

УДК 551.501.776, 551.508.761

## АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ОБЩЕГО БАЛЛА ОБЛАЧНОСТИ НАД МОРЕМ ПО ШИРОКОУГОЛЬНЫМ СНИМКАМ НЕБА

© 2016 г. М. А. Криницкий, А. В. Сеницын

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

e-mail: krinitsky@sail.msk.ru

Поступила в редакцию 05.06.2015 г.

После доработки 15.07.2015 г.

Сформулирован и реализован новый алгоритм оценки полного балла облачности, основанный на предложенном синтетическом индексе степени серости точки изображения и применении дополнительного шага адаптивной фильтрации вклада рассеяния Ми. Для автоматизации наблюдений авторами сконструирована, собрана и апробирована в натуральных условиях установка оценки общего балла облачности. Результаты работы показывают существенное преимущество разработанного алгоритма на фоне широко используемых в настоящий момент схем.

DOI: 10.7868/S0030157416020131

### ВВЕДЕНИЕ

Ключевым параметром параметризаций коротковолновой радиации является общий балл облачности (ОБО) [3]. Традиционно в практике морских и наземных наблюдений ОБО оценивается наблюдателем визуально согласно методике [1], что приводит к значительным неточностям за счет субъективности наблюдателей. Это не дает возможности использовать в полной мере эти наблюдения как для расчетов коротковолновой радиации, так и для валидации облачных характеристик в реанализах [5]. В целях автоматизации и повышения точности наблюдений необходимо использовать современные методы оценки, основанные, например, на данных широкоугольных оптических снимков видимой полусферы неба. Традиционно серийные установки оценки ОБО бывают 2-х типов: установки со сферическим зеркалом, оснащенные цифровой камерой стандартного угла обзора, и установки, оснащенные объективами типа “рыбий глаз” с углами обзора от 150° до 180° в вертикальной плоскости и 360° по горизонтали. Особенности цифровой съемки и применяемых алгоритмов обязывают использовать в этих установках затеняющее солнечный диск устройство (трекер Солнца). Принципиально различные методы оценки ОБО устроены практически одинаково и отличаются лишь способом вычисления контрольного индекса. Для алгоритмов, описанных в [7] и [8], используется индекс, вычисляемый по формуле:  $R_i = \frac{R}{B}$  ( $R$ ,  $B$  – красная и синяя компоненты цвета точки в цветовой модели RGB). При этом классификация

полезных точек изображения происходит разделением с использованием эмпирически подобранного граничного значения этого индекса:  $R_{i_{\text{thresh}}} = 0.8$ . Вариант алгоритма, изложенный в [10], использует индекс, названный “*SkyIndex*” и вычисляемый по формуле  $SI = \frac{B - R}{B + R}$ . При этом граничное значение для классификации полезных точек изображения на “ОТКРЫТОЕ НЕБО” и “ОБЛАКО” также подобрано эмпирически:  $SI_{\text{thresh}} = 0.23$ . ОБО далее определяется по формуле:

$$\text{CloudCover} = 10 \text{int} \left[ \frac{N_{\text{cloud}}}{N_{\text{total}}} \right], \quad (1)$$

где  $N_{\text{cloud}}$  – количество точек, классифицированных как “ОБЛАКО”,  $N_{\text{total}}$  – общее количество полезных точек изображения.

В опубликованных работах встречаются и более сложные схемы, подобные “*SkyIndex*”, однако их применение позволяет лишь незначительно повысить точность оценки ОБО, решая одну из проблем, присущих такому методу проведения наблюдений:

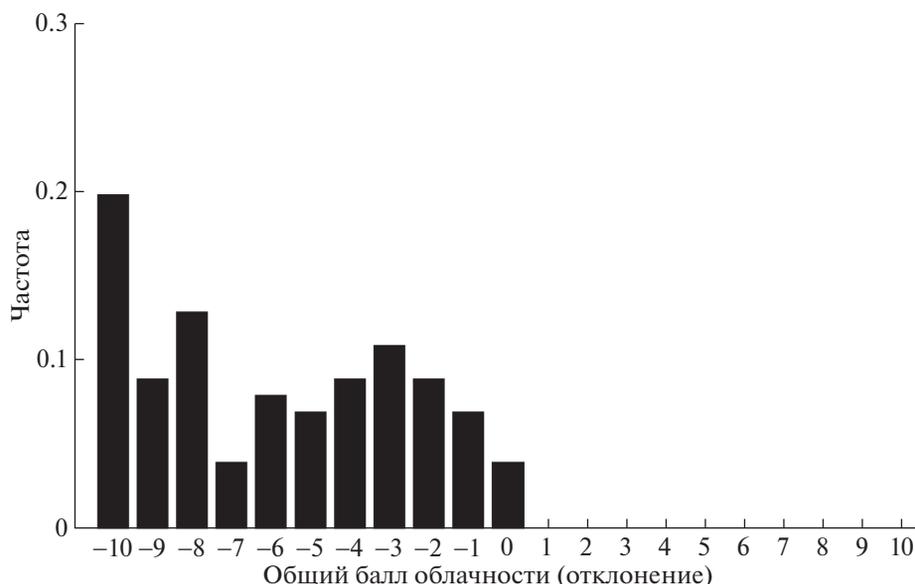
необходимость использования элементов, затеняющих Солнце;

учет солнечного диска и области вокруг него в качестве покрытой облаками;

низкая чувствительность к тонкой облачности;

влияние капель на стекле объектива на получаемое изображение видимой полусферы неба.

Исследования показывают, что, хотя в некоторых специальных случаях можно говорить о приемлемой точности результатов этих алгоритмов, в



**Рис. 1.** Распределение частот отклонения оценки общего балла облачности по алгоритму “*SkyIndex*” от показаний наблюдателя. По материалам рейса АИ-45, НИС “Академик Иоффе”, 60° с.ш., Атлантический океан, период наблюдений с 17.09.2014 г. по 25.09.2014 г.

целом такие схемы дают статистически смещенное распределение по сравнению с показаниями наблюдателя (см. рис. 1).

Следует отметить, что оценку ОБО для каждого снимка можно вручную корректировать подстройкой граничного значения  $R_{i\text{thresh}}$  и  $SI_{\text{thresh}}$ , добиваясь статистически несмещенного результата в сравнении с показаниями наблюдателя. Однако при этом ширина распределения остается весьма существенной, и, кроме того, теряется сам смысл автоматизации наблюдений.

#### УСТАНОВКА ДЛЯ ОЦЕНКИ ОБЩЕГО БАЛЛА ОБЛАЧНОСТИ

Для полной автоматизации оценки ОБО был создан новый тип прибора. Базовый принцип регистрации широкоугольных снимков видимой полусферы неба в ней остается без изменений: основным регистрирующим элементом является цифровая оптическая камера с широкоугольным объективом типа “рыбий глаз” с углами обзора 180° в вертикальных плоскостях и 360° в горизонтальной. Качка судна является существенным фактором, вносящим погрешности во все типы радиационных измерений [2]. Принципиальное отличие заключается в использовании системы позиционирования внешнего блока, которая позволяет в условиях качки производить съемку в момент прохождения установкой горизонтального положения. Кроме того, внешний блок оснащен приемником GPS, показания которого позволяют вычислять высоту Солнца в момент съемки. Дальнейшее определение местоположения

солнечного диска на снимке производится специальным блоком алгоритма обработки снимка. Это позволило сконструировать внешний блок без использования трекера солнца, без механических систем стабилизации и ориентирования установки.

#### АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ОБЩЕГО БАЛЛА ОБЛАЧНОСТИ

Для того чтобы исключить недостатки, присутствующие традиционным алгоритмам, авторами был разработан новый метод оценки ОБО, основанный на новом синтетическом индексе, который мы будем называть “индексом степени серости” (*GrIx*). По смыслу этот индекс обратен насыщенности цветового тона в терминах, применяемых в цветовой модели HSV [6].

$$GrIx = 1 - \frac{StdDev(R,G,B)}{Y}, \quad (2)$$

где  $R, G, B$  – компоненты цвета точки в модели RGB,  $Y$  – яркость цвета. Выражение  $StdDev(R,G,B)$  интерпретируется как степень разброса значений  $(R, G, B)$ , что аналогично насыщенности цветового тона точки. Нормирование на интенсивность применяется для устранения зависимости индекса от яркости. В результате значения *GrIx*, наблюдаемые на снимках, лежат в пределах интервала [0, 1]. Сравнительное исследование индексов  $R_i$ ,  $SI$  и *GrIx* показало, что последний проявляет наибольшую чувствительность к градиентам насыщенности цветового тона. Таким образом, использование такого индекса позволи-

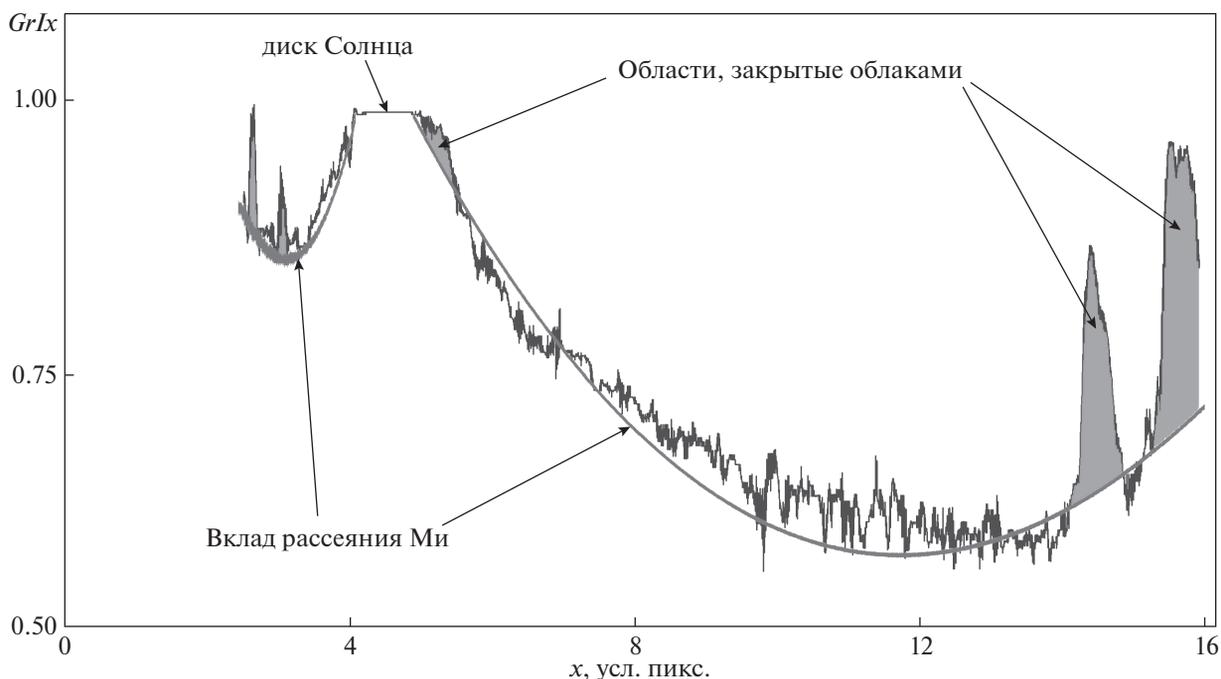


Рис. 2. Вклад рассеяния Ми как фон полезного сигнала. Приведены значения индекса  $GrIx$  вдоль сечения, проходящего через солнечный диск.

ло значительно повысить надежность выделения тонкой облачности без подстройки граничного значения  $GrIx_{\text{thresh}}$ .

Отдельной ветвью алгоритма “ $GrIx$ ” является блок оценки и, при необходимости, фильтрации эффектов рассеяния солнечного света в атмосфере в той части, которая описывается рассеянием Ми (рис. 2). Модель, по которой оценивается вклад эффекта рассеяния Ми в насыщенность цветового тона точек изображения, построена как эмпирическая и адаптивная. Параметры модели оцениваются для каждого снимка. При этом используются как статистические характеристики самого снимка:

показатели распределения значений  $GrIx$  точек полезной области снимка: медиана ( $m$ ) и перцентиль 5 ( $p5$ ),

так и статистические характеристики применяемой оптической камеры, включающие, в частности:

двумерное распределение плотности количества снимков на пространстве ( $m, p5$ ) (рис. 3);

результат кластеризации снимков по алгоритму K-means [4] на пространстве признаков ( $m, p5$ ) с евклидовой метрикой расстояния (рис. 3).

Кластеризация снимков на пространстве ( $m, p5$ ) позволила разделить их на следующие классы (рис. 3):

класс 1: снимки, на которых не представлен солнечный диск, просветы в облаках отсутствуют или редки. Для этого класса не имеет смысла оце-

нивать и фильтровать вклад рассеяния Ми для выделения тонкой облачности;

класс 2: снимки, на которых с большой вероятностью представлен солнечный диск, доля чистого неба достаточно высока для того, чтобы оценивать и фильтровать вклад рассеяния Ми для выделения тонкой облачности;

класс 3: снимки, для которых по статистическим характеристикам сложно определить, представлен ли солнечный диск. Для этого класса реализована отдельная ветвь алгоритма “ $GrIx$ ”, оценивающая вероятность наличия солнечного диска на снимке и необходимость фильтрации вклада рассеяния Ми;

класс 4: чаще всего брак съемки. Обычно это снимки с посторонними объектами в кадре или снимки за пределами светового дня.

Например, событие (снимок), отмеченное треугольным маркером на рис. 3. будет отнесено к классу 2, что повлечет оценку и фильтрацию вклада рассеяния Ми и компенсацию искажений, внесенных им в полезный для оценки ОБО сигнал. После этого будет применена классификация точек изображения с использованием фиксированного граничного значения  $GrIx_{\text{thresh}}$ .

В рамках наблюдательной программы MORE [9] были проведены наблюдения в 45-м рейсе на НИС “Академик Иоффе”, Атлантический океан, по 60° с.ш., с 17 по 25 сентября 2014 г. В части наблюдений за облаками традиционная методика соответствовала изложенной в [1]. Одновременно

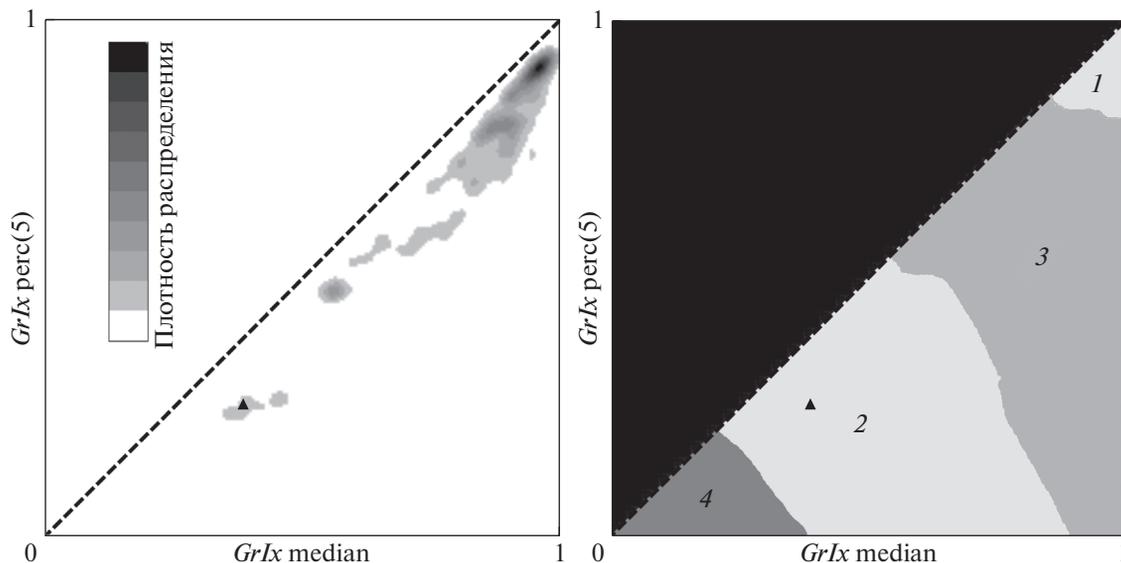


Рис. 3. Диаграмма плотности распределения количества снимков на пространстве  $(m, p5)$  (слева) и кластеризация пространства  $(m, p5)$ . Для камеры, использованной в 45-м рейсе (справа). Числовыми маркерами 1–4 обозначены классы кластеризации 1–4 соответственно.

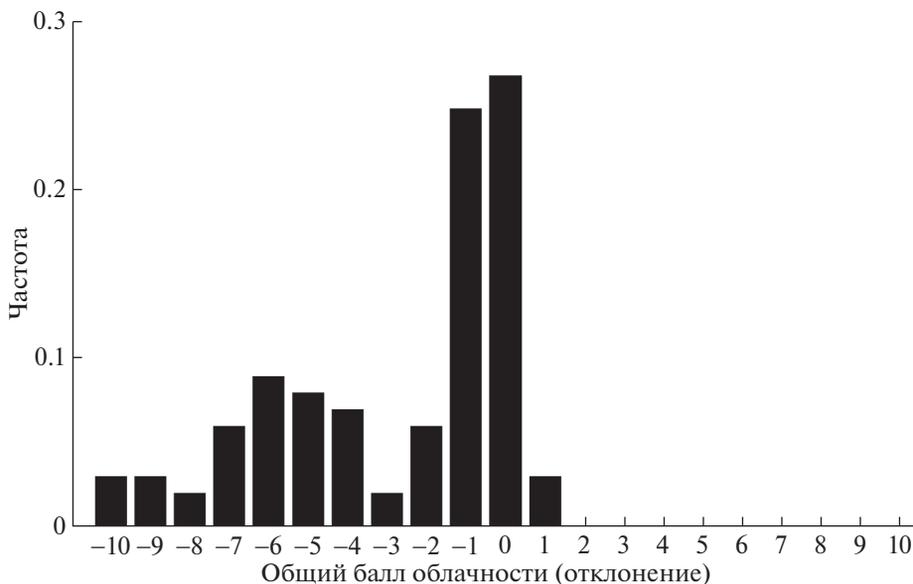
проводилась цифровая регистрация облачности и дополнительных показаний вышеописанной установки оценки ОБО. Согласно приведенной выше методологии, по полученному массиву цифровых снимков были рассчитаны статистические характеристики каждого изображения в частности и оптической камеры в целом. Пространство  $(m, p5)$  было кластеризовано с использованием алгоритма K-means [4]. Результаты классификации снимков на основании этой кластеризации использовались при оценке ОБО по методу “GrIx”.

Для оценки достоверности результатов был проведен анализ отклонений расчетных значений, полученных по алгоритму “GrIx”, от показаний наблюдателя (рис. 4). Частотное распределение отклонений показывает, что применение предложенного метода оценки ОБО дает статистически более достоверный результат по сравнению с традиционными схемами (рис. 1). Повышение точности достигается за счет использования синтетического контрольного индекса GrIx и предлагаемого авторами метода фильтрации вклада рассеяния Ми в поле полезного сигнала. Исследования показали, что продемонстрированные преимущества алгоритма “GrIx” проявляются вне зависимости от яркости снимков, что позволяет использовать этот метод в широком спектре погодных условий и условий освещенности по сравнению с традиционными схемами.

Детальный анализ показал, что случаи занижения ОБО по методу “GrIx” с отклонением от показаний наблюдателя от  $-10$  до  $-4$  баллов обусловлены факторами, связанными с организа-

ей наблюдений, в частности, с проведением наблюдений и съемки при склонении Солнца менее  $5^\circ$ , что в любом случае приводит к очень серьезным погрешностям. Обычно параметризации коротковолновой радиации не разрабатываются для этих высот Солнца. Кроме того, фактором, влияющим на точность является использование снимков, относящихся к классу 4 кластеризации пространства  $(m, p5)$  (такие снимки не пригодны в качестве исходных данных). Разработанный алгоритм позволяет проводить в автоматическом режиме долговременные наблюдения за баллом общей облачности. Получаемые данные могут использоваться как для валидации визуальных наблюдений, так и непосредственно для расчета потоков коротковолновой радиации. Кроме того, разработанная аппаратура при дальнейшем развитии позволит получать многие неизмеряемые традиционно, но крайне важные характеристики облачности, в частности, оптическую плотность облаков и высоту нижней границы облачности. В частности, проведенные дополнительные исследования полученных в 45-м рейсе НИС “Академик Иоффе” данных позволяют говорить о потенциальной возможности оценки высоты нижней границы наблюдаемой облачности в случае использования синхронных снимков двух оптических камер описанной установки и принципа оптического стереоэффекта. Такие данные позволят по высоте нижней границы определять тип наблюдаемой облачности.

Автор благодарит сотрудника Лаборатории взаимодействия океана и атмосферы и мониторинга климата Алексея Сеницына за предостав-



**Рис. 4.** Распределение частот отклонения оценки общего балла облачности по алгоритму “GrIx” от показаний наблюдателя. По материалам 45-го рейса.

ление исходных данных исследований, описанных в [2, 3, 9].

Анализ результатов, полученных в 45-м рейсе НИС “Академик Иоффе” с 17 по 25 сентября 2014 г. выполнен за счет грантов РНФ (проект № 14-50-00095), разработка алгоритма оценки ОБО (проект № 14-17-00697).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч. 1. Гл. 16. Наблюдение за облаками. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 299 с.
2. Синуцын А.В., Александрова М.П. Оценка погрешностей прямых измерений приходящих радиационных потоков, связанных с колебаниями корабля // Океанология. 2009. Т. 49. № 4. С. 494–500.
3. Синуцын А.В., Александрова М.П., Гулев С.К. Уточнение параметризации коротковолновой радиации на поверхности океана на основе прямых измерений в Атлантическом океане // Метеорология и гидрология. 2007. № 4. С. 45–54.
4. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. Гл. 3. п. 3.3.5 Алгоритм К внутригрупповых средних. М.: Мир, 1978. С. 109–112.
5. Bedacht E., Gulev S.K., Macke A. Intercomparison of global cloud cover fields over oceans from the VOS observations and NCEP/NCAR reanalysis // International Journal of Climatology. 2007. V. 27. № 13. P. 1707–1719, DOI: 10.1002/joc.1490
6. George H.J., Greenberg D. Color spaces for computer graphics // Proceedings of the 5th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH'78). ACM, New York, NY, USA, 1978. P. 20–25. DOI: 10.1145/800248.807362
7. Kalisch J., Macke A. Estimation of the total cloud cover with high temporal resolution and parameterization of short-term fluctuations of sea surface insolation // Meteorologische Zeitschrift. 2008. V. 17. № 5. P. 603–611.
8. Long C.N., Deluisi J.J. Development of an automated hemispheric sky imager for cloud fraction retrievals // Proc. 10th Symp. on Meteorological Observations and Instrumentation, January 11 to 16. 1998, Phoenix, AZ, USA. P. 171–174.
9. Sinitsyn A.V., Gulev S.K., Macke A. et al. 2006: MORE cruises launched // Flux news. 2006. № 1. P. 11–13.
10. Yamashita M., Yoshimura M., Nakashizuka T. Cloud cover estimation using multi-temporal hemisphere imageries // International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2004. V. 35. Pt. B7. P. 826–829.

## Adaptive Algorithm of Cloud Cover Estimation Using All-Sky Images Over Sea

M. A. Krinitskiy, A. V. Sinitsyn

This article represents our research result on the topic of cloud cover estimation algorithms and optical packages. The cloud cover estimation optical package has been designed, assembled and tested. New cloud cover estimation algorithm has been formulated based on synthetic control index called “grayness rate index”, and the additional algorithm step of Mie scattering contribution filtering. The package and algorithm results demonstrates significant advantage over routine ones.