

Е.В. Плотников

## Методика выделения облачности для данных сканера AVHRR, относящихся к Черному морю

Описывается один из регионально адаптированных для Черноморского региона вариантов методики распознавания облачности на изображениях AVHRR. За основу взяты пороговые алгоритмы, использующие особенности формирования восходящего излучения в различных спектральных интервалах. В ходе изучения данных, относящихся к Черному морю, проанализированы и модифицированы известные алгоритмы выделения облачных ситуаций в ночное и дневное время. При рассмотрении результатов обработки массивов спутниковых данных, полученных в 2005 и 2006 гг., оценена эффективность и выявлены недостатки разработанного метода.

Температура поверхности моря (ТПМ) является одним из главных параметров, характеризующих состояние морской системы. Основным источником получения информации о ТПМ с использованием спутниковых измерений служат данные ИК-сканеров AVHRR, MODIS, ATSR. Важный фактор при этом – исключение облачных участков изображений.

Наличие облачности приводит к искажению ИК-сигнала таким образом, что все методы расчетов по полученным данным восстанавливают температуру верхней границы облаков, которая может существенно отличаться от ТПМ. Следовательно, для адекватного определения температуры морской поверхности по результатам расчета яркостной температуры фрагменты ИК-изображений, занятые облачностью, должны быть исключены из рассмотрения. Фильтрация облачности является достаточно сложной задачей, относящейся к распространенному при обработке спутниковой информации классу задач по идентификации и классификации природных объектов.

В работе описан алгоритм выделения облачности на ИК-изображениях AVHRR, в его основу легли известные методики [1 – 4], адаптированные с учетом особенностей Черноморского региона. Анализ проводился на основе изучения данных AVHRR, полученных в 2005 – 2006 гг.

Сканер AVHRR установлен на спутниках серии NOAA. Прибор широко используется для изучения окружающей среды. Мультиспектральность радиометра является ключевым фактором, обеспечивающим принципиальную возможность разработки высокоточных методов восстановления ТПМ, в частности методов фильтрации облачности.

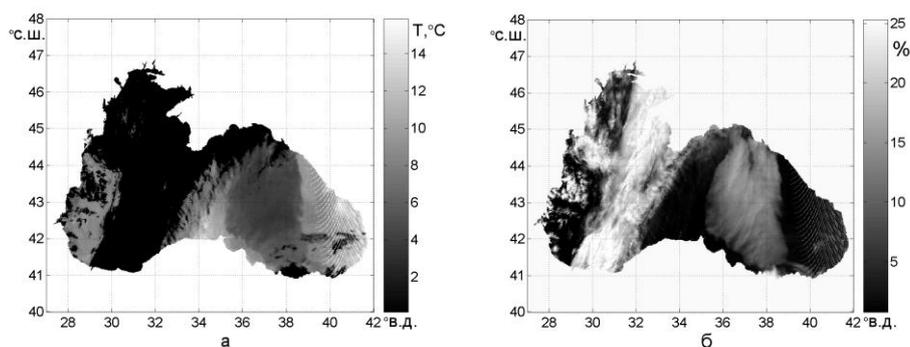
**Используемые данные и методология обработки.** Для отработки методологии фильтрации облачности использованы данные, полученные в приемном центре МГИ НАН Украины в 2005 и 2006 гг. Они представляют собой однобайтовые растры изображений, записанные в формате HRPT.

При выполнении процедуры первичной обработки рассчитываются цифровые карты альbedo в каналах 0,63; 0,83 и 1,6 мкм и радиационной температуры в каналах 3,7; 10,8 и 11,9 мкм. Кроме того, по рекомендованным NOAA алгоритмам рассчитываются карты ТПМ без фильтрации облачности. Эти данные относятся к району с координатами 27 – 42° в.д. и 40 – 48° с.ш. и являются входной информацией для рассматриваемого алгоритма. Альbedo в оптических каналах рассчитывается в интервале 0 – 25%. Радиационная температура в каждом из ИК-каналов в зависимости от сезона и метеорологических условий определяется в интервалах 260 – 285, 270 – 295 или 280 – 305 К. Все фрагменты, соответствующие величинам в которых не входят в эти интервалы, отфильтровываются. Следует отметить, что при этом удаляется часть облачных фрагментов.

Пороговые алгоритмы основаны на последовательном применении фильтров, в каждом из которых используются различные принципы распознавания облаков. Сущность работы фильтров состоит в расчете некоторой числовой характеристики для каждого пикселя изображения и ее оценке в соответствии с определенными пороговыми значениями. В результате строится маска облачных фрагментов.

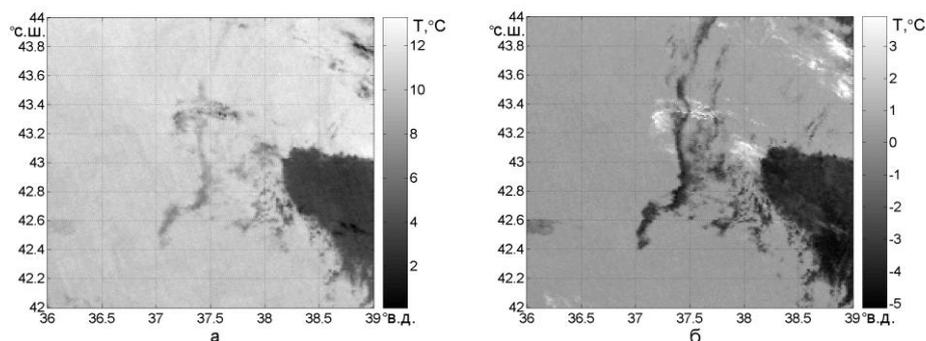
Региональная адаптация фильтров заключалась в расчете оптимальных пороговых значений и, при необходимости, в изменении некоторых особенностей реализации. Пороговые значения определялись при помощи сопоставления изучаемых характеристик с априорной информацией о наличии или отсутствии облачности в соответствующих фрагментах изображения, полученной путем эмпирической оценки уровней сигнала и текстур изображений во всех доступных каналах. Вообще говоря, пороговые значения могут существенно различаться применительно к данным, относящимся даже к небольшому временному интервалу.

**Общие принципы построения фильтров.** Различные типы подстилающей поверхности имеют разные отражательные и излучательные характеристики. Например, морская поверхность отражает солнечную радиацию гораздо слабее, чем облака или большая часть объектов на суше. Кроме того, в силу существенного различия ТПМ и температуры плотных облаков интенсивность их излучения в ИК-диапазоне будет разной. Это позволяет распознавать облачность в тех участках изображения, где значения альbedo или радиационной температуры соответственно в оптических и ИК-каналах существенно отличаются от типичных значений для участков, свободных от облачности. На рис. 1 показаны карты термодинамической температуры и альbedo подстилающей поверхности, рассчитанные по данным дневных измерений. Здесь выделяются две области, закрытые плотными низкими облаками и туманом. Для плотных низких облаков значения температуры не превышают 5°C, значения альbedo лежат в интервале 17 – 25%. Для тумана значения температуры находятся в интервале 4 – 8°C, альbedo – 8 – 15%.



**Р и с. 1.** Карты термодинамической температуры – *а* и альbedo – *б* по данным 01.04.2006 г., 11 ч 38 мин

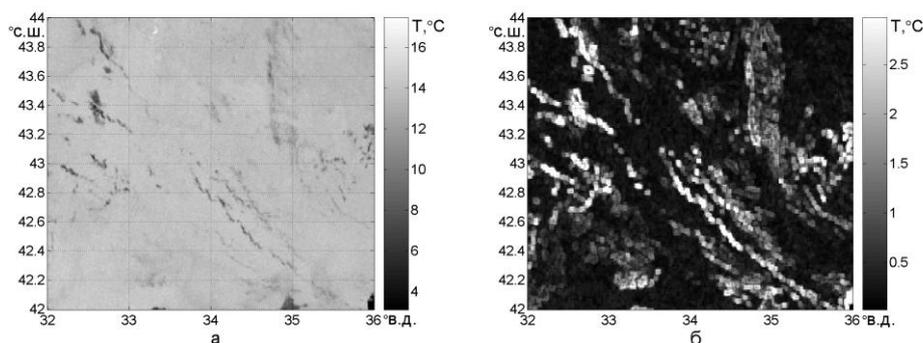
Для чистой атмосферы и облачности существуют отличия в отражательных, пропускательных и излучательных характеристиках в зависимости от участка спектра. Это дает возможность распознавания облаков при одновременном рассмотрении измерений, относящихся к различным участкам спектра. Сущность тестов, основанных на этом принципе, заключается в сопоставлении различий карт альbedo и карт радиационных температур на разных длинах волн. На рис. 2 показаны термодинамическая температура и разность радиационных температур в каналах 3,7 и 11,9 мкм. Ясно просматривается совпадение фрагментов первой карты, в которых температура меньше  $7^{\circ}\text{C}$ , с фрагментами второй, где разность радиационных температур меньше  $0^{\circ}\text{C}$  или больше  $4^{\circ}\text{C}$ .



**Р и с. 2.** Карты термодинамической температуры – *а* и разности радиационных температур в каналах 3,7 и 11,9 мкм – *б* (36 – 39° в.д., 42 – 44° с.ш., 18. 04. 2006 г., 19 ч 03 мин)

Для морской поверхности, в отличие от различных типов облачности, характерны слабые пространственные различия в излучательных характеристиках. Тесты, основанные на оценке дисперсии значений цифровых карт в некоторых пространственных окнах, эффективны для фильтрации мелкой облачности. Для иллюстрации рассмотрим рис. 3. Здесь изображена карта термодинамической температуры и карта, численное значение в каждом пикселе которой равно амплитуде значений разности радиационных температур

для пространственного окна  $3 \times 3$  пикселя с центром в рассматриваемом пикселе. Области высокой пространственной неоднородности ТПМ, обусловленной мелкими облачными структурами, выделяются очень четко.



**Р и с. 3.** Карты термодинамической температуры – *а* и амплитуды разности радиационных температур в каналах 3,7 и 11,9 мкм для пространственного окна  $3 \times 3$  пикселя – *б* (32 – 36° в.д., 42 – 44° с.ш., 17.09.2005 г., 23 ч 45 мин)

Исходя из этих принципов, используемые фильтры можно разделить на три группы:

- оценивающие уровень сигнала в отдельных спектральных окнах;
- сопоставляющие уровни сигналов в различных спектральных окнах;
- оценивающие пространственную неоднородность уровней сигналов.

**Алгоритм фильтрации для изображений, полученных в дневное время.** Оценка альбедо в канале 0,83 мкм. Восходящее излучение в этом спектральном окне в основном формируется за счет отражения солнечной радиации от морской поверхности и рассеяния в атмосфере. Для дневных данных фильтрация начинается с оценки сверху альбедо в канале 0,83 мкм. Пороговое значение для оценки равно 3%.

Оценка радиационной температуры в канале 10,8 мкм. Температура верхней границы облаков для типичных атмосферных условий значительно ниже ТПМ. Это позволяет осуществлять фильтрацию низкой плотной облачности, используя оценку радиационной температуры. Для этой цели выбирается канал 10,8 мкм, пропускание атмосферы в котором максимально, поэтому рассчитываемая радиационная температура для безоблачных участков наиболее близка к температуре воды. Пороговое значение выбрано исходя из предположения, что температура замерзания морской воды равна 271 К.

Оценка пространственной неоднородности альбедо в канале 0,83 мкм. В условиях отсутствия облачности изменчивость альбедо морской поверхности в малых пространственных масштабах весьма незначительна. Принцип работы данного фильтра заключается в вычислении амплитуды альбедо по пространственным окнам размером  $3 \times 3$  пикселя, в центре которых находится рассматриваемый пиксель. Полученная величина используется для сравнения с пороговым значением. Опыт показывает, что для безоблачных участков эта характеристика за редким исключением в очень специфических случаях не превышает 0,3%.

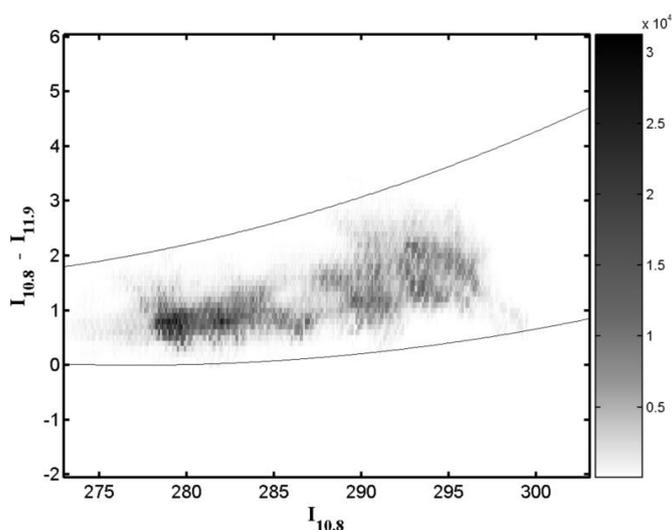
Оценка разности радиационных температур в каналах 10,8 и 11,9 мкм. Производится сверху и снизу. Для обработки этого фильтра были отобраны данные 120 ночных измерений. Отбор проводился с учетом равномерности распределения данных по сезонам. Облачность на этих изображениях была отфильтрована в интерактивном режиме. При анализе скаттерограммы зависимости разности температур в каналах 10,8 и 11,9 мкм от температуры в канале 10,8 мкм были построены пороговые кривые (рис. 4). При оценке сверху облачными пикселями будут те, для которых

$$I_{10,8} - I_{11,9} > aI_{10,8}^2 + bI_{10,8} + c,$$

где  $a = 0,0017$ ;  $b = -0,8633$ ;  $c = 113,275$ ;  $I$  с индексом – радиационная температура в соответствующем канале. При оценке снизу фильтруются пиксели, для которых

$$I_{10,8} - I_{11,9} < aI_{10,8}^2 + bI_{10,8} + c,$$

где  $a = 0,00126262$ ;  $b = -0,699747$ ;  $c = 96,95$ .



**Р и с. 4.** Скаттерограмма зависимости разности радиационных температур в каналах 10,8 и 11,9 мкм от радиационной температуры в канале 10,8 мкм

Оценка пространственной неоднородности поля радиационной температуры в канале 10,8 мкм. Пространственная однородность ТПМ значительно выше, чем у облаков. Это позволяет фильтровать пропущенную мелкую облачность. Точно так же, как при фильтрации по однородности альбедо, вычисляется разность между максимальным и минимальным значениями радиационной температуры в канале 10,8 мкм для пространственного окна  $3 \times 3$  пикселя с центром в рассматриваемом пикселе. Оптимальным для оценки сверху полученной величины оказалось пороговое значение 0,7 К. Проблема применения этого фильтра заключается в избыточности фильтрации. Фильтруются как облачные участки изображения, так и участки, соответствующие областям неоднородности ТПМ, например границы апвеллингов. *Распозна-*  
*ISSN 0233-7584. Мор. гидрофиз. журн., 2009, № 3*

вание подобных зон представляет собой довольно непростую задачу и является одним из направлений дальнейшего совершенствования метода.

**Алгоритм фильтрации для изображений, полученных в ночное время.** Оценка радиационной температуры в канале 10,8 мкм. В ночных условиях начальная грубая фильтрация плотной облачности производится при помощи фильтра, задающего минимальное допустимое значение радиационной температуры в этом канале. Применение такого фильтра для дневных и ночных данных ничем не отличается. Пороговое значение равно 271 К.

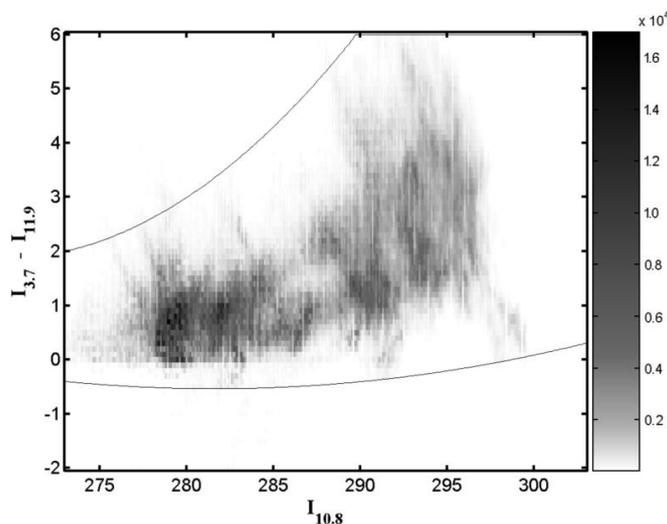
Оценка разности радиационных температур в каналах 3,7 и 11,9 мкм. В отдельных случаях на изображениях, полученных по измерениям в ночное время, при помощи оценки значений разности радиационных температур в указанных каналах можно отфильтровать более 95% облачности. При работе данного фильтра оценка производится сверху и снизу. Обработка пороговых значений осуществлялась так же, как и при выборе порогов для оценки разности радиационных температур в каналах 10,8 и 11,9 мкм. Использовался тот же массив данных из 120 равномерно распределенных по сезонам изображений. При анализе скаттерограммы зависимости разности температур в каналах 3,7 и 11,9 мкм от температуры в канале 10,8 мкм были построены пороговые кривые (рис. 5). При оценке сверху облачными пикселями будут те, для которых

$$I_{3,7} - I_{11,9} > aI_{10,8}^2 + bI_{10,8} + c,$$

где  $a = 0,009886$   $b = -5,324886$   $c = 718,873181$ . При оценке снизу фильтруются фрагменты, для которых

$$I_{3,7} - I_{11,9} < aI_{10,8}^2 + bI_{10,8} + c,$$

где  $a = 0,001835$   $b = -1,033828$   $c = 145,025$ .

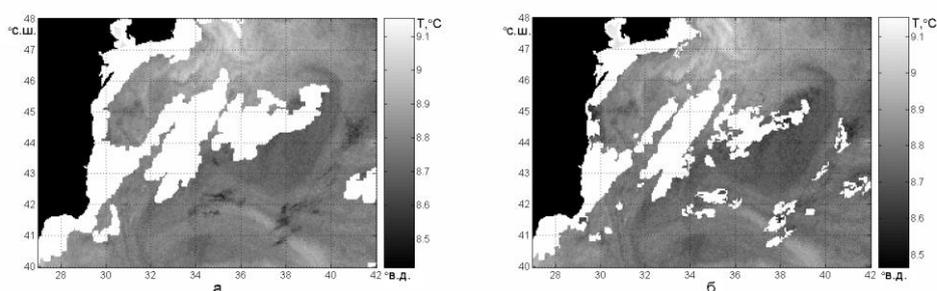


**Р и с. 5.** Скаттерограмма зависимости разности радиационных температур в каналах 3,7 и 11,9 мкм от радиационной температуры в канале 10,8 мкм

Оценка однородности поля разности радиационных температур в каналах 3,7 и 11,9 мкм. Этот фильтр эффективен для выделения мелкой облачности на изображениях, полученных по данным, соответствующим ночным измерениям. Как и при работе аналогичных описанных ранее фильтров, вычисляется амплитуда характеристики для пространственного окна размером  $3 \times 3$  пикселя. Если это значение превышает 0,7 К, центральный пиксель считается облачным.

Оценка разности радиационных температур в каналах 10,8 и 11,9 мкм.  
Оценка гладкости поля радиационной температуры в канале 10,8 мкм. Применяются так же, как и при обработке дневных данных.

**Эффективность методики.** На рис. 6 показаны две карты термодинамической температуры. Облачность на первой из них была отфильтрована при помощи методики, принятой в настоящее время МГИ НАН Украины в системе оперативной обработки спутниковых изображений, на второй – при помощи описанного метода. Черным цветом изображены участки суши, белым – участки, закрытые облаками. Значительное уменьшение объема фрагментов мелкой облачности и больший общий объем информации на второй карте иллюстрируют улучшение качества фильтрации.



**Р и с. 6.** Карты термодинамической температуры с масками облачности, полученными при помощи методик: *а* – используемой в настоящее время в МГИ НАН Украины; *б* – описанной в статье

**Выводы.** В ходе проделанной работы предложен усовершенствованный метод выделения облачности на дневных и ночных изображениях *AVHRR*, относящихся к акватории Черного моря. Применение этого алгоритма позволило снизить ошибки восстановления ТПМ в системе мониторинга, проводимого в МГИ НАН Украины.

Определены основные ситуации, связанные с недостаточной или избыточной отбраковкой облачности:

- участки поверхности моря, характеризующиеся большим температурным градиентом, могут классифицироваться как облачные (например границы апвеллингов или температурных фронтов);
- на участках поверхности моря с высокими градиентами скорости ветра могут возникнуть аномальные перепады альбедо, приводящие к неверной классификации;

– применение фиксированных пороговых значений может приводить к ошибкам при нестандартной для данного региона метеорологической ситуации.

При обработке данных для ряда аномальных ситуаций необходима интерактивная подборка пороговых значений.

Наиболее перспективными направлениями совершенствования методики представляются разработка подхода с параллельным, а не с последовательным применением фильтров, а также применение методов сегментации используемых цифровых карт.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stowe L., Davis P., McClain E.* Scientific basis and initial evaluation of the CLAVR-1 global clear/cloud classification algorithm for the advanced very high resolution radiometer // *J. Atmos. Ocean. Technol.* – 1999. – 16. – P. 656 – 681.
2. *Растоскуев В.В., Шалина Е.В.* Метод фильтрации облачности для данных прибора *AVHRR*, относящихся к региону Балтийского моря // *Исследования Земли из космоса.* – 1996. – №1. – С. 47 – 55.
3. *Saunders R.W.* An automated scheme for the removal of cloud contamination from *AVHRR* radiances over western Europe // *Int. J. Rem. Sens.* – 1986. – 7, №7. – P. 867 – 886.
4. *Saunders R.W., Kriebel K.T.* An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from *AVHRR* data // *Ibid.* – 1988. – 9, №8. – P.123 – 150.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь

Материал поступил  
в редакцию 04.12.07  
После доработки 24.12.07

**ABSTRACT** One of the variants of the algorithm of cloud detection (regionally adapted to the Black Sea) on *AVHRR* images is described. The threshold algorithms using the features of ascending radiation formation in various spectral intervals are taken as a basis. *AVHRR* data on the Black Sea permit to test and modify the existing algorithms of cloud detection in day and night time. The method efficiency is evaluated by processing satellite data for 2005 – 2006; its drawbacks are revealed.