

вых залежей; 2) трассирования зон разломов и определения сейсмотектонической активности региона; 3) поиска газогидратов; 4) оценки потока метана в атмосферу из моря, что необходимо для расчета вклада различных природных и антропогенных источников метана и их возможного влияния на потепление климата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обжиров А.И., Казанский Б.А., Мельниченко Ю.И. Эффект звукорассеивания придонной воды в краевых частях Охотского моря // Тихоокеанская геология. 1989, № 2. С. 119–121.
2. Обжиров А.И. Газогеохимические поля придонного слоя морей и океанов. М.: Наука, 1993. 139 с.
3. Обжиров А.И. и др. Мониторинг метана в Охотском море. Владивосток: Дальнаука, 2002. 250 с.
4. Соловьев В.А., Гинзбург Г.Д., Обжиров А.И., Дуглас В.К. Газогидраты Охотского моря // Отечественная геология. 1994. № 2. С. 190–197.
5. Geomar Report. Edit. Nicole Biebow. 1999. N 82. Kiel, Germany. S. 250.
6. Geomar Report. Edit. Nicole Biebow. 2002. N 88. Kiel, Germany. S. 270.
7. Gaedice Ch., Baranov B.V., Obzhairov A.I., Lelikov E.P., Belykh I.N., Basov E.I. Seismic stratigraphy, BSR distribution, and venting of methane-rich fluids west off Paramushir and Onecotan Islands, northern Kurils // Marine Geology. 1997. V. 116. P. 259–276.

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПОЛЯРНО-ОРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ FY-1C/1D ДЛЯ МОНИТОРИНГА ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

А.И.Алексанин, С.Е. Дьяков
С.Н. Катаманов, Ю.В. Наумкин

ИАПУ
ДВО РАН
Владивосток

ВВЕДЕНИЕ

Основным направлением работ «Центра регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН» (официальный статус ЦКП РАН [1]) является адаптация и создание новых технологий мониторинга полей океана и атмосферы. Центр обеспечивает как оперативной, так и ретроспективной информацией с метеорологических полярно-орбитальных и геостационарных спутников (NOAA, FY-1C, FY-1D, AQUA/MODIS, FY-2C, MTSAT-1R), научные исследования и хозяйственные приложения. Центр принимает участие в развивающейся кооперации стран региона (Китай, Тайвань, Республика Корея, Россия и Япония) по обмену технологиями и спутниковой информацией в рамках программы дистанционного зондирования океана UNESCO/IOC/WESTPAC – подпрограмма «Новая генерация температурных полей океана», являющейся, по сути, частью глобального международного проекта GODAE (Global Ocean Data Assimilation Experiment), и сотрудничеству в рамках программы по мониторингу вредоносного цветения водорослей и нефтяных загрязнений UNEP\NOWPAP\CEARAC (Программа охраны окружающей среды ООН \ План по северозападной части Тихоокеанского региона \

Региональный центр по специальному и прибрежному мониторингу).

Основная цель первого проекта – это расчет надежных и точных полей температуры поверхности океана 4 раза в день с пространственным разрешением 1 км. Карты должны рассчитываться в режиме реального времени, при любых погодных условиях и проходить постоянную верификацию. Наилучшими источниками информации являются инфракрасные изображения километрового разрешения. Увеличение количества источников информации для этой цели имеет первостепенное значение.

Ключевая проблема второго проекта – технологии мониторинга полей планктона и, в первую очередь, мониторинга вредоносного цветения водорослей на основе спутниковой информации о цвете океана. К основным рассчитываемым параметрам относятся концентрации хлорофилла, растворенного органического вещества и взвеси.

Появление новых китайских полярно-орбитальных спутников «FengYun-1C/1D» с радиометром MVISR обещало существенно улучшить мониторинг быстро меняющихся процессов и явлений на море и на суше, так как в отличие от базового источника информации (NOAA/AVHRR) китайский радиометр

не уступает ему по характеристикам и имеет пять дополнительных каналов (диапазонов зондирования в видимой области спектра). Установленный на спутниках FY-1C, FY-1D радиометр поставляет изображения 1,1 км разрешения и имеет формат кадра передачи данных, аналогичный формату данных радиометра AVHRR/NOAA [2]. Это упрощает первичную обработку информации и позволяет применять имеющиеся методики и программно-техническое обеспечение для приема данных и получения различных тематических продуктов. Спутник передает их на частоте 1,7 ГГц, что дает возможность использовать широко распространенные станции приема данных NOAA, однако с небольшой доработкой (скорость потока информации в 2 раза выше). Спутник функционирует в режиме прямой передачи данных, и его информация является бесплатной. Эксплуатация этих двух спутников показала их надежность: сроки реальной эксплуатации перекрыли планируемые. И если FY-1C функционировал в штатном режиме более четырех лет, то FY-1D, запущенный в 2002 г., функционирует до сих пор. Характеристики каналов MVISR позволяют использовать получаемые данные в первую очередь для определения температуры морской поверхности, детектирования льда и оценки концентрации хлорофилла. Последнее особенно важно, так как информация о цветности Земли, которую можно принять на относительно недорогие спутниковые станции, платная (данные радиометра SeaWiFS).

Китайская космическая программа демонстрирует огромный прогресс в области создания современных метеорологических спутников дистанционного зондирования Земли. И спутник FY-1D является примером этому. Однако не наблюдается широкого использования

этих источников информации в практике дистанционного зондирования. Так, в материалах национальных отчетов стран Тихоокеанского региона [3] по программе охраны окружающей среды ООН «UNEP» упоминается только использование этих данных в качестве иллюстративного материала, а не как массивов измерений. Все это обусловлено тем, что КНР не обеспечивает эти спутники необходимой документацией и калибровочными процедурами. Например, при запуске спутников FY-1C/1D были представлены только калибровочные коэффициенты видимых каналов. ИК-каналы калибровки не имели, алгоритмы расчета температуры поверхности моря не

создавались. Контроль качества радиометров после запуска спутников не проводился. В то же время полученные результаты показывают хорошие возможности спутника для мониторинга процессов океана и атмосферы [4–6]. Однако при организации нами обработки данных радиометра MVISR выявился ряд его конструктивных недостатков. Преодолению этих недостатков, оценке возможностей получения полей температуры поверхности океана, биооптических характеристик и созданию соответствующих алгоритмов посвящена данная работа. В ней выявлены особенности формирования изображений и созданы алгоритмы первичной обработки данных, по-

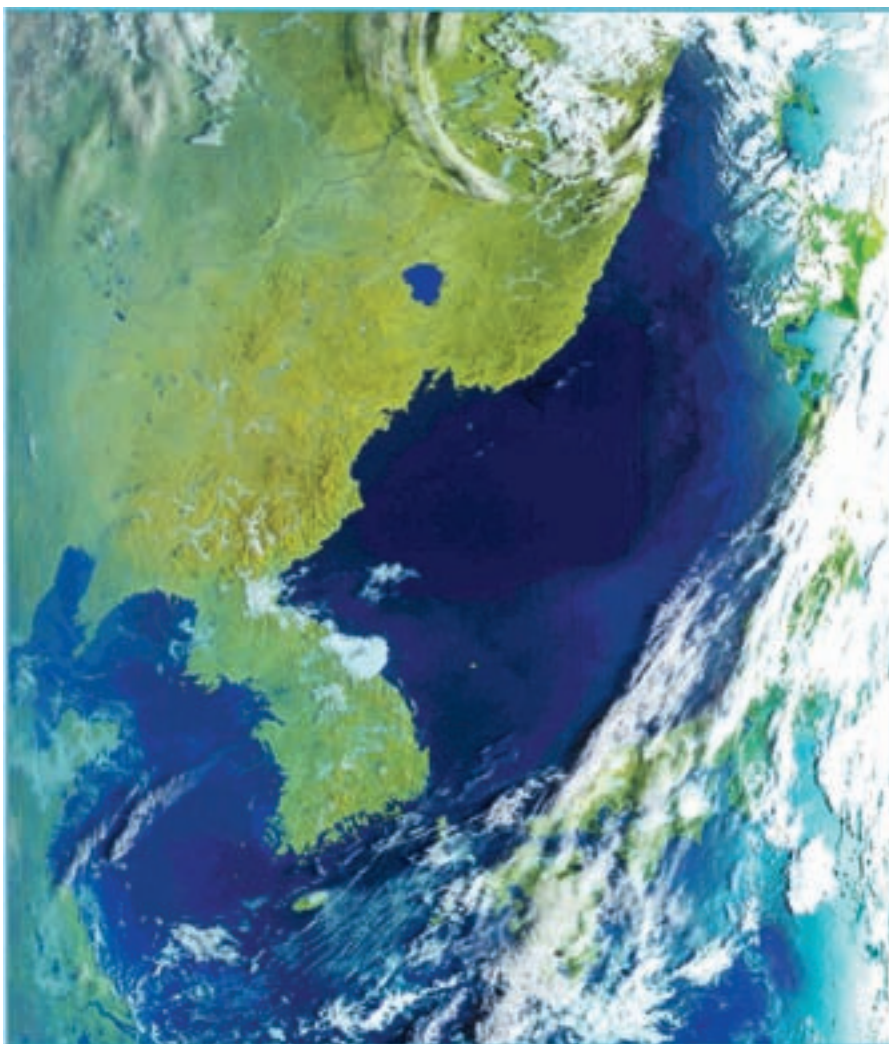


Рис 1. RGB-изображение спутника «FY-1D» за 22/09/2006

лучены зависимости, построены процедуры коррекции рассогласования каналов с подпиксельной точностью и алгоритм автоматической привязки изображений. Разработана процедура кросс-калибровки ИК-каналов на основе данных радиометра AVHRR/NOAA и расчета температуры поверхности моря по технологии MCSST. Оценена возможность использования каналов цветности спутников для мониторинга полей фитопланктона в море.

ПРОБЛЕМЫ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ

Отсутствие официальной документации и технологические недостатки китайских спутников осложняют первичную обработку данных. К существенным недостаткам следует отнести неточность бортовых часов и пространственное рассогласование изображений в разных спектральных каналах. Первая проблема – автоматическое нахождение моментов коррекции бортовых часов с Земли – была успешно решена [4,5]. Проводя анализ второй проблемы, сотрудник лаборатории А.В. Громов показал, что рассогласования в видимом диапазоне спектра хорошо корректируются поправками к углам пространственной ориентации датчиков каналов. Это позволило ему создать алгоритм построения трехканальных RGB-изображений (рис.1). Построенные при этом графики рассогласований координат вдоль строки хорошо соответствуют распределению отклонений в координатах пикселя из-за ошибок привязки, обусловленных ошибками при оценке трех углов ориентации платформы с радиометром [7]. Можно утверждать, что оптические оси датчиков на спутниках не совпадают. Идентичность результатов для двух спутников говорит о том, что работы по монтажу были выполнены с хорошим

качеством, а ошибки содержались в проектных схемах.

Для решения проблемы совмещения каналов, а также географической привязки изображений спутников FY-1C(D) был применен разработанный нами алгоритм автоматической привязки спутниковых изображений NOAA с пиксельной точностью [8,9]. В связи с тем что геометрические и физические аспекты формирования изображения радиометрами MVISR и AVHRR аналогичны, алгоритм можно использовать без изменений. Результаты его использования отдельно для каждого канала MVISR/FY-1C(D) показали, что данный алгоритм полностью применим к изображениям китайских полярно-орбитальных спутников и дает аналогичные результаты (для предсказания положения спутника на орбите использовалась орбитальная модель SGP4 с телеграммами TLE NORAD). Так как оптические оси датчиков радиометра являются несогласованными, в результате чего расчетные углы ориентации платформы спутника (крен, тангаж, рысканье) для каждого канала не совпадают, необходимо выполнять географическую привязку отдельно для каждого канала. Для того чтобы проводить привязку совместно всех десяти каналов FY-1D, была разработана следующая процедура. Сначала вычисляются реперные точки по изображению базового канала (в данном случае был выбран 4-й канал), которые после этого пересчитываются в наборы реперных точек для других каналов. Пересчет осуществляется по зависимостям, построенным в результате анализа рассогласований в положениях одних и тех же реперных точек текущего и базового канала. Далее для каждого каналов по его набору реперных точек вычисляются углы ориентации платформы датчика.

Исследования показали, что зависимость между смещениями реперных точек разных каналов хорошо описывается линейным приближением следующего вида:

$$dx_i = \widehat{dx}_i + a_0^k + a_1^k \cdot X_i, \quad (1)$$

$$dy_i = \widehat{dy}_i + b_0^k + b_1^k \cdot X_i, \quad (2)$$

где $\widehat{dx}_i, \widehat{dy}_i$ – смещения i -й реперной точки базового канала в пикселях; dx_i, dy_i – смещения i -й реперной точки k -канала, для которого выполняется перерасчет; X_i – координата столбца для соответствующей реперной точки; $a_0^k, a_1^k, b_0^k, b_1^k$ – коэффициенты линейных регрессий для канала k . Расчеты по серии изображений позволили оценить коэффициенты линейных регрессий для пересчета смещений реперных точек. Порядок величин составил: для свободного члена – 0,5–5 пикселей, для коэффициента наклона – 0,0005–0,005. Максимальные среднеквадратичные ошибки расчета данных коэффициентов составили: для свободного члена – $\sigma < 0,1$ и для коэффициента наклона – $\sigma < 0,0001$ (что эквивалентно в худшем случае 0,1 пикселя изображения на его краю). Для проверки адекватности линейной модели и значимости коэффициента регрессии использовался критерий Фишера с 95%-ной доверительной вероятностью.

Геометрический смысл вышеуказанных коэффициентов линейных регрессий является следующим: a_0^k – смещение вдоль строки, b_0^k – смещение вдоль столбцов, a_1^k – растяжение (или сжатие) вдоль строки и b_1^k – поворот относительно надира строки для изображения k -канала относительно базового канала. Максимальная величина коэффициентов a_1^k не превысила 1,5 пикселя на 1000. Наличие реального сжатия (не в пикселях, а в километрах) доказать

не удалось. Это можно объяснить как согласованным изменением шага нарезки принимаемой строки информации на пиксели, так и отклонениями от строки сканирования от надира.

По результатам экспериментов датчики радиометра MVISR/FY-1C(D) разбились на следующие группы относительно базового канала (четвёртый): 1, 2, и 6 – сдвиг вдоль столбцов, сдвиг и сжатие (растяжение) вдоль строки; 3, 5 – сдвиг вдоль столбцов, сдвиг вдоль строки и поворот относительно надира строки; 7, 8, 9, 10 – сдвиг вдоль столбцов, сдвиг и сжатие (растяжение) вдоль строки и поворот относительно надира строки. Таким образом, построенные линейные регрессии позволяют вычислять смещения для каждой реперной точки для любого канала относительно смещений соответствующей реперной точки базового канала.

Ещё одной существенной проблемой для географической привязки изображений китайских полярно-орбитальных спутников серии FY-1 является то, что в отличие от американских полярно-орбитальных спутников серии POES NOAA их платформа менее стабильна в течение сеанса приёма (10–12 мин). Для достижения пиксельной точности географической привязки изображения всего сеанса спутников FY-1C(D) недостаточно вычислять один набор углов ориентации платформы спутника (крен, тангаж, рысканье). Было выяснено, что колебания платформы медленные. Это позволяет вычислять набор углов ориентации датчиков для изображения, сформированного в течение 3–4 мин и обеспечивать пиксельную точность привязки.

КРОСС-КАЛИБРОВКА ИК-КАНАЛОВ СПУТНИКА FY-1D

Калибровка видимых каналов спутника FY-1D выполня-

ется с помощью линейных преобразований, коэффициенты которых опубликованы в [2]. В то же время процедура калибровки инфракрасных каналов спутника FY-1D не описана. Нами была предпринята попытка создания такой процедуры с помощью кросс-калибровки по данным спутников POES NOAA. Рассмотрение формата данных спутника FY-1D позволило установить, что в каждом фрейме исходного изображения FY-1D есть данные телеметрии, содержащие отсчеты сканирования радиометром космического пространства, отсчеты сканирования радиометром внутренней мишени, дополнительные слова, соответствующие внутренним датчикам (в т. ч. датчикам температуры корпуса радиометра или температуры внутренней мишени), а также слова синхронизации и резервные. В силу схожести набора передаваемых спутником данных с наборами данных спутников POES NOAA, процедура калибровки данных ИК-каналов FY-1D должна соответствовать процедуре калибровки ИК-каналов радиометров AVHRR спутников POES NOAA, что и было взято за основу.

Схема калибровки данных ИК-каналов

Процедура калибровки ИК-каналов радиометра AVHRR3 спутников POES NOAA реализуется тремя различными способами, описанными в NOAA NESS 107 Tech. memorandum [10], NOAA POD User's Guide [11] и NOAA KLM User's Guide [12], соответственно. В данной работе мы используем последнюю процедуру, которая является не только наиболее точной, но и достаточно простой.

Калибровка производится в два этапа. На первом этапе отсчеты радиометра преобразуются в радиационные яркости, а на втором радиационные ярко-

сти преобразуются в радиационные температуры.

Для радиометра с функцией отклика $\theta(\nu)$ радиационная температура связана с радиационной яркостью следующим образом:

$$R_n(T) = \frac{\int R_{plank}(T, \nu) \theta(\nu) d\nu}{\int \theta(\nu) d\nu}, \quad (1)$$

где $R_{plank}(T, \nu)$ – функция Планка:

$$R_{plank}(T, \nu) = \frac{c_1 \nu^3}{e^{\frac{c_2 \nu}{T}} - 1}. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) ν – волновое число, а c_1 и c_2 – константы, T – абсолютная температура.

В процедуре калибровки ИК-каналов NOAA KLM функция (1) заменена её аппроксимацией (3):

$$R_{klm}(T) = R_{plank}(T \times \tilde{A} + \tilde{B}, \tilde{\nu}). \quad (3)$$

В данной аппроксимации не используется функция отклика канала $\theta(\nu)$, а вместо неё применяются константы канала \tilde{A} , \tilde{B} , и $\tilde{\nu}$. Преобразование радиационных яркостей в радиационную температуру выполняется с помощью функции (4), обратной по отношению к функции (3), в которой T_{plank} – функция, обратная к функции Планка (2):

$$T_{klm}(R) = \frac{T_{plank}(R, \tilde{\nu}) - \tilde{B}}{\tilde{A}}. \quad (4)$$

Рассмотрим первую часть калибровки – преобразование отсчетов радиометра в радиационные яркости. Отсчеты и радиационные яркости связаны почти линейной функциональной зависимостью. Для того чтобы можно было подкорректировать вид функциональной зависимости, радиометр регулярно сканирует космическое пространство и теплую внутреннюю мишень, генерируя отсчеты C_{space} и C_{target} соответственно.

Температура внутренней мишени может изменяться со временем (она близка к 15°C) и измеряется четырьмя внутренними датчиками:

$$T_{target} = \sum_{n \in \text{nprt}} \tilde{w}_n (\tilde{a}_{n,0} + \tilde{a}_{n,1} C_{prt,n} + \tilde{a}_{n,2} C_{prt,n}^2), \quad (5)$$

$$T_{target} = \sum_{n \in \text{nprt}} \tilde{w}_n (\tilde{a}_{n,0} + \tilde{a}_{n,1} C_{prt,n} + \tilde{a}_{n,2} C_{prt,n}^2),$$

где $C_{prt,n}$ – отсчеты датчиков температуры, $\tilde{a}_{n,i}$ – коэффициенты полинома для датчика

n , а \tilde{w}_n w_n – удельные веса отдельных датчиков ($\sum_n \tilde{w}_n = 1$).

Зная температуру внутренней мишени, можно определить радиационную яркость мишени

$$R_{target} = R_{klm} (T_{target}),$$

а радиационная яркость космического пространства R_{space} известна и не изменяется со временем. Знание отсчетов и радиационных яркостей сканирования внутренней мишени и космического пространства позволяет определить коэффициенты линейного приближения зависимости радиационных яркостей от отсчетов:

$$R(C) = MC + I, \quad (6)$$

после чего вводится поправка на нелинейность функции отклика

$$R_{nline}(C) = \tilde{b}_0 + \tilde{b}_1 R(C) + \tilde{b}_2 R^2(C) \quad (7)$$

Таким образом, для калибровки необходимо: определить температуру внутренней мишени с помощью функции (5); рассчитать коэффициенты линейного приближения зависимости радиационных яркостей от отсчетов M и I (6); для калибруемого отсчета C определить радиационную яркость (7), что позволяет рассчитать соответствующую радиационной яркости температуру (4).

Данными, необходимыми для калибровки, являются: отсчеты внутренней мишени

C_{target} , отсчеты сканирования космического пространства

C_{space} и отсчеты датчиков температуры внутренней мишени $C_{prt,1}$, $C_{prt,2}$, $C_{prt,3}$, $C_{prt,4}$.

Параметрами калибровки являются: $\tilde{a}_{1-4,0-2}$ – коэффици-

енты преобразования отсчетов датчиков температуры в температуру внутренней мишени (4), \tilde{w}_{1-4} – веса отдельных датчиков температуры (4), \tilde{v} – центральное волновое число канала (3), \tilde{A} и \tilde{B} – поправки для функции Планка на нелинейность функции отклика

поправки на нелинейность функции отклика (7). Кроме этого в качестве дополнительного корректирующего параметра используется радиационная яркость космического пространства R_{space} (6) [12].

Параметры калибровки введены с тем, чтобы обеспечить их раздельное определение до запуска спутника. Поэтому некоторые параметры калибровки связаны друг с другом, что затрудняет и делает ненужным их одновременное определение. При вариациях коэффициентов \tilde{A} и \tilde{B} в типичных диапазонах изменчивости ошибка аппроксимации составит 0,1–0,2 К. Влияние данной погрешности можно исключить с помощью параметров нелинейной коррекции \tilde{b}_0 , \tilde{b}_1 , \tilde{b}_2 . Коэффициент R_{space} влияет в основном на наклон зависимости радиационной яркости от отсчетов в районе 0°C, а данный наклон может быть установлен изменением параметров нелинейной коррекции. Таким образом, для достаточно точной калибровки данных ИК-каналов необходимо определить волновое число канала \tilde{v} , параметры нелинейной коррекции \tilde{b}_0 , \tilde{b}_1 , \tilde{b}_2 , а также коэффициенты $a_{n,0}$, $a_{n,1}$, $a_{n,2}$.

Прочие коэффициенты калибровки можно зафиксировать следующим образом:

$$\tilde{A} = 1, \tilde{B} = 0, \tilde{R}_{space} = 0.$$

Проверка качества измерений температуры внутренней мишени

Температура внутренней мишени измеряется четырьмя термометрами. Прежде чем определять зависимость темпе-

ратуры внутренней мишени от показаний термометров, необходимо определить, насколько показания датчиков соответствуют друг другу, для того, чтобы исключить из рассмотрения неисправные термометры. Нами было рассмотрено изменение показаний датчиков температуры в течение нескольких лет. Установлено, что показания датчиков стабильны и отличаются друг от друга на фиксированные величины. Величины расхождений между датчиками, что будет видно после определения коэффициентов $a_{n,0}$, $a_{n,1}$, $a_{n,2}$, соответствуют 0,2–0,3°C, и могут быть объяснены различным положением датчиков и неравномерным нагревом внутренней мишени.

Зависимость между отсчетами сканирования внутренней тепловой мишени и показаниями датчиков температуры

Показания датчиков температуры и отсчеты сканирования внутренней тепловой мишени должны изменяться синхронно в случае, если причиной изменений является только изменение температуры внутренней тепловой мишени. На рис. 2 приведены графики изменения показания датчиков температуры внутренней мишени (после медианного сглаживания и осреднения), а также графики изменений отсчетов сканирования внутренней мишени каналами 3, 4, 5 (сглаженные). Изменение температуры внутренней мишени за время сеанса незначительно и колеблется в пределах 0,1°C. Колебания отсчетов 4-го и 5-го каналов существенны, по сравнению с колебаниями термометров. Как будет показано ниже, в целом существует хорошее соответствие между температурой и отсчетами радиометра. Однако наблюдаются несогласованные с температурой внутренней мишени колебания младших битов отсчетов сканирования мишени в про-

цессе приема, вызванные влиянием сторонних, не связанных с внутренней мишенью факторов. Это доказывает необходимость регулярного пересчета используемых при калибровке коэффициентов уже при работе с данными одного сеанса.

По отсчетам сканирования внутренней мишени можно оценить величину шумов сканера. Так, стандартное отклонение для 4-го канала равно 0,8 единицы отсчета, стандартное отклонение для 5-го равно 2,1, а для 3-го канала – 8 единицам отсчета. Таким образом, уровень шума 4-го канала спутника FY-1d соответствует уровню шума 4-го канала спутников POES NOAA, уровень шума 5-го канала значительно выше (у всех спутников POES NOAA уровни шумов 4-го и 5-го каналов меньше единицы). Шум 3-го канала спутника FY-1D значителен, и, следовательно, перед использованием данные 3-го канала должны проходить дополнительную обработку.

Определение параметров калибровки ИК-каналов радиометра MVISR

Определить перечисленные выше параметры калибровки можно сопоставлением данных FY-1D с данными каналов других спутников. При этом должны сопоставляться синхронные или почти синхронные измерения радиационных температур слабоконтрастных участков морской поверхности или суши, производимые при идентичных или почти идентичных условиях наблюдения. В данной работе использовались изображения радиационных температур сглаженные фильтром Гаусса и прошедшие фильтрацию облачности. Были отображены фрагменты изображений однородных участков морской или заснеженной поверхности, сканируемых в зенит или под небольшими (до 30 град) углами.

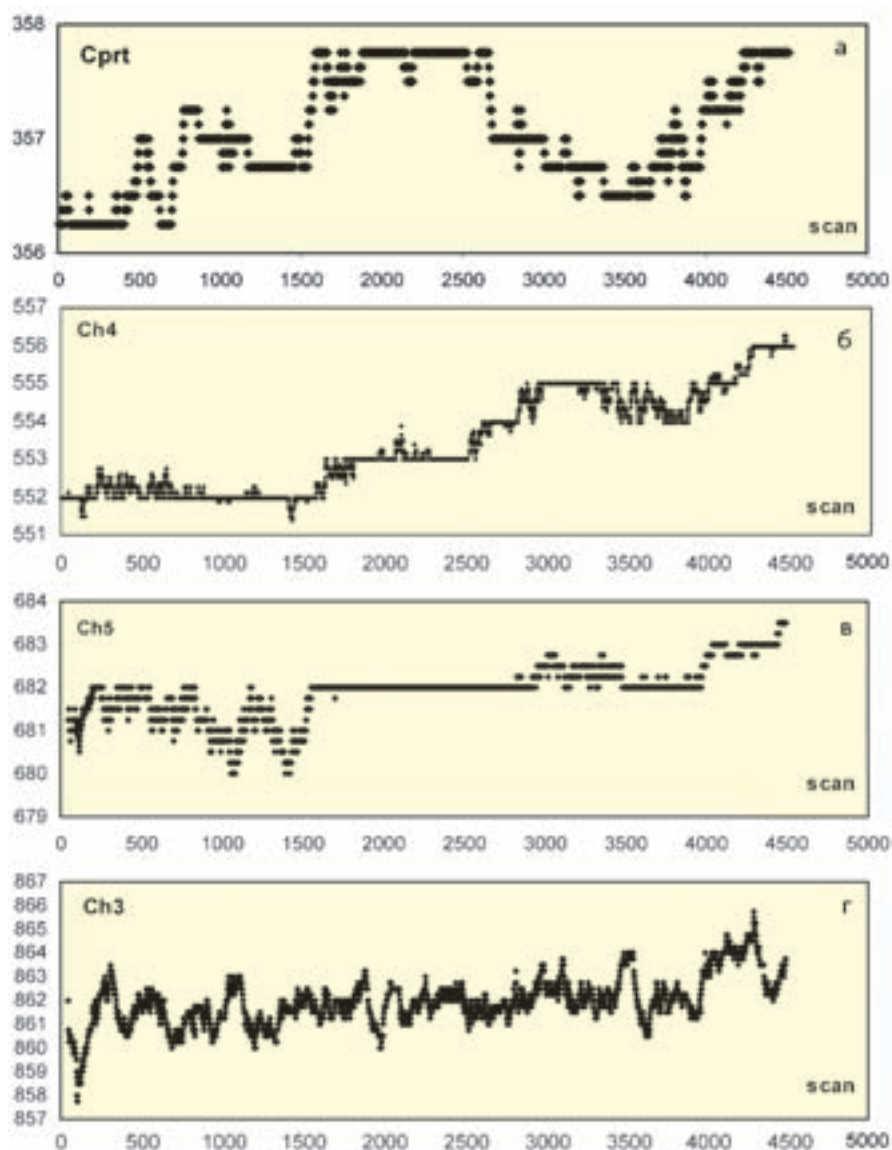


Рис. 2. Зависимость отсчетов датчиков температуры (а), и отсчетов сканирования внутренней теплой мишени датчиками каналов 3,4,5 (б, в, г) от времени

Определение коэффициентов делится на два этапа. На первом этапе мы определяем вид зависимости температуры мишени от показаний термометров (коэффициенты $a_{n,0}$, $a_{n,1}$, $a_{n,2}$). На втором этапе мы должны определить параметры нелинейной коррекции каналов.

На первом этапе создается набор различных отсчетов датчиков температуры внутренней теплой мишени FY-1D и соответствующих им радиационных температур 4-го канала спутников NOAA. Для этого надо сопоставить отсчеты 4-го канала спутника FY-1D и соответствующие им температуры

четвертого канала спутника NOAA, построить регрессию и с её помощью определить температуру мишени. Пример определения температуры внутренней мишени с помощью регрессии, построенной между отсчетами снимка FY-1D и радиационными температурами 4-го канала снимка POES NOAA, приведен на рис. 3,а. Определив температуру внутренней мишени для достаточно большого набора (84 снимка) спутниковых снимков, мы восстановили зависимость между отсчетами датчиков температуры и температурой внутреннего теплого тела (рис. 3,б),

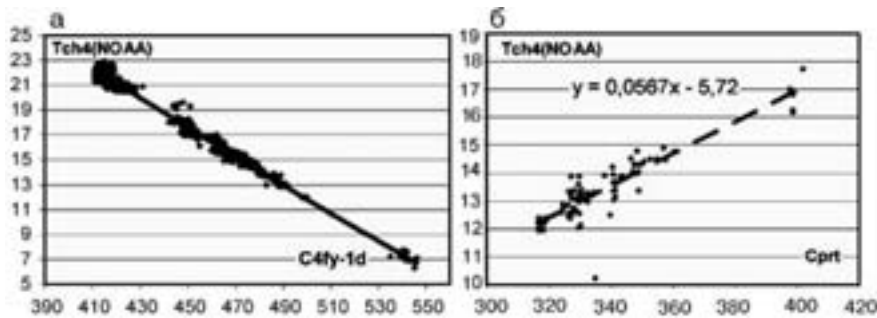


Рис. 3. Зависимость температуры внутреннего теплого тела от отсчетов датчика температуры. а – определение температуры внутреннего теплого тела для одного снимка, б – построение зависимости между отсчетами датчиков температуры FY-1D и температурой внутреннего теплого тела FY-1D

(рис. 3,б), что позволяет нам получить коэффициенты для формулы (5).

По данной выборке получены следующие результаты. Коэффициенты термометров примерно одинаковые и равны следующим значениям:

$$W_n \approx 0,25; a_{n,0} \approx 0,0567; a_{n,1} \approx -5,72; a_{n,2} \approx 0.$$

Мы отказались от определения последнего коэффициента, так как его введение не увеличивает степень достоверности аппроксимации.

Таким образом, получены общие для всех ИК-каналов FY-1D параметры калибровки. Их достаточно для предварительной калибровки данных.

Определение дополнительных параметров калибровки для каналов 3, 4, 5 также выполняется по парам значений

$$(T_{NOAA}, [C_{FY}, C_{prt}, C_{target}, C_{space}]).$$

$$S(\tilde{b}_0, \tilde{b}_1, \tilde{b}_2) = \sum (T_i^{noaa} - T^{FY-1d}(C_i^{FY}, C_{prt}^i, C_{space}^i, C_{target}^i, \tilde{b}_0, \tilde{b}_1, \tilde{b}_2))^2. \quad (8)$$

В качестве метода минимизации использовалась модификация алгоритма Ньютона с аналитическим расчетом матрицы вторых производных.

Полученные коэффициенты калибровки для четвертого канала:

$$\tilde{A} = 0, \tilde{B} = 1, \tilde{b}_0 = -8,35405, \tilde{b}_1 = 1,1979, \tilde{b}_2 = -0,0010679, \nu = 909,091, R_{space} = 0; \text{стандартная ошибка } 0,33^\circ\text{K}, \tilde{\nu} = 909,091 \text{ см}^{-1}.$$

В отличие от данных, использовавшихся для получения коэффициентов $a_{n,i}$, в нашем случае для кросс-калибровки был выбран только спутник NOAA-12. Это было связано с тем, что радиационные температуры различных спутников NOAA не согласуются друг с другом. Кроме этого спутники NOAA-12 и FY-1D движутся по близким орбитам и сканируют участки земной поверхности в одно и то же время (до одного часа), что позволяет исключить влияние суточных колебаний температуры водной поверхности.

После того как набор пар значений был собран, дополнительные параметры калибровки были определены численно минимизацией функции S по переменным

Для пятого канала:

$$\tilde{A} = 0, \tilde{B} = 1, \tilde{b}_0 = -25,2028, \tilde{b}_1 = 1,48287, \tilde{b}_2 = -0,0023067, R_{space} = 6,60774; \text{стандартная ошибка } 0,65^\circ\text{K}, \tilde{\nu} = 833,33 \text{ см}^{-1}.$$

Для третьего канала:

$$\tilde{A} = 0, \tilde{B} = 1, \tilde{b}_0 = -0,0478445, \tilde{b}_1 = 1,33666, \tilde{b}_2 = -0,488039, R_{space} = -0,0166312; \text{стандартная ошибка } 1^\circ\text{K}, \tilde{\nu} = 2700 \text{ см}^{-1}.$$

Сравнение полученных радиационных температур с радиационными температурами спутников POES NOAA

Радиационные температуры 4-го канала FY-1D, рассчитанные по приведенным выше коэффициентам, сравнивались с радиационными температурами спутников NOAA-12, 15, 17. При этом использовались участки изображений FY-1D и NOAA, выбранные визуально и прошедшие тщательную фильтрацию облачности.

Результаты такого сравнения представлены на рис. 4. Среднее отклонение для всех спутников составило 0,5 К и 0,3 К для сравнения с NOAA-12. Видна разница при сравнении NOAA12-15, с одной стороны, и NOAA-17 – с другой. Данное расхождение известно и говорит о необходимости тщательной интеркалибровки данных спутников POES NOAA при решении задач, требующих точных расчетов радиационной яркости.

ПОСТРОЕНИЕ КАРТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА

Преобразовав отсчеты сканирования поверхности океана в радиационные температуры, мы можем определить температуру поверхности океана.

Обычно для определения температуры поверхности океана с помощью каналов 10,5 мкм и 11,5 мкм используется технология MCSST [13]. Температура поверхности океана, восстановленная по данной технологии, определяется на основе измерений 4-го (10,5 мкм) и 5-го (11,5 мкм) каналов спутников POES NOAA с помощью следующей регрессионной зависимости:

$$T_{MCSST} = a_0 + a_1 T_4 + a_2 (T_4 - T_5) + a_3 (T_4 - T_5) (\sec(\theta) - 1) \quad (9)$$

в которой T_4 – радиационная температура 4-го канала, T_5 –

радиационная температура 5-го канала, θ – угол сканирования, а a_0 – a_3 – изменяющиеся от одного спутника к другому константы.

Наличие линейного тренда (рис. 4) между радиационными температурами спутников FY-1D и NOAA говорит о существенной разнице радиометров. Поэтому для построения алгоритма расчета температуры поверхности было принято решение переводить радиационные температуры FY-1D в соответствующие температуры конкретного спутника NOAA на основе полученных линейных зависимостей. В качестве такого спутника был выбран NOAA-12. После подстановки в формулу MCSST для NOAA-12 преобразованных значений радиационных температур 4-го, 5-го каналов FY-1D была получена формула для дня:

$$-251,67 + 3,4325T_4 - 2,50776T_5 + +0,24259(\sec(q) - 1)(0,9689T_4 + +1,25 - 0,9723T_5) \quad (10)$$

и формула для ночи:

$$-241,58 + 3,15506T_4 - 2,26468T_5 + +0,48079(\sec(\theta) - 1)(0,9414T_4 + +1,7 - 0,9498T_5) \quad (11)$$

Сравнение температур одних и тех же участков, измеренных спутниками FY-1D и NOAA-12, дало величину стандартного отклонения 0,56 и смещения -0,1. Полученная точность выше, чем точность формулы (9) для спутника NOAA-12, и, следовательно, она дает удовлетворительное решение задачи.

Оценки температуры поверхности океана с различных спутников NOAA не идентичны, а спутник NOAA-12 нельзя считать наилучшим эталоном для проведения кросскалибровки. Поэтому была сделана попытка уточнения полученных зависимостей (10–11) по данным трех спутников: NOAA-12, 15 и 17.

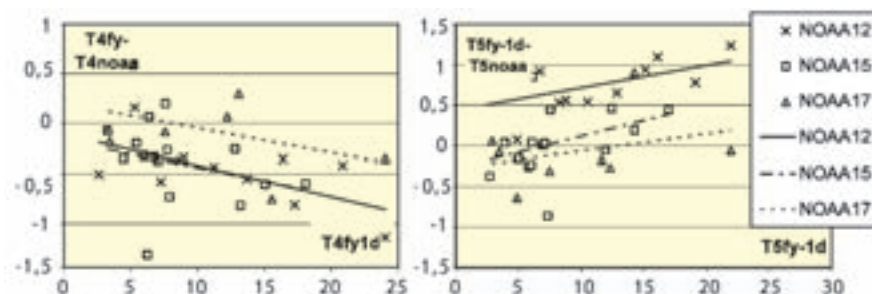


Рис. 4. Расхождения между температурой 4-го и 5-го каналов спутников NOAA и температурой 4-го и 5-го каналов спутника FY-1D, восстановленной по полученным параметрам

Разброс температур при этом оказался более существенным, чем при сравнении температур NOAA-12 и FY-1D. Уточнение коэффициентов полученных формул по всему набору температур показало, что без существенной потери точности можно использовать более грубую, но имеющую классический вид формулу (9) со следующими коэффициентами:

$$a_0 = -254,8, a_1 = 0,934, a_2 = 2,55, a_3 = -0,24.$$

Для ночных пикселей получим:

$$a_0 = -255,7, a_1 = 0,938, a_2 = 2,34, a_3 = -0,44.$$

Было проведено сравнение оценок температуры морской поверхности, полученных по данным FY-1D, с оценками, по-

лученным по данным спутников POES NOAA. Стандартное отклонение между температурами поверхности океана, вычисленное по 30 площадкам, равно 0,71 град, смещение 0,05, и какой-либо зависимости от величины температуры не наблюдается. Данные значения хорошо соответствуют аналогичным величинам, полученным при сравнении спутниковых оценок температуры радиометров AVHRR/NOAA с данными прямых наблюдений.

Пример карты температуры поверхности океана, построенной по данным спутника FY-1D с помощью полученных коэффициентов, и карты температуры поверхности океана построенной, по данным спутника NOAA-17, приведен на рис. 5.

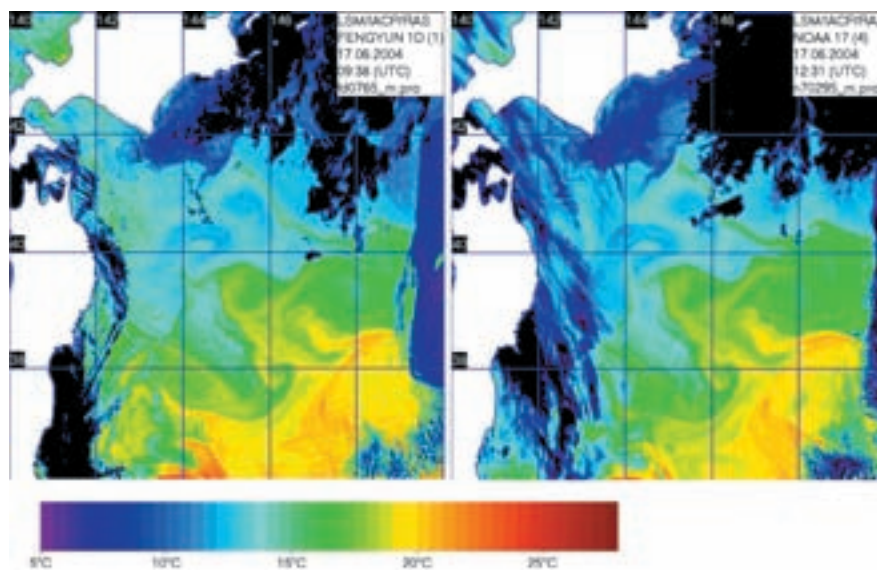


Рис. 5. Карты температуры морской поверхности, полученные по одиночным изображениям спутников FY-1D и NOAA-17

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ВОЗМОЖНОСТИ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ
FY-1C, FY-1D ДЛЯ
МОНИТОРИНГА ПОЛЕЙ
ФИТОПЛАНКТОНА В МОРЕ**

Наличие у спутников FY-1C, FY-1D каналов цветности моря (7 – 0,43–0,48 мкм, 8 – 0,48–0,53 мкм, 9 – 0,53–0,58 мкм) позволяет их использовать для мониторинга фитопланктона (оценки концентрации хлорофилла-а). Однако спектральная ширина данных каналов примерно вдвое превышает спектральную ширину соответствующих каналов сканера цвета океана SeaWiFS. В то же время использование спектральных индексов калиброванных каналов 8-го и 9-го спутника FY-1D позволяет строить изображения, которые хорошо соответствуют картам концентрации хлорофилла-а, рассчитанным по данным радиометра SeaWiFS [4,6]. И вопрос состоит лишь в точности расчета величины концентрации.

Для построения алгоритма расчета концентрации хлорофилла-а в море необходимо по данным спутниковых измерений провести атмосферную коррекцию каналов, рассчитать нормализованную восходящую радиацию и на основе индексов коэффициентов диффузного отражения нескольких каналов определить концентрацию. Для решения задачи по технологии, применяемой при обработке данных радиометра SeaWiFS и реализованной в пакете программ SeaDAS [14], требуется сопоставить каналы базовых спутников и китайских. В таблице приведено выбранное нами соответствие каналов.

Первый этап построения алгоритма предполагает оценку уровня радиации, приходящей на спутник в каждом спектральном диапазоне, – top-of-atmosphere (TOA). Расчет такой радиации на основе калибровок

Соответствие каналов радиометров MVISR и SeaWiFS

Канал радиометра SeaWiFS, №	Волновые числа каналов SeaWiFS, мкм	Соответствующие каналы спутника FY-1D	Спектральный диапазон и среднее волновое число FY-1D
1	412	7	0,43–0,48 (0,455)
2	443	7	0,43–0,48 (0,455)
3	490	8	0,48–0,53(0,505)
4	510	8	0,48–0,53 (0,505)
5	555	9	0,53–0,58(0,555)
6	670	1	0,58–0,68 (0,63)
7	765	2	0,84–0,89 (0,865)
8	865	2	0,84–0,89 (0,865)

видимых каналов спутника FY-1D, построенных при его запуске [2], показал существенное отличие от данных радиометра SeaWiFS при сканировании одного и того же участка моря при схожих углах наблюдения и незначительных временных расхождениях проведения съемки. Это объясняется старением и деградацией датчиков. Так, для канала 6-го деградация существенна при использовании значений с большой величиной яркости (рис. 6).

Использование поправок к калибровке датчиков для спутника FY-1D, приведенных в

работе [15], не принесло успеха. Поправки были рассчитаны в 2003 г., и за три года они существенно изменились. Процедура проведения калибровки функционирующего спутника, описанная в упомянутой статье, требует специальной аппаратуры и полевых измерений. Один из способов решения задачи – это интеркалибровка на основе данных радиометра SeaWiFS, или MODIS. Нами были проведены оценочные работы по возможностям интеркалибровки на небольшой серии изображений на основе данных радиометра SeaWiFS.

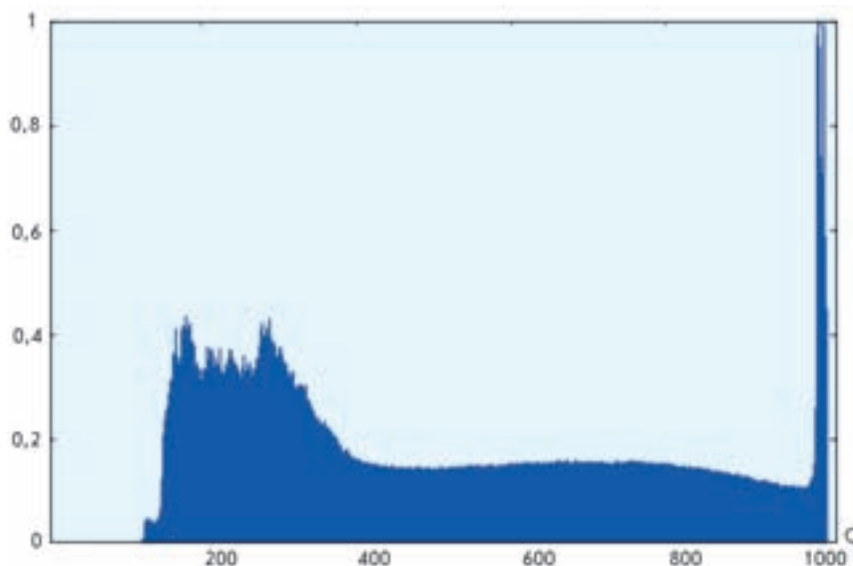


Рис. 6. Гистограмма яркости 6-го канала спутника FY-1D, отражающая искажения яркости при больших значениях (правый край)

И если интеркалибровка каналов радиометра MVISR позволяет добиться сопоставимых величин радиации ТОА, то расчет нормализованного излучения, выходящего из воды, не привел к успеху при использова-

нии технологии пакета SeaDAS. В первую очередь не удалось добиться приемлемых величин релеевского и аэрозольного рассеяния для проведения атмосферной коррекции. По-видимому, помимо создания аккуратной

процедуры интеркалибровки, необходимо проводить отдельные исследования по алгоритмам расчет ключевых параметров, использующихся при оценке концентрации хлорофилла в море.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований можно сделать заключение, что данные китайских спутников FY-1C и FY-1D имеют высокое качество и демонстрируют хорошие возможности для их использования при мониторинге различных

процессов и объектов Земли. В то же время требуются значительно большие усилия для реализации первичной обработки данных, чем при использовании аналогичных спутниковых систем европейского или американского производства. Возможно-

сти спутников FY-1C и FY-1D не уступают возможностям радиометра AVHRR спутника NOAA, а наличие дополнительных пяти каналов позволяет значительно расширить диапазон использования их данных.

Работа поддержана грантами РФФИ № 06-01-00660; 07-07-00203 и грантами ДВО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Центры коллективного пользования Российской академии наук. М.: Наука, 2004. 192 с.
2. Kramer Herbert J. Feng-Yun-1 (Polar Orbiting Meteorological Satellite Series) // http://directory.eoportal.org/pres_FengYun1PolarOrbitingMeteorologicalSatelliteSeries.html
3. National reports on ocean remote sensing in the NOWPAP region. NOWPAP CEARAC, 2005. 273 p.
4. Алексанин А.И., Дьяков С.Е., Громов А.В., Наумкин Ю.В. Фомин Е.В. Обработка и использование данных полярно-орбитальных спутников FengYun // Сб. тр. Второй открытой Всерос. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва: ИКИ, 2005. С. 66–70.
5. Levin V.A., Alexanin A.I., Alexanina M.G., Bolovin D.A., Gromov A.V., Diakov S.E. Receiving and Processing of Chinese Meteorological Satellites FengYun Data in the Regional Centre of Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences Proc. of 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment, S-Petersburg 20-24 June 2005. USA, 2005 // www.isprs.org/publications/related/ISRSE/html/papers/611.pdf
6. Alexanin A.I., Diakov S.E., Fomin E.V., Katamanov S.N. FEB RAS satellite center: acquisition and applications of satellite data in the northwest Pacific region: current states and challenges ahead // Proc. of abstracts of “The 4th International Workshop on Remote Sensing of Marine Environment in the Northwest Pacific Region & 1st International Symposium on the Bio-invasion of Non-indigenous Species, July 31 – August 1-2, 2006. Busan. PKNU. 2006.
7. Brunel P., Marsouin A. Operational AVHRR navigation results // International Journal of Remote Sensing. 2000. V. 21, N 5, P. 951–972.
8. Alexanin A.I., Katamanov S.N., Epstein Yu.S. Problems of accurate automatic navigation of NOAA/AVHRR and FY-1D satellite images // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment (31st ISRSE), Global Monitoring for Sustainability and Security, Saint Petersburg, RF, June 20-24. 2005. // www.isprs.org/publications/related/ISRSE/html/papers/610.pdf
9. Алексанин А.И., Катаманов С.Н. Автоматическая привязка спутниковых изображений AVHRR/NOAA при сложных условиях наблюдения // Сб. тр. Третьей открытой Всерос. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва: ИКИ РАН, 2006. В печати.
10. NOAA Technical Memorandum NESS 107 – Rev. 1, Data extraction and calibration OF TIROS-N/NOAA radiometers / Walter G. Planet (Editor) – Washington, D.C. November 1979, Revised October 1988 // <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/pubs/ness107.pdf>
11. B. Katherine Kidwell NOAA Polar Orbiter Data User’s Guide // National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Environmental Satellite Data and Information Services (NESDIS), National Climatic Data Center (NCDC) // <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/podug/index.htm>
12. Goodrum Geoffrey, Kidwell Katherine B., Wayne Winston NOAA KLM user’s guide // <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm>
13. C. C. Walton. Nonlinear multichannel algorithms for estimating sea surface temperature with AVHRR satellite data // J. Appl. Meteorol.; 1988. V. 27, 115,
14. Fu, G., Baith, K. S., and McClain, C. R., 1998, «SeaDAS: The SeaWiFS Data Analysis System» // Proceedings of «The 4th Pacific Ocean Remote Sensing Conference», Qingdao, China, July 28-31, 1998/ P. 73–79.
15. Liu J.-J., Li Z. A new method for cross-calibration of two satellite sensors // J. Remote sensing, 10. December. 2004. V. 25, N 23. P. 5267–5281.