (1-3 месяца);
- высокая степень увлажнённости ландшафтов.

Эти особенности ведут к тому, что в течение короткого лета большая часть солнечной погоды без осадков представляет собой как раз погоду с наличием отдельных мелких облаков с высококонтрастными тенями. Эти условия характерны для районов тундры, лесотундры и северо-таёжной зоны, а также для районов с муссонным (Дальний Восток) или морским климатом (Калининградская, Ленинградская, Псковская, Архангельская, Мурманская обл., Камчатский край, Курильские о-ва).

Невозможность получения приемлемых материалов АФС в подобных погодных условиях приводит к удлинению сроков работ, их серьёзному удорожанию (от 25 до 200 % в зависимости от территории), а примерно в 30 % случаев — к срыву съёмочных работ (особенно при работах в конце съёмочного сезона). Таким образом, решение подобной задачи является весьма важным для хозяйства страны и информационного обеспечения проектов на территории РФ.

Недостатки существующих методов борьбы с тенями от облаков

Проблема устранения теней от облаков программными методами состоит в определении границы тени от облака (облаков). Большинство программных сред, предлагающих средства подавления данного негативного эффекта (например, Erdas Imagine, Inpho OrthoVista), работают примерно следующим образом:

- рассматриваются уже ортотранформированные отдельные снимки;
- снимки рассматриваются как совокупность перекрывающихся изображений;
- различия в яркости на изображениях в зоне перекрытия трактуются как дешифровочный признак тени, зона максимально быстрых «скачков» яркости считается краем тени;
- совокупность зон с быстрыми перепадами яркости формирует (тем или иным способом геометрических построений) контуры «теней» или «засветов» на итоговом изображении;
- полученные контуры «теней» и «засветов» используются для коррекции яркостей, при этом для расчёта величин поправок в спектральные яркости используются средние значения яркостей по всему набору снимков;
- итоговые результаты исправления яркостей обычно становятся видны только после создания итоговой ортофотомозаики.

Нетрудно догадаться, что подобные способы локализации границ теней от облаков являются, как минимум, спорными [Dare, 2005] и на практике дают неприемлемые результаты — от полной деградации изображений до психоделических переливов цветов на участках перехода от тени к свету. При этом (в зависимости от алгоритма и конкретного вида программного обеспечения) отдельные объекты вроде темнохвойных лесов, ярких пятен травы или изменений цвета воды в реках могут трактоваться так же, как тени от облаков с последующим внесением некорректных исправлений в итоговые изображения [Guo et al., 2011]. Отметим, что при данном подходе не идёт речь об исправлении отдельных снимков — только в совокупности.



Puc. 1. Пример аэроснимка с тенями от облаков, непригодного для дешифрирования Fig. 1. Example of aerial image with cloud shadows, unsuitable for decryption

Попытки найти границы теней на отдельных снимках малорезультативны (рис. 1) в силу того, что только спектральных признаков для этого мало (тень на светлом поле ярче освещённого солнцем хвойного леса), текстурные признаки отсутствуют [Finlayson et al., 2002], а оценка топологии формы затруднена из-за того, что на одном кадре тень даже от небольшого облака бывает видна далеко не всегда.

Именно в силу вышеописанной проблематики и недостатков программных методов обработки изображений, снятых в условиях разорванной облачности, был разработан иной метод исправления теней на снимках.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. <u>Новый подход к исправлению теней и источники вспомогательных данных для этого</u>

Суть предлагаемого метода сводится к следующему: поскольку по одиночному снимку определить границы теней облаков практически невозможно, а по их совокупности возможно, но с крайне неоднозначным результатом, то, следовательно, для определения этих границ требуется некий эталон.

Логично предположить, что эталон должен:

• быть снимком того же оптического диапазона (в нашем примере — видимого, но могут быть и иные варианты);

- быть снят примерно в тот же фенологический период (уровень развития листвы должен быть таким же, как на аэрофотосъёмке);
- быть максимально приближенным к дате аэрофотосъёмки;
- не иметь теней от облаков или изображений самих облаков;
- обладать разрешением не хуже 10 м (на снимке должны читаться основные ландшафтные элементы вроде мелких рек, дорог, крупных зданий);
- быть бесплатным или иметь стоимость на уровне не выше 1–2 % от стоимости аэрофотосъёмки на данной территории.

Всем этим критериям отвечают только космические снимки с детальностью 2–15 м. Снимки с детальностью 15 и 10 м (Landsat 8, Sentinel) обладают наибольшей универсальностью — они имеют охват более 170х170 км (в большинстве случаев достаточно 1–2 сцен, чтобы полностью покрыть любой мыслимый объём работ при площадной аэрофотосъёмке). Они бесплатны, имеют многократное покрытие всей планеты и регулярно обновляются.

Недостатком данных Landsat и Sentinel является их низкая детальность, позволяющая использовать их для исправления теней на снимках с разрешением 15 см и хуже. Для более детальных снимков (3–15 см) требуется более высокое разрешение — близкое по детальности к сверхдетальным снимкам. Однако в этом случае возрастает стоимость данных (до 14–20 долларов США за 1 км², что дорого), и существенно снижается вероятность наличия архивных данных на данную территорию.

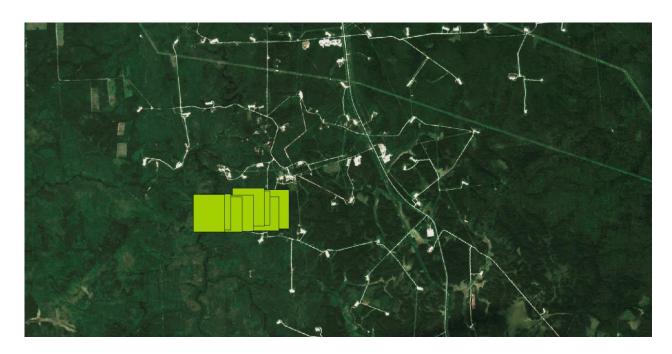
2. Подготовка данных

Работа ведётся с уже ортотрансфомированными изображениями. И данные аэрофотосъёмки, и космические снимки подвергаются ортотрансформации с использованием одной и той же модели рельефа, в единой системе координат (допустим, UTM). Весь массив снимков и эталон приводятся в примерное соответствие (цветовой баланс, общая яркость по полю кадра) с помощью стандартных процедур корректировки растров [Levine, Bhattacharyya, 2005]. Обычно эталон корректируется по причине меньшего на несколько порядков объёма данных. В ряде случаев эта процедура может быть бесполезна — при значительных яркостных различиях кадров аэрофотосъёмки. В этом случае эталон просто приводится в наиболее приемлемый (с точки зрения дальнейшей обработки и её целей) вид (рис. 2).

Для каждого аэрофотоснимка устанавливается используемый для его исправления космический эталон — далее это сопоставление мы назовем парой «эталон-аэрофото». Для каждой пары «эталон-аэрофото» также установим единые габариты зоны анализа; обычно это габариты ортофототрансформированного аэрофотоснимка, подвергаемого исправлению.

При этом будут наблюдаться:

- отличия в местоположении контуров, вызванные различным разрешением снимков (возможное смещение границ объектов на величину до 1 пикс космического снимка, т.е. до 10–15 м в плане);
- отличия в местоположении контуров, появляющиеся вследствие недостаточно точной ориентации аэрофотоснимков с детальностью 15–20 см, которыми можно пренебречь, т.к. они обычно не превышают 3–4 пикс, т.е. 45–80 см, что несущественно;
- отличия в местоположении контуров, возникающие из-за недостаточно точной привязки космического снимка, которые могут достигать 2–3 пикс, т.е. 20–30 м;
- различия в яркостях по каждому каналу вне зависимости от наличия или отсутствия теней на снимках.



Puc. 2. Геопривязанный космический снимок (Sentinel) и каталог ортотрансформированных аэрофотоснимков Fig. 2. Georeferenced satellite image (Sentinel) and catalog of orthorectified aerial images

Работа с каждым из снимков ведётся по всем каналам изображения, что позволяет не менять алгоритм работы при использовании 1,3,4 и большего количества каналов [Finlayson et al., 2009]. Каждый из каналов представляется как поверхность, преобразуясь (в нашем случае) в данные формата ArcInfo GRID [Капралов и др., 2004]. Эта операция, к примеру, проделывается с красным каналом аэрофотоснимка и космоснимка для пары «эталон-аэрофото». Полученные две поверхности будут иметь в первую очередь пространственные несовпадения, обусловленные причинами, описанными выше.

Для устранения пространственных несовпадений необходимо определить параметры оптимального сдвига одного из изображений. Их мы будем определять для космоснимка, как обладающего меньшей точностью привязки, чем аэрофотоснимок. Очевидно, что достоверно и гарантированно определить необходимые величины сдвига точнее, чем на 1 пикс, невозможно. Также, принимая во внимание вышесказанное, эти величины не могут составлять более 3 пикс по каждой из осей (для равнинных регионов). Следовательно, оптимальным смещением будет обладать одно из изображений, смещённых по каждой из осей на некую величину (dX и dY): 3, -2, -1, 0, 1, 2, 3 пикс — всего 49 вариантов (7 вариантов по оси X и 7 по оси У).

Для аэрофотоснимка произведём уменьшение разрешения до уровня космического снимка — это позволит сэкономить вычислительные мощности. Для каждого из 49 вариантов смещения космоснимка вычислим поверхность разностей спектральных яркостей для каждой ячейки изображения (поверхность dI), после чего возведем её в квадрат (dI²). Вычислив сумму ячеек в dI² для для каждого из 49 вариантов смещений dX и dY, выберем значения dX и dY, при которых сумма ячеек dI² минимальна. В случае наличия нескольких вариантов dX и dY с одинаковыми минимальными суммами dI² используется минимальное значение dX и dY. Такая ситуация возможна в местности с полностью однородным ландшафтом — лес, тундра, луговая растительность.

Теоретически вычисление суммы квадратов дельт яркостей даёт результат хуже, чем вычисление коэффициента корреляции Пирсона. Однако на практике вычисление

коэффициента корреляции для 49 вариантов занимает существенно (в несколько раз) большее время, не давая сколько-нибудь заметной разницы в результатах.

Определив оптимальные значения смещения dX и dY (в пикс), смещаем космический снимок на соответствующие значения в м. После этого можно переходить к работе непосредственно с яркостями пары «эталон-аэрофото».

3. Исправление готовых ортофотоснимков

Существует два основных подхода к внесению коррекций в яркости снимков, направленных на достижение одной цели — уравнивание яркостей. Это аддитивный и мультипликативный подходы.



Puc. 3. Ортофотоснимок без исправления теней Fig. 3. Ortoimage without shadow elimination



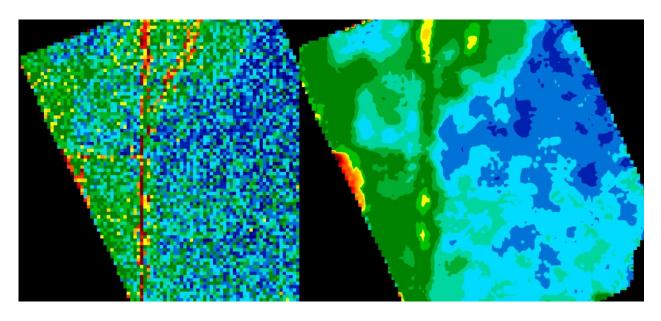
Puc. 4. Ортофотоснимок с исправленными тенями Fig. 4. Ortoimage with shadow elimination

Суть аддитивного подхода — вычисление поверхности разницы между эталоном (космоснимок) и исправляемыми данными (аэрофото), после чего к данным аэрофотоснимка прибавляется поверхность разницы. Метод малочувствителен к наличию на снимках контрастных мелких объектов, однако при значительных изменениях яркости по полю кадра или больших отличиях в яркостях эталона и аэрофотоснимка приводит к сильному вырождению снимков — потеря контрастности, искажения цветов.

Суть мультипликативного подхода — вычисление поверхности частного между эталоном (космоснимок) и исправляемыми данными (аэрофото), после чего данные аэрофотоснимка умножаются на поверхность частного. Метод чувствителен к наличию на снимках контрастных мелких объектов, однако при значительных изменениях яркости по полю кадра или больших отличиях в яркостях эталона и аэрофотоснимка не приводит к потере контрастности, позволяет работать даже при сильных отличиях эталона от исходных аэрофотоснимков [Shor, Lischinski, 2008].

На основании субъективных оценок и статистики применения данного подхода можно сделать вывод, что мультипликативный метод даёт более применимый на практике результат (рис. 3 и 4). Причина в том, что при малых различиях, удобных для аддитивного метода, исправлением яркостей в тенях от облаков можно и пренебречь. А при значительных различиях, когда коррекции не избежать, он даёт худший результат.

В обоих случаях получаемые поверхности нуждаются в фильтрации (рис. 5), сглаживании и приведении к разрешению аэрофотоснимка. В противном случае они будут иметь различные «артефакты» в виде квадратов-пикселов космического снимка, пикселов-выбросов и ореолов вокруг высококонтрастных изображений. Обычно для фильтрации применяется скользящее окно с радиусом 1–5 пикс космического снимка. Также возможно исключение отдельных участков из поверхности-дельты или поверхности-частного в тех районах, в которых есть высококонтрастные объекты с размерами менее или равным разрешению космоснимка.



Puc. 5. Поверхности разницы спектральных яркостей — исходная (слева) и после фильтрации (справа)
Fig. 5. Spectral brightness difference surfaces — original (left) and filtered (right)

4. Исправление готовых ортофотомозаик

Нетрудно заметить, что использование фильтрационных алгоритмов скользящим окном неизбежно ведёт к размыванию границ зон теней (или засветки). Ширина зоны перехода при этом, как следует из сказанного выше, составляет до 5 пикс (т.е. до 50-70 м). Тем не менее, на практике это не является принципиальной проблемой, в силу того что тень от облака на земле не является резкой границей, а как раз представляет собой зону перехода яркостей шириной до 100 м (в зависимости от высоты облачности и её оструктуренности) [Zhu et al., 2010]. Таким образом, при создании из полученных исправленных изображений итоговой ортофотомозаики данная особенность мало влияет на визуальные качества и в значительной степени нивелируется за счёт избыточности кадров и дополнительного их уравнивания по яркостям между собой (осуществляется программным обеспечением для создания мозаик, например, Inpho OrthoVista).



Puc. 6. Ортофотомозаика без исправления теней Fig. 6. Ortomosaic without shadow elimination



Puc. 7. Ортофотомозаика с исправлением теней Fig. 7. Ortomosaic with shadow elimination

Однако всё меняется в том случае, если мы пытаемся исправить тени на готовой ортофотомозаике (рис. 6). В этом случае резкие границы теней на соседних проходах (возникают за счёт движения облаков) не имеют природного размытия границ и чрезвычайно контрастны [Liu, Gleicher, 2008]. Описанный выше метод позволяет изменить яркости в центральных частях теней и засветов до эталонных значений, однако на границах между соседними снимками в мозаике начинают возникать световые ореолы. Это визуально нежелательно, а также ухудшает дешифровочные качества изображения по сравнению с созданием его из единичных снимков с исправленными тенями.

Тем не менее в любом случае итоговый результат всё равно лучше исходного (рис. 7). Положительной чертой данного метода является его большая скорость (в 4–6 р. и более), а также возможность использовать метод в том случае, если работа с исходными снимками не представляется возможной — данные предыдущих лет, работа с материалами других подрядчиков, недостаток времени и т.п. ситуации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результатами исследований и вышеприведённых соображений стало создание прототипа программного продукта на базе внутреннего языка программирования ArcView. Созданное программное обеспечение делает возможной работу с каталогизированными наборами ортотрансформированных изображений, подлежащих коррекции с использованием эталона.

При пакетной обработке данных возможна обработка группы изображений с использованием (т.е. в пределах) одного эталона. Спектральные каналы не имеют значения, но их число не должно превышать 3 (RGB или CIR). Разрядность изображений — 8 бит, в перспективе — 16 бит.

Рекомендованные настройки и параметры отлажены для разрешающей способности в 15-20 см для аэрофотоснимков и 10-15 м для космоснимков. Система координат растровых изображений должна быть единой (не реализовано перепроецирование «на лету»).

Основное назначение для данной работы — ортотрансформация кадров среднеформатных камер, используемых самостоятельно или в составе комплексов воздушного лазерного сканирования. Подход и программное обеспечение неприменимы для решения задач по мониторингу объектов с периодичностью менее 1 года, т.к. обеспечить адекватное по времени покрытие космическими данными чаще чем 1–2 р. в год невозможно или маловероятно — в этом случае будет возникать нестыковка наподобие следующей: на космоснимке объект есть, а на аэрофотосъёмке — нет.

Результаты обработки изображений при необходимости создания ортофотомозаики говорят о том, что наиболее оптимальным является сначала исправить тени на отдельных снимках, а потом создать из них ортофотомозаику, нежели исправлять уже готовую ортофотомозаику.

Технически программное обеспечение позволяет производить обработку снимков размером до 150 Мпикс. Теоретически предельным размером обрабатываемого изображения является 400—450 Мпикс, однако подобное тестирование не проводилось ввиду отсутствия подобных данных у авторов. На начало 2020 г. 150 Мпикс — предельное разрешение для среднеформатных камер; существуют и широкоформатные камеры подобного разрешения (более старые модели). Разрешение 400 и более Мпикс на 2020 г. не достигнуто ни одной из коммерчески доступных камер.

Описанный подход применим не только к изображениям кадровых камер, но и к изображениям со сканеров с ПЗС-линейкой. Единственным условием применимости является единство проекции, привязки и её качество (не хуже 2–3 пикс спутникового

изображения), а также необходимость ортотрансформировать все изображения до начала обработки.

выводы

Вышеописанные методы работы с изображениями были реализованы на практике в виде программного комплекса-прототипа на базе ГИС-пакета ArcView с использованием внутреннего языка программирования. Полученные результаты (как в части обработки отдельных ортофотоснимков, так и мозаик ортофотоснимков) говорят о перспективности подхода. Это открывает широкие перспективы для дальнейшего совершенствования данного метода и оптимизации процесса аэрофотосъёмки в условиях малопригодных погодных условий в районах Крайнего Севера и Дальнего Востока.

Работа с использованием данного метода более оптимальна в режиме работы с отдельными ортофотоизображениями, нежели с готовыми ортофотомозаиками. Это даёт существенно более качественное итоговое изображение, однако требует в 4–5 р. большего количества машинного времени. В случае реальных проектов, площадь которых измеряется тысячами км², это может занимать существенное количество времени.

Подход позволяет значительно улучшить визуальное восприятие изображений и их дешифровочные качества при визуальной (ручной) обработке. Подход не позволяет выполнить оптическую нормализацию кадров для целей автоматизированного дешифрирования. Предположительно, в горных условиях (затенённые ущелья, горы, отбрасывающие значительные тени) данный подход может дать некорректные результаты.

Тем не менее продемонстрированные результаты позволяют утверждать, что достигнутые результаты в работе с изображениями при незначительной сложности в обработке дают существенно более качественный результат на выходе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках госбюджетной тематики исследований Регионального центра Мировой системы данных (Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова) при содействии АО «Арк-он».

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was performed within the framework of a state budget theme of Regional Center of World Data System (Geographical Faculty of Moscow State University named after M.V. Lomonosov) in a collaboration with JSC "Ark-on".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Капралов Е.Г., Кошкарев А.В., Тикунов В.С. Основы геоинформатики. Учебное пособие для студентов вузов в 2-х книгах. М.: Академия, 2004. 480 с.
- 2. Руководство по аэрофотосъёмке в картографических целях. Военно-топографическое управление Генерального Штаба. М.: Редакционно-издательский отдел, 1989. 105 с.
- 3. Руководство по аэрофотосъёмочным работам. М.: Министерство гражданской авиации, 1986. 176 с.
- 4. *Dare M.* Shadow analysis in high-resolution satellite imagery of urban areas. Photogrammetric Engineering Remote Sensing, 2005. V. 71. P. 169–177. DOI: 10.14358/PERS.71.2.169.
- 5. *Finlayson G.*, *Drew M.*, *Lu C.* Entropy minimization for shadow removal. International Journal of Computer Vision, 2009. No 85. P. 35–57.
- 6. *Finlayson G.D.*, *Hordley S.D.*, *Drew M.S.* Removing shadows from images. 7th European Conference on Computer Vision. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002. P. 823–836.

- 7. *Guo R.*, *Dai Q.*, *Hoiem D.* Single-image shadow detection and removal using paired regions. CVPR (The Conference on Computer Vision and Pattern Recognition), Colorado Springs. IEEE, 2011. P. 2033–2040.
- 8. *Levine M.D.*, *Bhattacharyya J.* Removing shadows. Pattern Recognition Letters, 2005. V. 26. Iss. 3. P. 251–265. DOI: 10.1016/j.patrec.2004.10.021.
- 9. *Liu F.*, *Gleicher M.* Texture-consistent shadow removal. ECCV (10th European Conference on Computer Vision), Marseille, France, 2008. Lectures Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. V. 5305. P. 437–450. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-88693-8 32.
- 10. Shor Y., Lischinski D. The shadow meets the mask: Pyramid-based shadow removal. Computer Graphics Forum, 2008. V. 27. Iss. 2. P. 577–586. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2008.01155.x.
- 11. Zhu J., Samuel K., Masood S.Z., Tappen M. Learning to recognize shadows in monochromatic natural images. CVPR (IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition), San-Francisco, CA, USA, 2010. Proceedings. P. 223–230. DOI: 10.1109/CVPR.2010.5540209.

REFERENCES

- 1. *Dare M.* Shadow analysis in high-resolution satellite imagery of urban areas. Photogrammetric Engineering Remote Sensing, 2005. V. 71. P. 169–177. DOI: 10.14358/PERS.71.2.169.
- 2. *Finlayson G., Drew M., Lu C.* Entropy minimization for shadow removal. International Journal of Computer Vision, 2009. No 85. P. 35–57.
- 3. *Finlayson G.D.*, *Hordley S.D.*, *Drew M.S.* Removing shadows from images. 7th European Conference on Computer Vision. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002. P. 823–836.
- 4. Guidance in aerial photography. Moscow: Ministry of Civil Aviation, 1986. 176 p. (in Russian).
- 5. Guidance in aerial photography for cartographic purposes. Military Topographical Directorate of the General Staff. Moscow: Printing and publication department, 1989. 105 p. (in Russian).
- 6. *Guo R.*, *Dai Q.*, *Hoiem D.* Single-image shadow detection and removal using paired regions. CVPR (The Conference on Computer Vision and Pattern Recognition), Colorado Springs. IEEE, 2011. P. 2033–2040.
- 7. *Kapralov E.G., Koshkarev A.V., Tikunov V.S.* Fundamentals of geoinformatics. Moscow: Academy, 2004. 480 p.
- 8. *Levine M.D.*, *Bhattacharyya J.* Removing shadows. Pattern Recognition Letters, 2005. V. 26. Iss. 3. P. 251–265. DOI: 10.1016/j.patrec.2004.10.021.
- 9. *Liu F.*, *Gleicher M.* Texture-consistent shadow removal. ECCV (10th European Conference on Computer Vision), Marseille, France, 2008. Lectures Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. V. 5305. P. 437–450. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-88693-8_32.
- 10. Shor Y., Lischinski D. The shadow meets the mask: Pyramid-based shadow removal. Computer Graphics Forum, 2008. V. 27. Iss. 2. P. 577–586. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2008.01155.x.
- 11. Zhu J., Samuel K., Masood S.Z., Tappen M. Learning to recognize shadows in monochromatic natural images. CVPR (IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition), San-Francisco, CA, USA, 2010. Proceedings. P. 223–230. DOI: 10.1109/CVPR.2010.5540209.