

## Модель бортовой оценки облачности над районом съемки при дистанционном зондировании из космоса

А.Н. Григорьев

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского  
Санкт-Петербург, 197082, Россия  
E-mail: Grig-AN@ya.ru*

В статье рассматриваются результаты исследования по разработке математического аппарата оценивания поля облачности над заданным районом при космической съемке. Предметом исследования является перечень математических объектов, моделирующих информативные данные о поле облачности на разных стадиях обработки. Цель работы состоит в повышении эффективности системы дистанционного зондирования за счет рационального использования ее ресурсов. Анализ современных методов определения облачности показал возможность использования спектральных данных, зарегистрированных в диапазоне 0,4–2,5 мкм. Автором разработана новая модель оценки облачности над заданным районом, которая должна вычисляться в бортовом оптико-электронном специальном комплексе с блоками регистрации и обработки данных о поле облачности. Оценка облачности вычисляется на основе массива оценок наличия облачности в элементах разрешения бортового специального комплекса. Массив оценок формируется по данным от информативных спектральных каналов. Обработка спектральных данных выполняется по пороговым значениям и весовым коэффициентам, определяемым при планировании съемки для конкретных условий. Реальные данные космической видеоспектральной съемки были использованы для проведения частичного эксперимента по вычислению оценок облачности. Автором сформулированы перспективные пути развития модели бортовой оценки облачности.

**Ключевые слова:** условия съемки, маска облачности, бортовая обработка, квантованная яркость, радиометрическая коррекция, планирование съемки

### Введение

Объекты дистанционного зондирования с высоким и сверхвысоким пространственным разрешением, как правило, расположены на поверхности Земли. Ведение целевой съемки с космических и воздушных носителей выполняется в сложных нестационарных внешних и внутренних для системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) условиях. Съемка может выполняться в разных диапазонах спектра электромагнитного излучения. Наиболее распространенными видами данных являются материалы панхроматической и многоспектральной съемки в оптическом диапазоне. Одним из существенных факторов, ограничивающих, в первую очередь, производительность космической системы ДЗЗ с оптико-электронным бортовым специальным комплексом (БОЭСК), является облачность – сложно прогнозируемая оптическая помеха с допустимо случайным пространственным распределением. На современном этапе действие этого фактора компенсируется за счет краткосрочных вероятностных прогнозов, выполняемых на основе данных от мировой сети метеорологических станций и оперативного метеорологического наблюдения из космоса. Слабой стороной прогноза является высокая пространственная обобщенность результатов и его низкая оправдываемость при отсутствии актуальных метеоданных, составляющая не более 30% (Будовый, Бухаров, 2004). Если доступ к актуальным мировым метеоданным существует, то оправдываемость вероятностных прогнозов может достигать 80%.

В силу указанных особенностей значительная часть потока зарегистрированных при ведении целевой съемки целевых данных может быть непригодной для решения

практических задач из-за наличия изображений поля облачности. В таком случае имеет место избыточность ресурсов, затрачиваемых на передачу и первичную наземную обработку целевых данных, что приводит к неоправданному ожиданию материалов конечным потребителем. Таким образом, отбраковка неудовлетворяющих по содержанию целевых данных ДЗЗ на первых этапах обработки является актуальной и важной задачей, решение которой обеспечит рациональное использование ресурсов системы и в результате приведет к повышению эффективности системы ДЗЗ в целом. Эту задачу следует рассматривать с двух сторон. Во-первых, требуется концептуальная и математическая разработка оценки покрытия облачностью заданного района в момент съемки, основанная на выборе инструментальной методологии регистрации информативных данных о поле облачности на фоне основных типов суши в разные сезоны. Во-вторых, необходимо выполнить описательное моделирование бортового специального комплекса с блоками регистрации и обработки данных о поле облачности, обеспечивающего возможность отбраковки целевых данных съемки на ранних этапах обработки.

В исследовании предлагается модель бортовой оценки облачности над районом съемки при дистанционном зондировании из космоса, интерес разработки которой представляет практический способ ее использования на основе современных достижений в области оптико-электронного приборостроения и обработки многоспектральных данных об объектах на подстилающей поверхности и в приземном слое атмосферы.

### **Современные методы определения облачности по данным дистанционного зондирования Земли**

К основным способам регистрации данных о пространственном распределении поля облачности относятся многоспектральное и микроволновое дистанционное зондирование, которые позволяют в результате сбора данных и их наземной обработки построить тематическую карту – маску облачности, привязанную к моменту времени регистрации данных. Микроволновые зондировщики работают в диапазоне длин волн от 1 мм до 1 м и обеспечивают качественное решение задачи наблюдения за облачностью только на фоне водной поверхности морей и океанов (Митник и др., 2013) и не применимы над сушей, что исключает рассмотрение этого класса приборов в контексте данного исследования.

В вопросе оценивания распределения облачности по данным многоспектральной съемки наибольшее внедрение в практику получила группа методов, дающих результат с вероятностью достоверного определения облачности более 0,9. Эти методы основаны на обработке данных от видимого участка спектра и всех инфракрасных поддиапазонов (Askerman et al., 2010). К используемому полностью или частично набору спектральных каналов относятся узкие участки спектра с центрами 0,413; 0,65; 0,86; 1,38; 1,6; 3,9; 6,7; 8,6; 11; 12; 13,9 мкм. Указанные методы ориентированы на использование данных от БОЭСК космических аппаратов ДЗЗ серий Terra, Aqua, Landsat (Лупян и др., 2012). Особенностью такого

подхода является сложная реализация БОЭСК из нескольких подсистем для каждого поддиапазона спектра. Поэтому восстановление геометрических свойств данных, зарегистрированных в пространственно разнесенных оптико-электронных блоках, является сложной операцией и реализуемо только в наземных условиях.

Также известен метод вычисления маски облачности, основанный на использовании данных от диапазона, ограниченного интервалом 0,4–2,5 мкм (Griffin et al., 2005). При обработке используются данные шести узких спектральных каналов с центрами 0,55; 0,65; 0,86; 1,25; 1,38; 1,6 мкм. Содержание метода состоит в вычислении ряда математических объектов, включающих отношения и нормализованные разностные отношения коэффициентов спектральной яркости. Результаты вычислений и данные определенных каналов проходят набор тестов, позволяющих отнести исследуемый элемент к одному из заданных классов объектов. В исследованиях (Griffin et al., 2005) подтверждена работоспособность метода вычисления маски облачности, что отчасти обосновывает реализуемость рассматриваемых исследований.

Оценивание облачности на борту носителя не является новой идеей. Существуют публикации с положительными оценками возможностей современных методов автоматического определения облаков и их реализации в бортовых спецвычислителях (Ballou, Miller, 2002; El-Araby et al., 2005). Кроме того, ряд исследований (Чапурский, 1976; Чапурский, Андреева, 1978) показывают существование конкретных информативных спектральных каналов для определения облачности на малоконтрастном фоне: например, заснеженной поверхности или обнаженных грунтов с высокой отражающей способностью. При этом вопросы обоснования состава и структуры устройств для получения и обработки данных об облачности при ведении детального наблюдения с учетом современного уровня развития технологий оптико-электронного приборостроения являются неисследованными и являются объектом дополнительных разработок.

### Модель оценки покрытия облачностью заданного района

Оценивание облачности на борту КА ДЗЗ выполняется по полученному при съемке заданного района массиву бинарных данных  $\mathbf{DCA}_{NCE}$  с использованием БОЭСК, включающего блоки регистрации и обработки данных о поле облачности. Массив  $\mathbf{DCA}_{NCE}$ , который в наземном варианте является прототипом цифровой маски облачности над заданным районом, есть кортеж значений  $\mathbf{DCA}_{NCE} = \langle dca_{nce} \rangle_{NCE}$ ;  $nce = 1(1)NCE$ , где  $dca_{nce}$  – оценка наличия облачности в элементе разрешения БОЭСК,  $nce$  – номер элемента массива  $dca_{nce}$  при общем числе элементов массива  $NCE$ .

Значение оценки  $dca_{nce}$  равно нулю при соответствии элемента безоблачному участку района, или равно единице при попадании элемента в поле облачности. На современном этапе разработка метода ведения ДЗЗ с бортовым оцениванием поля облачности ведется в интересах создания систем для решения класса прикладных задач, требующих получения

непрерывного покрытия обширных территорий безоблачными снимками с высокой детальностью. В качестве оценки покрытия заданной территории отдельного снимка облачностью можно использовать отношение площади поля облачности к общей площади заданной территории. Но корректное автоматическое вычисление площадей при бортовой обработке является сложной задачей, поэтому вводится допущение в виде пренебрежения масштабными искажениями в полосе захвата БОЭСК, что позволяет для некоторого случая съемки трансформировать вычисление оценки в отношении числа элементов, соответствующих облачности, к общему числу элементов данных:

$$ECA = \sum_{nce=1}^{NCE} dca_{nce} / NCE. \quad (1)$$

Значение каждого элемента  $dca_{nce}$  определяется с использованием математического аппарата оценивания наличия облачности в элементах спектральных данных, формирующих массив:

$$\mathbf{DSC}_{NCE} = \langle (L_1, \dots, L_{nsc}, \dots, L_{NSC})_{nce} \rangle_{NCE}; nsc = 1(1) NSC, \quad (2)$$

где  $L_{nsc}$  – квантованное значение спектральной яркости в спектральном канале  $nsc$  при числе каналов, информативных для определения облачности, равно  $NSC$ .

Оценка  $dca_{nce}$  является обобщением предварительных оценок  $(dca'_1, \dots, dca'_{nsc}, \dots, dca'_{NSC})_{nce}$ , полученных из массива значений спектральной яркости  $(L_1, \dots, L_{nsc}, \dots, L_{NSC})_{nce}$  пороговой обработкой следующим образом:

$$dca'_{nsc} = \begin{cases} 1, & \text{при } LU_{nsc} \geq L_{nsc} \geq LD_{nsc}, \\ 0, & \text{при } (LU_{nsc} \leq L_{nsc}) \vee (L_{nsc} \leq LD_{nsc}). \end{cases} \quad (3)$$

Верхний порог  $LU_{nsc}$  и нижний порог  $LD_{nsc}$  для сезона съемки и географического расположения заданного района могут вычисляться с использованием имитационных моделей спектральных свойств облачности или эмпирически оцениваться по накопленным обширным и представительным банкам метеоданных на всю поверхность Земли.

Общая оценка  $dca_{nce}$  вычисляется по результату линейной комбинации предварительных оценок  $(dca'_1, \dots, dca'_{nsc}, \dots, dca'_{NSC})_{nce}$ .

$$lc_{nce} = \sum_{nsc=1}^{NSC} wc_{nsc} dca'_{nsc}; \sum_{nsc=1}^{NSC} wc_{nsc} = 1; \quad (4)$$

$$dca_{nce} = \begin{cases} 1, & \text{при } lc_{nce} \geq tc_{NSE}, \\ 0, & \text{при } lc_{nce} < tc_{NSE}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $wc_{nsc}$  – весовые коэффициенты,  $tc_{NSE}$  – пороговое значение для определения значения оценки наличия облачности в элементе разрешения БОЭСК  $dca_{nce}$  при некоторых условиях ведения ДЗЗ.

Значения  $wc_{nsc}$  и  $tc_{NSE}$  должны определяться при текущем планировании ведения ДЗЗ для прогнозируемых условий съемки, что является отдельной задачей. Коэффициенты  $wc_{nsc}$  позволяют учитывать различную потенциальную информативность спектральных каналов в задаче определения облаков на фоне подстилающей поверхности. В качестве примера приводятся сложные случаи отделения данных об облачности от данных о подстилающей поверхности: зимой контраст между облаками и заснеженной поверхностью имеет место в спектральном канале 1,6 мкм (Чапурский, 1976); летом – между облаками и поверхностью песчаных пустынь с хорошими отражающими свойствами – в канале 1,25 мкм (Griffin et al., 2005).

В практических исследованиях, как правило, используются спектральные данные, восстановленные к характеризующим объекты физическим величинам – коэффициентам спектральной яркости (КСЯ)  $\rho(\lambda)$  (Григорьев, 2014). Поэтому существующие результаты статистических исследований спектральных характеристик разных объектов хранятся и применяются в КСЯ  $\rho(\lambda)$ . На борту носителя БОЭСК регистрируемые данные существуют на низком уровне обработки в виде квантованных значений яркости  $L_{nsc}$ . Для обеспечения относительной простоты бортовой обработки требуется пересчет КСЯ  $\rho(\lambda)$  в квантованные значения яркости  $L_{nsc}$ , то есть выполнить обращение классической радиометрической коррекции через значения спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) на входе БОЭСК.

$$SR(\lambda, t) = \frac{\rho(\lambda) ES(t) \cos SZ(t)}{\pi SI(\lambda)}, \quad (6)$$

где  $ES(t)$  – дистанция Солнце – Земля в астрономических единицах на момент съемки  $t$ ;  $SZ(t)$  – зенитный угол Солнца на момент съемки  $t$ ;  $SI(\lambda)$  – спектральная интенсивность излучения Солнца.

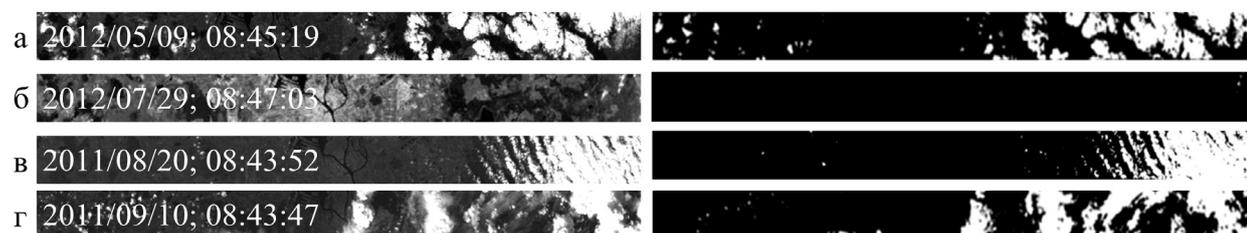
Квантованное значение яркости  $L_{nsc}$  вычисляется по формуле:

$$L_{nsc}(t) = \frac{(SR(\lambda, t) - SR_{\min}(\lambda))(L_{\max} - L_{\min})}{SR_{\max}(\lambda) - SR_{\min}(\lambda)} + L_{\min}, \quad (7)$$

где  $\lambda$  – в первом приближении центр спектрального канала с номером  $nsc$ ;  $SR_{\max}(\lambda)$ ,  $SR_{\min}(\lambda)$  – регистрируемые максимальный и минимальный уровни СПЭЯ;  $L_{\max}$ ,  $L_{\min}$  – параметры работы аналого-цифрового преобразователя (АЦП), выходные максимальное и минимальное значение квантованной яркости.

Выполненное обращение радиометрической коррекции позволяет выполнять оценивание интересующих параметров оценивания покрытия облачностью  $LU_{nsc}$ ,  $LD_{nsc}$  по результатам наземных исследований спектральных свойств облачности и основных типов подстилающей поверхности. Первые практические исследования разработанной модели оценки покрытия облачностью заданного района на реальных данных, зарегистрированных в разных условиях, подтверждают возможность использования представленного математического аппарата для анализа сложно прогнозируемой оптической помехи.

Эксперимент основывается на данных известного видеоспектрометра Hyperion на борту космического аппарата EO-1, работающего в спектральном диапазоне 0,4–2,5 мкм. В силу того, что гиперспектральные данные указанной системы свободно распространяются с уровнем обработки, включающим радиометрическую коррекцию, полное исследование разработанной модели оценки облачности не представляется возможным. В качестве набора данных информативных спектральных каналов использовались изображения, представленные значениями СПЭЯ и зарегистрированные в узких диапазонах с центрами 0,55; 0,65; 0,86; 1,25; 1,38; 1,6 мкм. На *рис. 1* приведены изображения исходных снимков с указанием даты и времени регистрации, а также примеры обработки данных о полях облачности над территорией г. Санкт-Петербург.



*Рис. 1. Примеры исходных снимков и масок облачности, построенных с использованием разработанной модели*

Для указанных на *рис. 1* примеров рассчитанные оценки облачности над районом съемки представлены следующими значениями: а –  $ECA = 0,34$ ; б –  $ECA = 0,01$ ; в –  $ECA = 0,23$ ; г –  $ECA = 0,41$ . Естественно, что инициализация параметров работы модели для конкретного географического региона в зависимости от сезона потребует детальных статистических испытаний. Перспективы развития модели бортовой оценки облачности связаны с учетом особенностей БОЭСК, связанных, в частности, с неравномерной чувствительностью элементов приемников излучения.

### Заключение

Основным результатом выполненного исследования является математическая модель оценки покрытия облачностью заданного района, которая является основой для разработки нового метода ведения ДЗЗ с бортовым оцениванием облачности. Сущность модели состоит в использовании данных от набора информативных для определения облачности спектральных каналов и их обработки на уровне квантованных значений яркости. Критерии обработки определяются на основе существующих исследований спектральных свойств облачности за счет пересчета коэффициентов спектральной яркости к квантованным значениям яркости при известных параметрах работы бортового специального комплекса и прогнозируемых условиях съемки из космоса. Приведены частные результаты эксперимента

по исследованию разработанной модели оценки облачности на основе реальных спектральных данных, зарегистрированных в диапазоне 0,4–2,5 мкм и в разных условиях.

## Литература

1. Будовый В.Д., Бухаров М.В. Способ определения времени проведения спутниковой съемки при дистанционном зондировании: пат. 2231811 Рос. Федерация // Б. И. 2004. № 18.
2. Григорьев А.Н. Методика формирования спектральных характеристик объектов на основе мультимедийных данных космической гиперспектральной съемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т.11. № 2. С. 175–184.
3. Митник Л.М., Митник М.Л., Заболотских Е.В. Спутник Японии GCOM-W1: моделирование, калибровка и первые результаты восстановления параметров океана и атмосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т.10. № 3. С. 135–141.
4. Лупян Е.А., Балашев И.В., Бурцев М.А., Ефремов В.Ю., Мазуров А.А., Мальцев Д.В., Матвеев А.А., Прошин А.А., Толпин В.А., Халикова О.А., Крашенинникова Ю.С. Возможности работы с долговременным архивом данных спутников LANDSAT по территории России и приграничных стран // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 3073–15.
5. Чапурский Л.И. О возможности распознавания облаков на фоне снега // Метеорология и гидрология. 1976. № 11. С. 323–9.
6. Чапурский Л.И., Андреева Н.И. Телеиндикация облачности в спектральных диапазонах 0,35-0,85 и 1,2-3 мкм // Метеорология и гидрология. 1978. № 8. С. 41–47.
7. Ackerman S., Frey R., Strabala K., Liu Y., Gumley L., Baum B., Menzel P. Discriminating clear-sky from cloud with MODIS algorithm theoretical basis document (MOD35) Vol. 6.1. MODIS Cloud Mask Team. 2010. 121 p.
8. Ballou K. and Miller J. On-board Cloud Contamination Detection with Atmospheric Correction // Papers of Earth Science Technology Conference. 2002. 3 p.
9. El-Araby E., Taher M., El-Ghazawi T., Moigne J. An Efficient Implementation of Automatic Cloud Cover Assessment (ACCA) on a Reconfigurable Computer // Proceedings of the 2005 Earth-Sun System Technology Conference. 2005. 5 p.
10. Griffin M.K., Hsu S.M., Burke H.K., Orloff S.M. and Upham C.A. Examples of EO-1 Hyperion Data Analysis // Lincoln laboratory journal. 2005. Vol. 15. No. 2. P. 271–298.

## Model of onboard cloudiness evaluation over the survey area during remote sensing from space

A.N. Grigoriev

*Military-Space Academy  
Saint-Petersburg 197082, Russia  
E-mail: Grig-AN@ya.ru*

The article discusses the results of a research on the development of mathematical apparatus of cloud field estimation over a given area of satellite imagery. The subject of research is mathematical objects that simulate informative data on cloud field at different stages of processing. The purpose of work is to improve the efficiency of remote sensing through a rational use of resources. Analysis of modern methods for cloud determination showed the possibility to use spectral data recorded in the range of 0.4-2.5 microns. The author has developed a new model for evaluating clouds over a given area to be calculated in a special onboard optical-electronic complex with units of cloud field data recording and processing. Cloudiness is evaluated based on the estimate array of cloud presence in resolution elements of the onboard special complex. The estimate array is formed according to the data from informative spectral channels. Processing of the spectral data is performed on the thresholds and weightings determined during planning for specific survey conditions. Real data of space hyperspectral survey were used for semi-experimental calculation of cloud evaluation. The author formulates the prospects for further development of the model of onboard cloud evaluation.

**Keywords:** survey condition, clouds mask, on-board processing, quantized brightness, radiometric correction, planning of survey

## References

1. Budovyi V.D., Bukharov M.V., Sposob opredeleniya vremeni provedeniya sputnikovoi s'emki pri distantsionnom zondirovani (The method of determining the time of satellite imagery for remote sensing), Russian Federation Patent 2231811, Bull. of Inventions, 2004, No. 18.
2. Grigor'ev A.N., Metodika formirovaniya spektral'nykh kharakteristik ob'ektov na osnove mul'tivremennykh dannykh kosmicheskoi giperspektral'noi s'emki (The method of formation of objects spectral characteristics on the basis of multitemporal data of space hyperspectral remote sensing), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol.11, No. 2, pp. 175–184.
3. Mitnik L.M., Mitnik M.L., Zabolotskikh E.V., Sputnik Yaponii GCOM-W1: modelirovanie, kalibrovka i pervye rezul'taty vosstanovleniya parametrov okeana i atmosfery (Japanese satellite GCOM-W1: modeling, calibration and the first results of recovering the parameters of the ocean and atmosphere), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol.10, No. 3, pp. 135–141.
4. Loupian E.A., Balashev I.V., Burtsev M.A., Efremov V.Yu., Mazurov A.A., Mal'tsev D.V., Matveev A.A., Proshin A.A., Tolpin V.A., Khalikova O.A., Krashennnikova Yu.S., Vozmozhnosti raboty s dolgoremennym arkhivom dannykh sputnikov LANDSAT po territorii Rossii i prigranichnykh stran (Opportunities to work with long-term archive data LANDSAT satellites in the territory of Russia and neighboring countries), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 3, pp. 3073–15.
5. Chapurskii L.I., O vozmozhnosti raspoznavaniya oblakov na fone snega (On the possibility of recognition of clouds on a background of snow), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1976, No. 11, pp. 32–39.
6. Chapurskii L.I., Andreeva N.I., Teleindikatsiya oblachnosti v spektral'nykh diapazonakh 0,35–0,85 i 1,2–3 mkm (Determination of cloud in the spectral range 0,35–0,85 and 1,2–3 microns), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1978, No. 8, pp. 41–47.
7. Ackerman S., Frey R., Strabala K., Liu Y., Gumley L., Baum B., Menzel P., Discriminating clear-sky from cloud with MODIS algorithm theoretical basis document (MOD35) v. 6.1, MODIS Cloud Mask Team, *Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies, University of Wisconsin - Madison*, 2010, 121 p.
8. Ballou K. and Miller J., On-board Cloud Contamination Detection with Atmospheric Correction, *Papers of Earth Science Technology Conference*, 2002, 3 p.
9. El-Araby E., Taher M., El-Ghazawi T., Moigne J., An Efficient Implementation of Automatic Cloud Cover Assessment (ACCA) on a Reconfigurable Computer, *Proceedings of the 2005 Earth-Sun System Technology Conference*, 2005, 5 p.
10. Griffin M.K., Hsu S.M., Burke H.K., Orloff S.M., Upham C.A., Examples of EO-1 Hyperion Data Analysis, *Lincoln laboratory journal*, 2005, Vol. 15, No. 2, pp. 271–298.