

Методика расчёта критерия оценки качества спутникового изображения на основе вычисления геометрической концентрации

Е. А. Мальцев¹, Ю. А. Маглинец², Р. В. Брежнев²

¹ Сколковский институт науки и технологий, Москва, 121205, Россия
E-mail: evgenii.maltsev@gmail.com

² Институт космических и информационных технологий,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Россия

В работе рассмотрена методика расчёта критерия объективной оценки качества изображения на основе вычисления геометрической концентрации дефектов изображения. В качестве дефектов рассматриваются области, покрытые облачным покровом. Объективная оценка подразумевает автоматический режим расчёта без привлечения групп экспертов. Вычисление геометрической концентрации объектов на плоскости на основе триангуляции Делоне позволяет перейти на уровень анализа реляционных структур, учитывающих информацию о взаиморасположении объектов на изображении, и в том числе дать оценку характеру расположения дефектов в виде облачности на спутниковом снимке. В статье показано преимущество предложенного критерия качества спутникового изображения в сравнении с оценкой на основе процента облачности. Данный критерий может быть использован в каталогах спутниковых данных при отборе данных для тематической обработки. Проведена апробация методики расчёта критерия на случайной выборке снимков дистанционного зондирования Земли, получены количественные результаты, характеризующие степень применимости изображений для тематической обработки. Сформулированы рекомендации применения рассматриваемого критерия при отборе и фильтрации спутниковых снимков в задачах агромониторинга.

Ключевые слова: обработка изображений, дистанционное зондирование, оценка качества изображения, геометрическая концентрация, облачность

Одобрена к печати: 21.08.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-35-44

Введение

Технологии создания тематических продуктов и сервисов, базирующихся на обработке данных дистанционного зондирования (ДДЗ) Земли, развиваются быстрыми темпами. Основой для их функционирования стали процедуры предварительной обработки и отбраковки исходных «сырых» изображений. Для этого применяют методы анализа наличия искажений в исходных данных, степени влияния искажений на дальнейшую обработку и оценки качества.

При использовании ДДЗ, основанных на регистрации отражения электромагнитных волн оптического спектра подстилающей поверхности с использованием сенсоров, расположенных на борту космических аппаратов, возникает ряд потенциальных источников искажений.

Так, фотометрические искажения космических изображений, возникающие как следствие наличия помех, вносимых аппаратурой съёмочной системы, и помех, связанных с оптическими явлениями в атмосфере, могут быть частично компенсированы предварительной обработкой на основе радиометрической и атмосферной коррекции. Существенным фактором, влияющим на отбраковку исходных «сырых» космических снимков, оказывается облачный покров, который может рассматриваться как помеха, вызванная наличием физических препятствий в тракте передачи информации между сенсорами, регистрирующими отражённое излучение, и исследуемыми объектами. В зависимости от протяжённости снимаемого объекта и климатических факторов наличие облачности может обуславливать существенные задержки в поступлении данных для мониторинга наземных объектов. Так, для программы Landsat-8 по данным на сельскохозяйственную часть Красноярского края за вегетационный период 2019 г. (с мая по сентябрь) для одной и той же точки съёмки получено в среднем пять

снимков с облачностью ниже 5 %, а за соответствующий период 2018 г. — девять. Эти обстоятельства определяют потребность в стратегии, нацеленной не на отбраковку данных с облачностью выше заданного процента, а на поиск возможностей частичного использования данных с высоким процентом облачности.

В региональных центрах и федеральных банках данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) объёмы накапливаемых спутниковых изображений возрастают с каждым годом, что обуславливает необходимость поиска и апробации новых критериев и метрик для поиска и фильтрации данных, релевантных решаемым задачам мониторинга. При этом помимо пространственно-временных характеристик спутниковых изображений целесообразно привлекать дополнительную информацию, в частности основанную на анализе реляционных структур, учитывающих сведения о взаиморасположении объектов на изображении. В работе рассмотрена реализация и апробация критерия объективной оценки качества изображения на основе анализа геометрической концентрации облачности на изображении, предложенного в работах (Мальцев и др., 2018, 2019).

Задача оценки качества изображения в спутниковых архивах данных

Объективные оценки изображений могут быть получены путём статистического анализа значений субъективных оценок с привлечением экспертных групп (*англ.* mean opinion score — MOS) (Methods..., 2006). Однако для систем массовой обработки данных, к которым относятся системы ДЗЗ, более предпочтительны оценки качества изображений, получаемые в автоматическом режиме. К таким оценкам можно отнести следующие:

1. Пиковое значение сигнал/шум PSNR (*англ.* Peak Signal to Noise Ratio) (Гонсалес, 2005), определяемое через среднеквадратичное отклонение MSE (*англ.* Mean Square Error), которое для спутниковой сцены размером $N \times N$ пикселей будет вычисляться следующим образом:

$$MSE = \frac{1}{N \cdot N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} |I(i, j) - K(i, j)|^2,$$

где $I(i, j)$ и $K(i, j)$ — значения спектральной яркости в выбранном спектральном канале эталонного и искажённого дефектами изображения соответственно;

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{MAX^2}{MSE} \right),$$

где MAX — максимальное значение радиометрического разрешения изображения.

2. Норма Минковского (Bandyopadhyay, Saha, 2013), которая может быть рассчитана по формуле:

$$\rho(I, K) = \left\{ \frac{1}{N \cdot N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} |I(i, j) - K(i, j)|^p \right\}^{1/p}.$$

3. Метрика структурного сходства SSIM (от *англ.* Structural SIMilarity):

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x \mu_y + C_1) \cdot (2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1) \cdot (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)},$$

где $\mu_x, \mu_y, \sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_{xy}$ — средние значения, дисперсии и коэффициент ковариации двух изображений: эталонного (x) и искажённого дефектами (y); коэффициенты: $C_1 = 6,5$, $C_2 = 58,52$ (Wang et al., 2004).

Анализ качества изображений в рассмотренных метриках основан на результатах сопоставления числовых мер различий эталонного и искажённого дефектами изображения, однако

эти оценки не учитывают особенности человеческого восприятия. Кроме того, использование таких оценок в качестве критерия поиска спутниковых изображений затруднительно ввиду необходимости сравнения двух изображений на одну и ту же территорию с одинаковыми условиями съёмки, что не всегда представляется возможным.

В работах (Сай, 2018; Сай, Сорокин, 2012) представлен метод оценки визуальной чёткости фотореалистичных изображений по объективному критерию без использования эталона. Метод основан на алгоритме распознавания мелких деталей на изображении и сравнении усреднённого количества распознанных мелких структур с заданным пороговым значением. Такая метрика используется для оценки качества сжатых изображений для видеопотока. Однако в задачах космического мониторинга при отборе исходных данных оператором требуется оценка взаиморасположения объектов на снимке, т. е. обработка данных на уровне объектов и реляционных структур.

Одной из основных оценок качества спутниковых изображений, применяемых в спутниковых архивах, стал критерий степени зашумлённости, основанный на расчёте процента облачности. Данный критерий определяется следующим образом: осуществляется сегментация изображения с выделением пикселей облачности, на основе которой формируется бинарная маска облачности. Оценка процента облачности (степень покрытия снимка облачным покровом) вычисляется на основе соотношения:

$$P = \frac{S_1}{S} 100 \%,$$

где P — результирующая оценка; S_1 — количество пикселей облачности; S — число пикселей обрабатываемого изображения.

Данный процент облачности как критерий поиска присутствует во многих интерфейсах каталогов данных ДЗЗ, например таких как:

- геопортал Роскосмоса (<https://gptl.ru/>);
- каталог данных Научного центра оперативного мониторинга Земли (<http://www.nt-somz.ru>);
- интерактивный каталог ЗАО «СканЭкс» (<http://catalog.scanex.ru>);
- каталог спутниковых данных Сибирского отделения Российской академии наук;
- каталог спутниковых данных Института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета (ИКИТ СФУ) (<http://digitalatlas.ru>).

Указанный критерий хорошо работает для отбора безоблачных изображений, однако не решает проблему оценки степени пригодности зашумлённых облачностью космических снимков для решения задач мониторинга в условиях недостатка исходных данных (Мальцев и др., 2011; Maltsev et al., 2011).

Методика расчёта критерия оценки качества изображений на основе вычисления геометрической концентрации

В статье обсуждается объективная оценка качества спутниковых изображений без использования эталона на основе расчёта геометрической концентрации сегментированных объектов, представляющих собой дефекты, искажающие изображение, на примере облачности. Концепция оценки геометрической концентрации и плотности объектов основывается на использовании триангуляция Делоне (рис. 1, см. с. 38). В качестве альтернативы может быть применена диаграмма Вороного.

Для оценки характера расположения дефектов в виде облачности на спутниковом снимке выполняется расчёт коэффициента геометрической концентрации объектов на плоскости $c_i(t^i)$ (Перфильев, Цибульский, 2007; Perfilev et al., 2009):

$$c_i(t^i) = \frac{\Delta NS_i}{NS_i},$$

где t^i — цель анализа (класс объектов); ΔNS_i — площадь треугольной области, образованной тремя геометрическими центрами областей, представляющих целевые объекты, находящиеся на минимальном евклидовом расстоянии друг от друга; NS_i — сумма площадей областей (объектов), представляющих вершины треугольной области.

Измерение элементов триангуляции позволяет выделить области изображения, где наблюдается высокая, средняя или низкая (фоновая) геометрическая концентрация объектов (рис. 2).

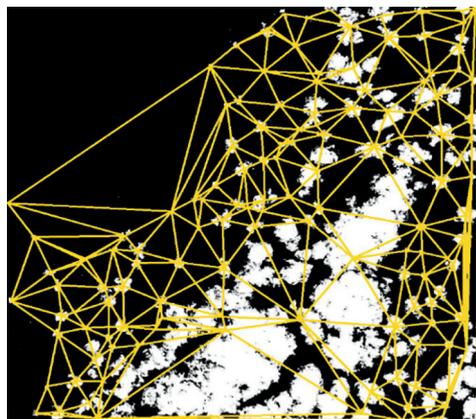


Рис. 1. Построенная триангуляция Делоне: белый цвет — бинарная маска облачности; чёрный цвет — фон

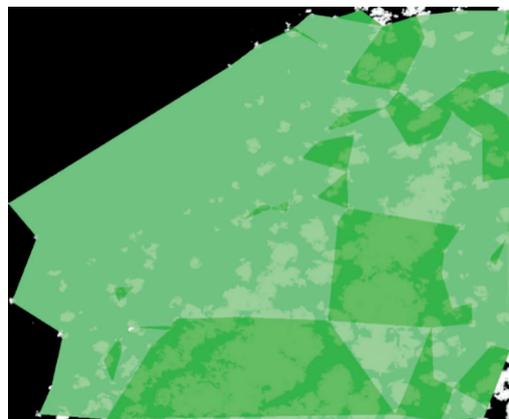


Рис. 2. Пример расчёта геометрической концентрации. Значения концентрации «низкая», «средняя», «высокая» даны в оттенках зелёного

На основе анализа совокупности изображений в каталоге ДДЗ ИКИТ СФУ были определены следующие значения для расчёта геометрической концентрации, используемые в качестве пороговых (Мальцев, 2017):

- 0–0,05 — низкая геометрическая концентрация c_1 ;
- 0,05–1 — средняя геометрическая концентрация c_2 ;
- 1–max — высокая геометрическая концентрация c_3 .

В качестве оценки K , применяемой как критерий для поиска и отбраковки изображений в каталоге ДДЗ, предлагается использовать отношение площади, занимаемой областями средней и высокой концентрации облачности, к общей площади всего изображения:

$$K = \frac{S_{c_2} + S_{c_3}}{S_a} 100 \%,$$

где S_{c_2} — площадь средней концентрации; S_{c_3} — площадь высокой концентрации; S_a — площадь всего изображения.

Апробация методики

Экспериментальная апробация разработанного метода геометрической концентрации объектов произведена на снимках совместной спутниковой программы Евросоюза Spot-4 среднего пространственного разрешения (20 м) на базе архива данных ДДЗ ИКИТ СФУ. Вычисление предложенного критерия объективной оценки качества изображения позволило предварительно оценить процент неинформативных пикселей, соответствующих облачности или дымке, и расширить метаданные изображений, включив показатели облачности и концентрации. В результате апробации обработано порядка 40 % архива данных Spot-4, принятых в 2008–2009 и 2011–2012 гг., что составляет около 104 тыс. сцен, для каждой из которых получены маски облачности.

Для визуального представления расчёта предлагаемого критерия объективной оценки изображения был разработан интерфейс модуля «Обработка изображений» системы ДЗЗ Сибирского федерального университета (<http://digitalatlas.ru>), показанный на *рис. 3*. При выделении объектов использованы квадродережья, триангуляция Делоне была построена на основе использования пошагового алгоритма с k-D-деревом поиска. Для проверки условия Делоне использовался способ «с заранее вычисленной окружностью».

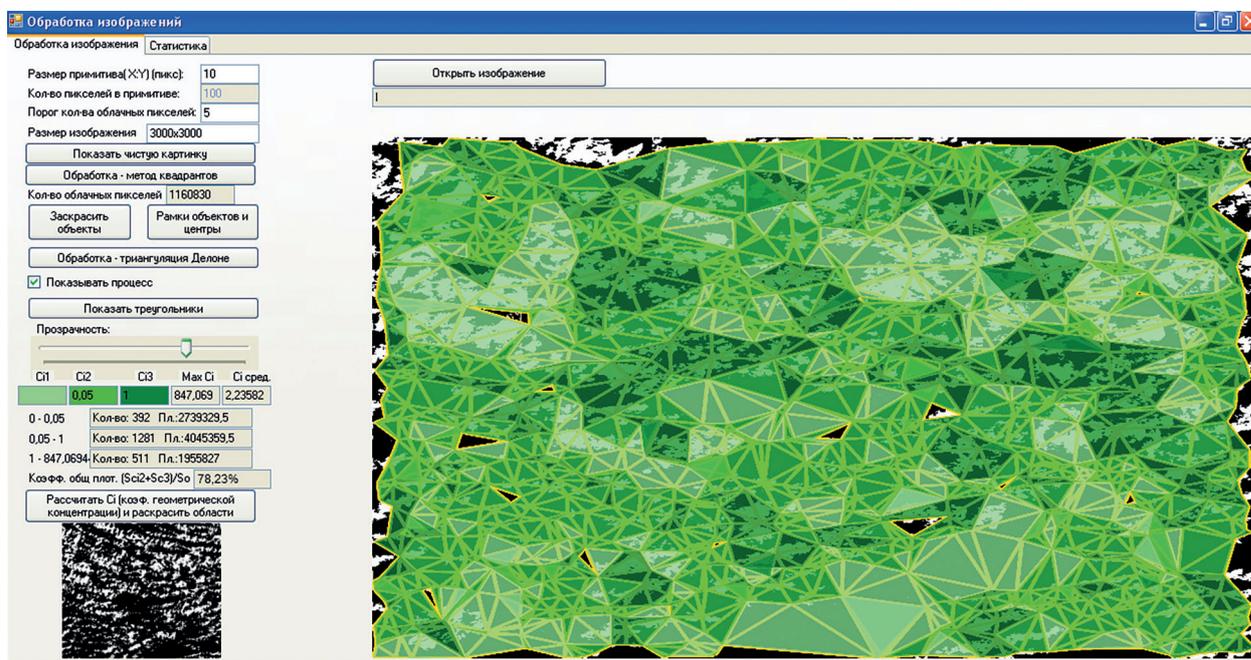
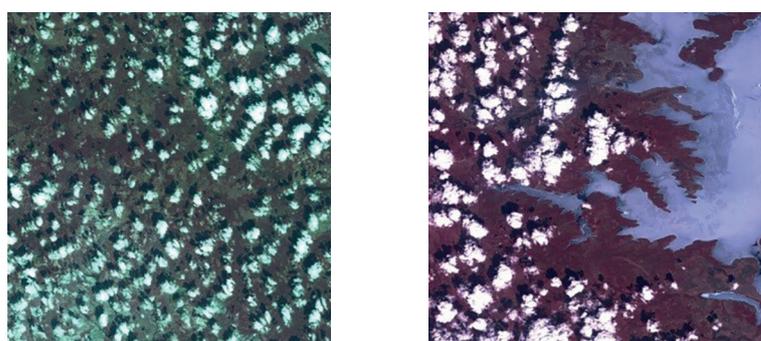


Рис. 3. Разработанный интерфейс модуля «Обработка изображений»

В качестве наглядной демонстрации результатов функционирования предложенного алгоритма рассмотрим сравнение его работы на паре спутниковых изображений (*рис. 4*), обладающих одинаковым процентом облачности ($P = 11\%$). Оценка K для данных изображений принимает значения соответственно 77 и 43 %.



а

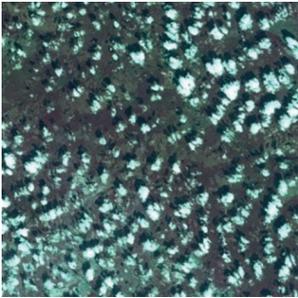
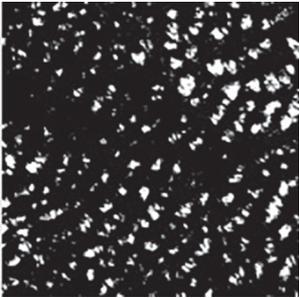
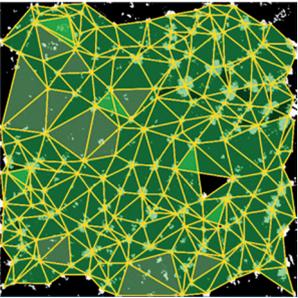
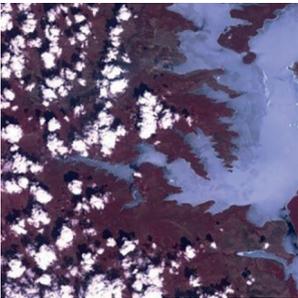
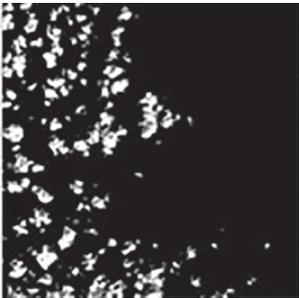
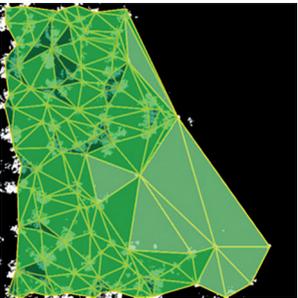
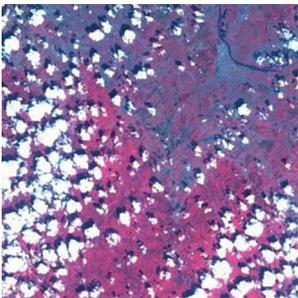
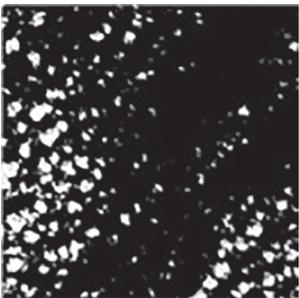
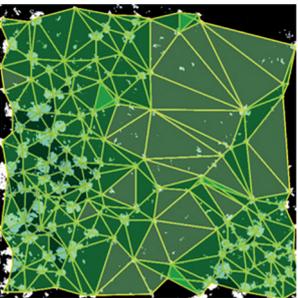
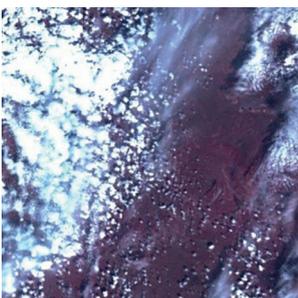
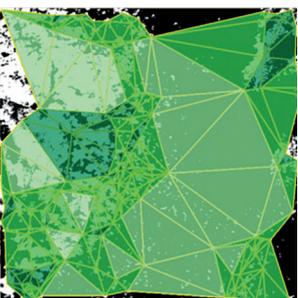
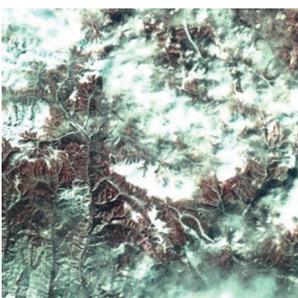
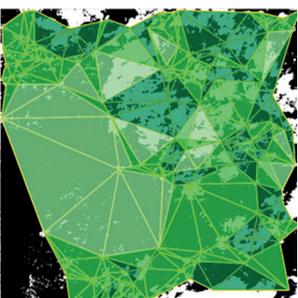
б

Рис. 4. Спутниковые изображения. Процент облачности — 11 %

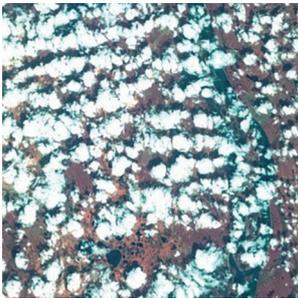
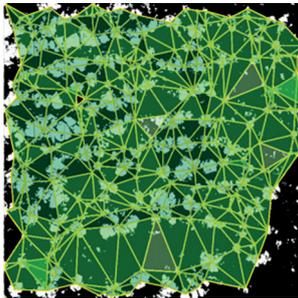
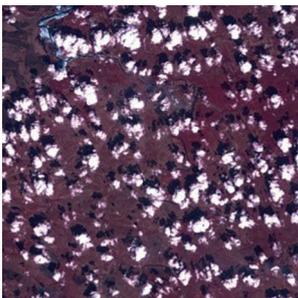
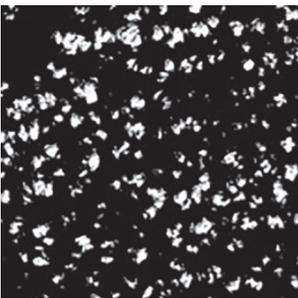
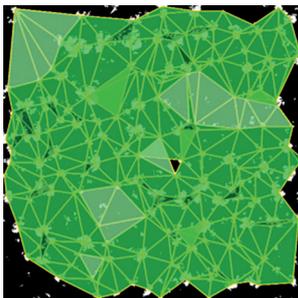
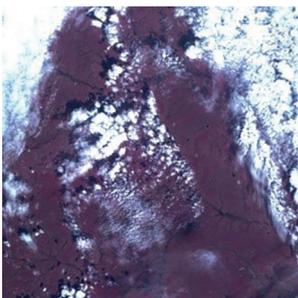
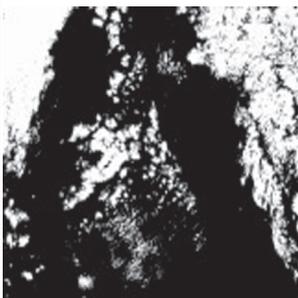
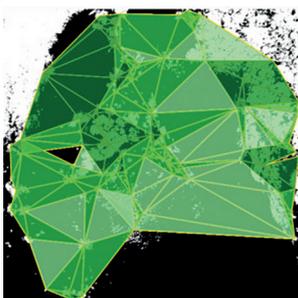
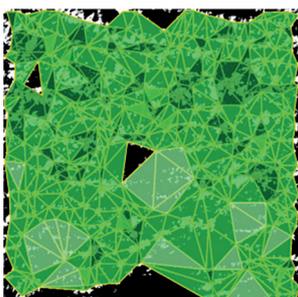
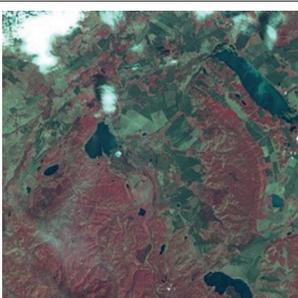
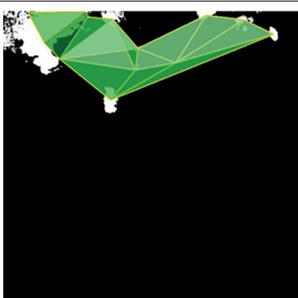
Данная оценка коррелирует с субъективным восприятием изображения и показывает, что использование снимка, приведённого на *рис. 4а*, затруднительно, в то время как изображение, представленное на *рис. 4б*, может быть частично использовано для дальнейшей тематической обработки.

Далее в *таблице* приведены данные, демонстрирующие примеры обработки спутниковых изображений, включая расчёт процента облачности P и её концентрации K .

Примеры вычисления на спутниковых изображениях процента облачности и предлагаемой оценки K

Исходное изображение	Маска облачности	Расчитанная геометрическая концентрация	Облачность P , %	Концентрация K , %
			11	77
			1	43
			12	54
			25	42
			28	53

Окончание таблицы

Исходное изображение	Маска облачности	Рассчитанная геометрическая концентрация	Облачность P , %	Концентрация K , %
			25	81
			13	75
			25	39
			23	78
			7	6

На *рис. 5* (см. с. 42) приведена диаграмма распределения значений процента облачности и её геометрической концентрации для представленных спутниковых снимков.

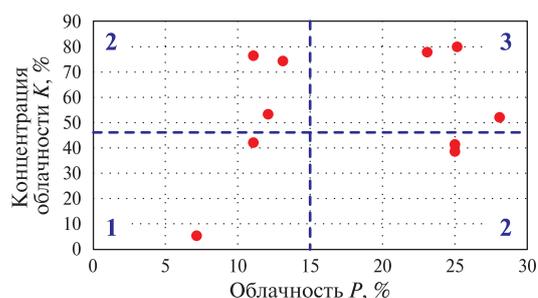


Рис. 5. Диаграмма распределения значений процента облачности и её геометрической концентрации для представленных спутниковых снимков

Из диаграммы видно, что спутниковые изображения, наиболее предпочтительные для дальнейшей тематической обработки, соотносятся с квадрантом 1 со следующими диапазонами значений P и K :

$$\begin{cases} 0 \leq P \leq 15 \%, \\ 0 \leq K \leq 45 \%. \end{cases}$$

Данные диапазоны значений позволяют более точно строить поисковые запросы к базам данных спутниковых снимков для отбора изображений, предпочтительных для дальнейшей тематической обработки.

Заключение

В работе рассмотрена методика расчёта критерия оценки качества изображений K на основе расчёта геометрической концентрации. Данная методика была реализована в программном модуле оценки изображений в составе системы дистанционного зондирования Земли ИКИТ СФУ.

Апробация данной методики по расчёту критерия оценки изображений на множестве спутниковых снимков Spot-4 среднего пространственного разрешения (20 м) позволила получить следующие рекомендации:

- 1) снимки с низким процентом облачности (до 10 %), но со сплошным характером её расположения, со значением K более 70 % могут быть менее привлекательны для дальнейшего использования в тематической обработке, к примеру в задачах агромониторинга;
- 2) снимки с повышенным процентом облачности (10–25 %) могут быть более привлекательны для решения поставленных задач, но со значением K менее 45 %.

Рассмотренный метод хорошо коррелирует с экспертными оценками пригодности изображений для тематической обработки, что позволяет использовать его наряду с традиционной оценкой облачности в задачах поиска и фильтрации данных в каталогах ДЗЗ.

Следует отметить, что предложенный алгоритм апробирован на данных среднего пространственного разрешения для расчёта облачности, однако он может быть применён для анализа других целевых объектов с использованием спутниковых данных разных пространственных разрешений.

Литература

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений / пер. с англ. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
2. Мальцев Е. А. Разработка алгоритмов обработки данных дистанционного зондирования Земли для распознавания пространственных объектов сельскохозяйственного назначения с линейной геометрической структурой: дис. ... канд. техн. наук. 2017. 136 с.

3. Мальцев Е. А., Перфильев Д. А., Сиротин Э. Е., Цибульский Г. М. Измерение облачности на снимках, полученных со спутника Spot-4 // Журн. Сибирского федер. ун-та. Сер. «Техника и технологии». Вып. 5. Т. 2. 2011. С. 229–242.
4. Мальцев Е. А., Маглинец Ю. А., Цибульский Г. М. Объективная оценка качества изображения на основе расчета геометрической концентрации // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы 5-й Международной науч. конф. / Сибирский федер. ун-т. Красноярск, 2018. С. 143–146.
5. Мальцев Е. А., Маглинец Ю. А., Брежнев Р. В. Апробация критерия объективной оценки качества изображения на основе расчета геометрической концентрации // Материалы Семнадцатой Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 11–15 нояб. 2019. М: ИКИ РАН, 2019. С. 44. DOI: 10.21046/17DZZconf-2019a.
6. Перфильев Д. А., Цибульский Г. М. Область концентрации сегментов металлографических изображений деформируемых алюминиевых сплавов // Вестн. Сибирской аэрокосм. акад. им. академика М. Ф. Решетнева. Вып. 6. 2007. С. 30–32.
7. Сай С. В. Метрика искажений мелких структур компрессированных изображений // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. № 5. С. 829–837.
8. Сай С. В., Сорокин Н. Ю. Метод оценки четкости фотореалистичных изображений без использования эталона // Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. 2012. Т. 2. С. 26.
9. Bandyopadhyay S., Saha S. Similarity Measures // Unsupervised Classification. Berlin: Springer, 2013. P. 59–73.
10. Maltsev E. A., Siroitin E. E., Perfil'ev D. A., Tsi bulskii G. M. Extracting a Cluster of Clouds in the Spot-4 Satellite Images // Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications. 2011. V. 21. Iss. 21. Art. No. 522. P. 522–525.
11. Methods for objective and subjective assessment of speech and video quality. Mean opinion score (MOS) terminology. Series P: terminals and subjective and objective assessment methods. P.800.1. ITU-T. Report. Intern. Telecommunication Union, 2006. 18 p.
12. Perfil'ev D. A., Maglinets Yu. A., Tsi bulskiy G. M. Family of Models for Describing One Class of Metallographic Images // Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications. 2009. V. 19. Iss. 2. P. 334–341.
13. Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity // IEEE Trans. Image Processing. 2004. V. 2. Iss. 4. P. 600–612.

Calculation technique of satellite imaging quality assessment criterion based on geometrical concentration calculation

Е. А. Maltsev¹, Yu. A. Maglinets², R. V. Brezhnev²

¹ Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow 121205, Russia
E-mail: evgenii.maltsev@gmail.com

² Institute of Space and Information Technologies,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660041, Russia

The paper considers calculation methods of an objective satellite imaging quality assessment criterion based on geometrical concentration of image defects. Areas covered with clouds are considered as defects. An objective assessment implies an automatic calculation mode without the involvement of expert groups. Calculation of the geometrical concentration of objects on the plane based on Delaunay triangulation allows to proceed to the level of relational structures analysis, taking into account the information about mutual position of the objects in the image, and moreover to assess the nature of defects positioning in the form of a cloud cover. The paper shows the advantage of the proposed criterion of satellite image quality in comparison with the assessment based on the percentage of cloudiness. This criterion can be used in satellite data catalogs when selecting data for thematic processing. Approbation of calculation methods was conducted using random sampling of satellite images; the obtained quantitative results characterize the degree of images applicability for thematic processing. Recommendations for the application of the criterion under consideration in the selection and filtering of satellite images in the tasks of agricultural monitoring are formulated.

Keywords: image processing, remote sensing, image quality assessment, geometrical concentration, cloudiness

Accepted: 21.08.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-35-44

References

1. Gonsales R., Vuds R., *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii* (Digital image processing), Moscow: Tekhnosfera, 2006, 1072 p.
2. Maltsev E. A., *Razrabotka algoritmov obrabotki dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli dlya raspoznaniya prostranstvennykh ob'ektov sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya s lineinoi geometricheskoi strukturoi: Diss. kand. tekhn. nauk* (The development of processing algorithms for Earth remote sensing data for the recognition of spatial objects of agricultural purpose with a linear geometric structure, Cand. techn. sci. thesis), 2017, 136 p.
3. Maltsev E. A., Perfil'ev D. A., Sirotin E. E., Tsibulskii G. M., *Izmerenie oblachnosti na snimkakh, poluchennykh so sputnika Spot-4* (Cloud measurement in images acquired from the SPOT-4 satellite), *J. Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, 2011, Vol. 2, Issue 5, pp. 229–242.
4. Maltsev E. A., Maglinets Yu. A., Tsibulskii G. M., *Ob'ektivnaya otsenka kachestva izobrazheniya na osnove rascheta geometricheskoi kontsentratsii* (Objective assessment of image quality based on calculation of geometric concentration), *Regional'nye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Regional problems of Earth remote sensing), Proc. Intern. Scientific Conf., Krasnoyarsk, 2018, pp. 143–146.
5. Maltsev E. A., Maglinets Yu. A., Brezhnev R. V., *Aprobatsiya kriteriya ob'ektivnoi otsenki kachestva izobrazheniya na osnove rascheta geometricheskoi kontsentratsii* (Testing the criteria for an objective assessment of image quality based on the calculation of geometric concentration), *Materialy Semnadsatoi Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 17th Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), 11–15 Nov. 2019, Moscow: IKI RAN, 2019, p. 44, DOI: 10.21046/17DZZconf-2019a.
6. Perfil'ev D. A., Tsibulskii G. M., *Oblast' kontsentratsii segmentov metallograficheskikh izobrazhenii deformiruemykh alyuminievykh splavov* (The concentration range of segments of metallographic images of deformable aluminum alloys), *Vestnik Sibirskoi aerokosmicheskoi akademii imeni akademika M. F. Reshetneva*, 2007, Issue 6, pp. 30–32.
7. Sai S. V., *Metrika iskazhenii melkikh struktur kompressirovannykh izobrazhenii* (Distortion metric of small structures of compressed images), *Komp'yuternaya optika*, 2018, Vol. 42, No. 5, pp. 829–837.
8. Sai S. V., Sorokin N. Yu., *Metod otsenki chetkosti fotorealisticnykh izobrazhenii bez ispol'zovaniya etalona* (Method of assessing the clarity of photorealistic images without using a reference), *Elektronika, izmeritel'naya tekhnika, radiotekhnika i svyaz'*, 2012, Vol. 2, pp. 26.
9. Bandyopadhyay S., Saha S., *Similarity Measures*, *Unsupervised Classification*, Berlin: Springer, 2013, pp. 59–73.
10. Maltsev E. A., Sirotin E. E., Perfil'ev D. A., Tsibulskii G. M., *Extracting a Cluster of Clouds in the Spot-4 Satellite Images*, *Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications*, 2011, Vol. 21, Issue 21, Art. No. 522, pp. 522–525.
11. *Methods for objective and subjective assessment of speech and video quality, Mean opinion score (MOS) terminology, Series P: terminals and subjective and objective assessment methods, P.800.1. ITU-T, Report*, Intern. Telecommunication Union, 2006, 18 p.
12. Perfil'ev D. A., Maglinets Yu. A., Tsibulsky G. M., *Family of Models for Describing One Class of Metallographic Images*, *Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications*, 2009, Vol. 19, Issue 2, pp. 334–341.
13. Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P., *Image quality assessment: from error visibility to structural similarity*, *IEEE Trans. Image Processing*, 2004, Vol. 13, Issue 4, pp. 600–612.