

МЕТОДИ І ЗАСОБИ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

УДК 551.58 + 528.83

А.А. Кривобок

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ ПО ДАННЫМ ГЕОСТАЦИОНАРНОГО СПУТНИКА MSG. ЧАСТЬ II: ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ, РАЗМЕРЫ КОТОРОЙ МЕНЬШЕ ЕДИНИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Рассмотрены результаты и описана схема практической реализации алгоритмов определения радиационной температуры на верхней границе облачности, размеры которой меньше единичного элемента изображения (пикселя). Показано, что высокие значения степени покрытия (балла) облачностью N имеют пикселя изображения с низкими значениями радиационной температуры на верхней границе облачности. Использование N для коррекции радиационной температуры позволяет получить правдоподобное поле радиационной температуры и увеличить заблаговременность предупреждения ее появления.

Введение

В рамках проекта “Использование данных видимого канала высокого пространственного разрешения (HRVIS) геостационарного спутника METEOSAT второго поколения (MSG) для обнаружения быстро развивающейся конвективной облачности” автором были разработаны и протестированы на реальных данных алгоритмы для определения метеопараметров небольших по размерам конвективных облачных образований [1]. Как указывалось в работе [2], основной целью данного проекта являлось совершенствование существующей системы определения зон активной конвективной деятельности по спутниковым данным RDT (Rapid Developing Thunderstorm) [3] путем использования данных канала HRVIS спутника MSG.

В настоящей работе описаны разработанные автором алгоритмы, включающие решение задач, связанных с технологическим процессом обработки реальных спутниковых данных, а также методы определения значения степени покрытия облачностью пикселя N и радиационной температуры на верхней границе облачности [2]. Для того, чтобы показать эффект использования данных канала HRVIS, было использовано два метода определения N : по данным этого канала и видимых каналов низкого пространственного разрешения (VIS0.6, VIS0.8) [2]. Тестирование алгоритмов показано на примере двух типов конвективной облачности, наблюдавшейся над северным побережьем Африки летом 2004 года.

Описание схемы обработки спутниковых данных

Для реализации метода определения яркостной температуры на верхней границе облачности была разработана схема обработки реальных спутниковых данных, которая состоит из следующих блоков:

- инициализации и считывания исходных спутниковых и вспомогательных данных;
- определения облачных и безоблачных пикселей на изображении;
- расчет N для облачных пикселей;
- расчет яркостной температуры облачных пикселей.

Исходные спутниковые и вспомогательные данные

Исходные данные спутника MSG – это откалиброванные данные в видимых (VIS0.6 – центральная полоса 0.6 мкм, VIS0.8 – 0.8 мкм, HRVIS - 0.75 мкм) и инфракрасном (IR10.8 – центральная полоса 10.8 мкм) каналах. К вспомогательным данным для каждой точки изображения относится информация о типе облачности над исследуемым районом (Cloud Type product [4]), данные о географических координатах и геометрии наблюдений, информация о типе подстилающей поверхности (land/sea/coast atlas и land cover data), цифровая карта местности (elevation atlas), среднемесячные значения отражательных характеристик подстилающей поверхности по данным спутника NOAA [5], среднемесячные интегральные значения содержания водяного пара в атмосфере [6], а также предварительно рассчитанные значения характеристик отражения на верхней границе атмосферы для безоблачных и облачных пикселей в каналах VIS0.6, VIS0.8, HRVIS.

Определение облачных и безоблачных пикселей на изображении

Для определения облачных и безоблачных пикселей на изображении была использована “пороговая” методика, суть которой заключается в том, что если значение отражаемости (альбедо) пикселя в видимом канале больше, чем какое-то пороговое значение, то он относится к облачному, если нет - то к безоблачному пикселю. Для нашего случая такой тест для каждого канала будет выглядеть следующим образом:

$R_{0.75} > R_{0.75 \text{ threshold}}$ для канала HRVIS;

$R_{0.6} > R_{0.6 \text{ threshold}}$ для канала VIS0.6 (используется над земной поверхностью);

$R_{0.8} > R_{0.8 \text{ threshold}}$ для канала VIS0.8 (используется над морской поверхностью),

где $R_{0.75}$, $R_{0.6}$, $R_{0.8}$ – значения отражаемости в каналах HRVIS, VIS0.6, VIS0.8; $R_{0.75 \text{ threshold}}$, $R_{0.6 \text{ threshold}}$, $R_{0.8 \text{ threshold}}$ – значения пороговых величин в каналах HRVIS, VIS0.6, VIS0.8.

Пороговые значения в каждом канале предварительно рассчитываются с использованием решения задачи переноса излучения в атмосфере на соответствующих длинах волн. Чтобы получить более реалистичные пороговые значения, необходимые рассчитанные значения увеличить на определенную величину. Такая процедура необходима, чтобы учесть вариации отражательных характеристик атмосферы и подстилающей поверхности [4]. Над морской поверхностью эта величина составляет 7%, над сушей – 8%, а над прибрежными зонами – 10%, что связано с несовершенной процедурой географической привязки изображения. Результаты работы данной методики представлены на рис. 1.

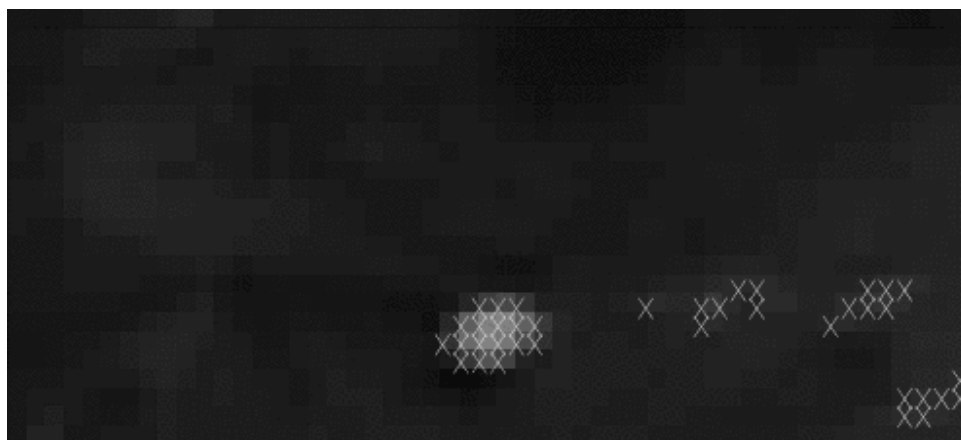


Рис. 1. Пример идентификации облачных пикселей пороговым методом на изображении канала HRVIS0.6, 11:30 UTC 4 июля 2004 г. Облачные пиксели отмечены “X”

Расчет N для облачных пикселей

Для каждого облачного пикселя, обнаруженного в канале HRVIS по методу, описанному в [2], находится N_{HR} по следующей формуле:

$$N_{HR} = (R_{vis} - R_{svis}) / (R_{cvis} - R_{svis}), \quad (1)$$

где R_{vis} – альbedo исследуемого HRVIS пикселя; R_{svis} – значение альbedo безоблачного пикселя; R_{cvis} – альbedo облачного HRVIS пикселя.

Для того, чтобы в дальнейшем использовать N_{HR} для коррекции расчета радиационной температуры для одного IR10.8 пикселя, N_{HR_L} рассчитывается, как среднее девяти HRVIS пикселей:

$$N_{HR_L} = (\sum_{i=1}^{N_{cl}} N_{HR,i}) / 9. \quad (2)$$

Для каждого облачного пикселя, обнаруженного в канале VIS0.6, $N_{0.6}$ находится по следующей формуле:

$$N_{0.6} = (R_{vis0.6} - R_{svis0.6}) / (R_{cvis0.6} - R_{svis0.6}), \quad (3)$$

где $R_{vis0.6}$ – альbedo исследуемого VIS06 пикселя; $R_{svis0.6}$ – альbedo безоблачного пикселя; $R_{cvis0.6}$ – альbedo полностью облачного пикселя.

Для канала VIS0.8 балл облачности находится совершенно так же, как и для VIS0.6.

Определение R_{svis}

Значение R_{svis} определяется по методу, описанному в [2], суть которого заключается в нахождении на изображении ближайшего к исследуемому, частично покрытому облачностью пикселя, безоблачного пикселя, имеющего такое же значение R_{svis} на верхней границе атмосферы, как и исследуемый, в том случае, если последний был бы безоблачным. Общеизвестно, что значение альbedo на верхней границе атмосферы в видимом диапазоне спектра зависит от значений альbedo подстилающей поверхности и вклада атмосферы, который определяется содержанием водяного пара (аэрозольным рассеиванием мы пренебрегаем). Поэтому для нахождения соответствующей пары пикселей на изображении мы исходили из того, что такие пиксели будут иметь одинаковые значения альbedo на верхней границе атмосферы, если они имеют близкие значения альbedo подстилающей поверхности и содержание водяного пара над ними будет

одинаковым. Для реализации подобного подхода каждый анализируемый пиксель (АП) должен пройти соответствующие тесты.

Первый тест – расстояние от искомого облачного пикселя до АП должно быть больше, чем длина тени от облака. Т. к. мы рассматриваем облачные пиксели, то при определенном положении Солнца они создают тени на подстилающей поверхности, которые уменьшают реальные значения альbedo. Это расстояние *shadow_distance* определяется следующим образом:

$$\text{shadow_distance} > \frac{B}{\text{tg}(\text{sun_angle})}, \quad (4)$$

где *B* – высота верхней границы облака; *sun_angle* – зенитный угол Солнца.

Второй тест – различие в значениях альbedo в видимом диапазоне спектра между облачным пикселем и АП. Суть этого теста заключается в том, чтобы найти на изображении пиксели, имеющие одинаковые значения альbedo. В качестве значений в видимом диапазоне спектра мы использовали базу данных среднемесячных значений альbedo подстилающей поверхности в видимом диапазоне спектра, созданную по данным AVHRR [5]. Для того чтобы избежать ситуации, при которой при соответствующем критерии не находится АП, мы использовали три значения критерия, которые автоматически изменяются до нахождения АП на изображении (табл. 1).

Таблица 1

Критерии для прохождения второго теста

HRVIS (%)			VIS0.6 (%)		
1	2.5	10	1	2.5	10

Третий тест – различие в значениях содержания водяного пара в атмосфере над облачным пикселем и АП (табл. 2). Суть данной процедуры заключается в том, чтобы из пикселей, имеющих одинаковые значения альbedo подстилающей поверхности (т.е. прошедшие второй тест), отобрать те, над которыми содержание водяного пара и соответственно вклад атмосферы в альbedo на верхней ее границе будет одинаковым. В качестве исходных данных используются среднемесячные значения водяного пара в атмосфере [6]. Использование трех критериев имеет тот же смысл, что и прохождение второго теста.

Критерии для прохождения третьего теста

HRVIS(g/cm^2)			VIS0.6(g/cm^2)		
0.25	1.0	1.5	0.25	1.0	1.5

На рис. 2 приведен пример работы предложенного метода.

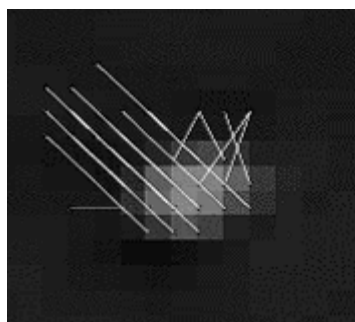


Рис. 2. Пример нахождения АП предложенным методом на изображении канала HRVIS, 11:30 UTC 4 июля 2004 г. Белыми линиями отмечены облачные пиксели и соответствующие им АП

Определение R_{cvis}

Расчет R_{cvis} основан на моделировании переноса излучения в видимом диапазоне в облачной среде. Для этого использовался метод дискретных ординат, который решает уравнение переноса в N -дискретных зенитных углах N -уравнениями. Эти уравнения могут быть решены численно, а в некоторых случаях аналитически. Рассеивающая фазовая функция аппроксимируется конечным числом полиномов Лежандра. Количество потоков ($2*N$) определяет точность расчетов интенсивности или потоков радиации в этом методе. Для точного расчета интенсивности радиации для случая многократного рассеивания было использовано 32 потока. Спектральное разрешение при расчетах на длинах волн (0,25мкм-4мкм) составляет 0,005 мкм. В расчетах были использованы специальные фильтры, описывающие спектральные характеристики HRVIS, VIS0.6, VIS0.8 каналов спутника MSG.

Для того, чтобы избежать дополнительных временных затрат на расчет R_{cvis} , при обработке спутниковых данных R_{cvis} предварительно рассчитывается в виде специальных таблиц (табл. 3), в которых учтены различные отражательные характеристики подстилающей поверхности, содержание водяного пара в слое атмосферы, тип атмосферы и геометрия наблюдений. В расчетах принималось, что облако является однородным плоскопараллельным слоем, состоящим из водяных капель.

Таблица 3

Параметры для расчета R_{cvis}

Тип поверхности	Оптическая толщина облака	Тип облака	Модель атмосферы	Солнечный зенитный угол (°)	Угол зондирования (°)	Азимутальный угол (°)
Вода Снег Растительность Редкая растительность (50%) Пустыня	33 67 150	Плоскопараллельное Высота основания облака – 1 км Высота верхней границы – 3 км	Лето средних широт	5 – 75, шаг 5	5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85	0 - 180, шаг 15

Определение температуры верхней границы облака с учетом того, что часть пикселя (N) изображения покрыта облачностью

Как было показано в работе [2], T_c яркостная температура на верхней границе облачности с учетом того, что часть пикселя (N) изображения покрыта облачностью и имеет следующий вид:

$$T_c = [T_{IR} - (1-N) * T_s] / N, \quad (5)$$

где T_{IR} – измеряемая яркостная температура; T_s – измеряемая яркостная температура безоблачной части пикселя.

Таким образом, для оценки яркостной температуры верхней границы облачности, частично покрывающей пиксель изображения, необходимо получить яркостную температуру подстилающей поверхности T_s и оценить степень покрытия пикселя облачностью N. Учитывая, что балл облачности в (1) определялся несколькими способами (2-3), нами были рассчитаны два поля радиационной температуры верхней границы облачности (T_{cN_HR} и T_{cN_06}), которые соответствуют N_{HR_L} и $N_{0.6}$.

Описание исследуемых конвективных систем

Было исследовано две интенсивно развивающихся конвективных системы, которые были обнаружены у берегов Северной Африки 4 июля 2004 года. Первая, отмеченная на рис. 3 как I, представляла из себя очень быстро развившееся конвективное облако в период с 11:15 до 12:00 UTC. Если мы проследим динамику (см. рис. 3), то обнаружим, что в 11:00 UTC наблюдались только очень маленькие облака, которые, объединившись в одно большое облако, развивались в последующие 15÷45 минут. Система RDT обнаружила это облако в 11:30 UTC со следующими параметрами: стадия развития облака – развивающееся, минимальная температура -46°C . В следующие 15 минут параметры были такими: стадия развития облака – развивающееся, минимальная температура -52°C . В 12:00 UTC данное облако уже имело следующие параметры: стадия развития облака – распадающееся, минимальная температура -50°C .

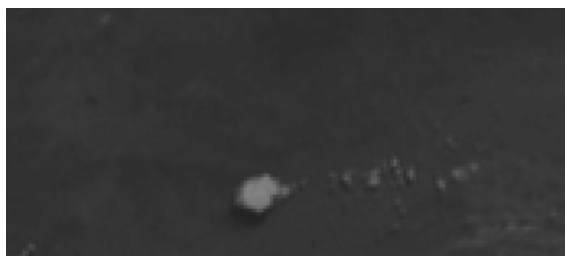
11:00



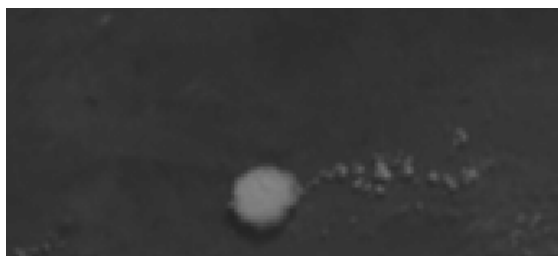
11:15



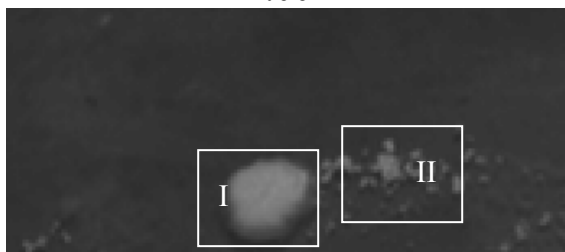
11:30



11:45



12:00



12:15



Рис. 3. Динамика развития конвективной облачности по данным канала HRVIS спутника MSG, 4 июля 2004 года 11:00 ÷ 12:15 UTC

Вторая конвективная система, отмеченная на рис. 3 как II, представляет из себя несколько небольших конвективных облаков, которые развивались самостоятельно. И хотя они расположены рядом друг с другом, тем не менее видны границы между ними. По размерам и интенсивности развития они гораздо меньше, чем конвективная система I. Система RDT зафиксировала это образование в 12:15 UTC со следующими параметрами: стадия развития облака – развивающееся, минимальная температура -37°C .

Обсуждение результатов

Анализ полей балла облачности

а) Конвективная система I

В 11:15 UTC эта система характеризуется небольшими облачными образованиями размером в несколько пикселей. Поле балла облачности является неоднородным. Значения N_{HR} достигают почти 100% значения, N_{HR_L} - 79% , а $N_{0.6}$ - 56%. На последующих изображениях небольшие облака объединяются и в дальнейшем развиваются, как одно целое. Значения балла облачности (N_{HR} , N_{HR_L}) достигают 100% и увеличивается число пикселей, имеющих такие значения. Поле балла облачности становится более однородным с уменьшением значений к краю облака, где располагаются пиксели, частично покрытые облачностью. Максимальные значения $N_{0.6}$ не превышают 90-95%.

б) Конвективная система II

Развитие этой облачной системы отличалось от предыдущей тем, что она на начальном этапе состояла из очень небольших облачных образований, которые на протяжении почти всего времени наблюдений развивались независимо друг от друга. Поле облачности, полученное по данным низкого пространственного разрешения $N_{0.6}$, является неоднородным (со значениями от 14 до 29% в 11:30 UTC и достигающих максимальных значений – 79% в 12:00 UTC). Для поля облачности N_{HR} максимальные значения в 11:30 UTC составляли 65%, для N_{HR_L} - 42%. На последующих изображениях происходило постепенное увеличение этих значений и к 12:00 UTC они достигли 100%.

Динамика небольшого по размерам облачного образования (9×9 HRVIS пикселей) показала, что в период между 11:15 и 11:30 UTC не было отмечено постоянного интенсивного развития облачности, значения N_{HR} изменялись в пределах от 6 до 64%. Вполне вероятно, что облачность рассеивалась или двигалась за границы исследуемой области. Начало достаточно интенсивного развития конвективной облачности было отмечено в 11:45 UTC, когда более половины пикселей данной области стали облачными и максимальные значения приблизились к 90%, хотя наблюдались и невысокие значения N_{HR} (2%). На последующих изображениях поле N_{HR} стало более однородным со значениями 80-100%.

в) Детальный анализ полей балла облачности за 15-30 минут до обнаружения системой RDT

Учитывая, что главной целью данного исследования было нахождение дополнительных параметров, позволяющих описывать развитие конвективной облачности перед тем, как она была обнаружена RDT системой, нами было проведено детальное исследование полей балла облачности на начальном этапе развития конвективных систем I и II. Как было отмечено ранее, конвективная система I была обнаружена RDT системой в 11:30 UTC, а конвективная система II - в 12:15 UTC. Анализ значений N_{HR} в 11:15 UTC для конвективной системы I (за 15 минут до обнаружения) показал, что максимальные значения достигали 92%, количество пикселей, имеющих значения около 90%, - 5, что составляло менее одного пикселя низкого пространственного разрешения (рис. 4). Для полей N_{HR_L} и $N_{0.6}$ максимальные значения составляли 78% и 56% соответственно (рис. 4). Значения N_{HR_L} и $N_{0.6}$ для других пикселей оказались значительно меньше.

Анализ поля балла облачности для конвективной системы II в 11:45 и 12:00 UTC показал, что значения N_{HR} достигали 90% (пять пикселей) за 30 минут и почти все пиксели за 15 минут до обнаружения системой RDT (рис.5). Соответственно значения N_{HR_L} достигали 70% (один пиксель), $\approx 80 \div 90\%$ (три пикселя) и $N_{0.6}$ - 41% (один пиксель), 78% (один пиксель).

Таким образом, высокие значения ($\approx 90\%$) N_{HR} интенсивно развивающейся конвективной облачности могут наблюдаться за 30 минут до ее обнаружения системой RDT, причем такие значения могут иметь несколько пикселей. Для N_{HR_L} и $N_{0.6}$ такие значения наблюдаются не ранее,

чем за 15 минут, и в основном только для одного пикселя в конвективной системе.

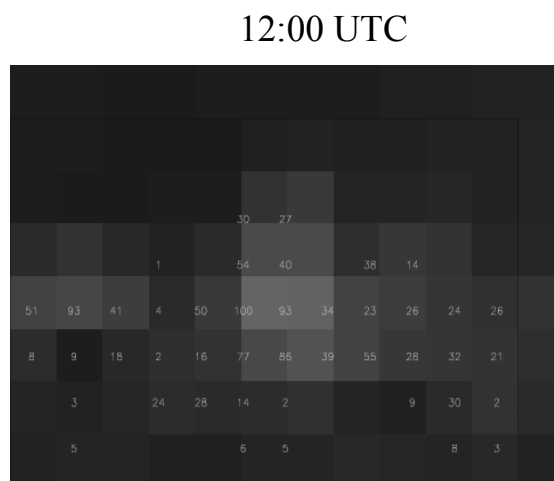
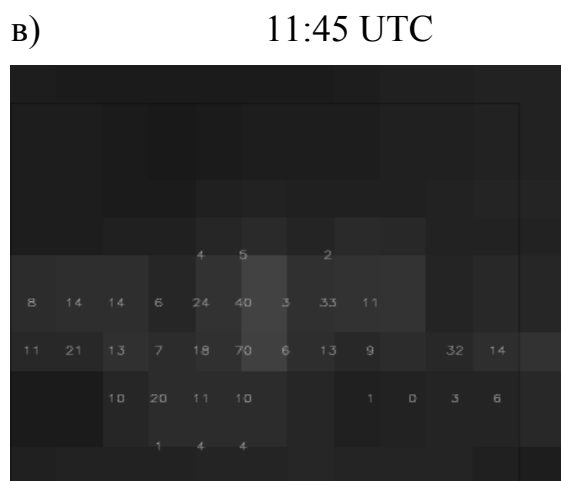
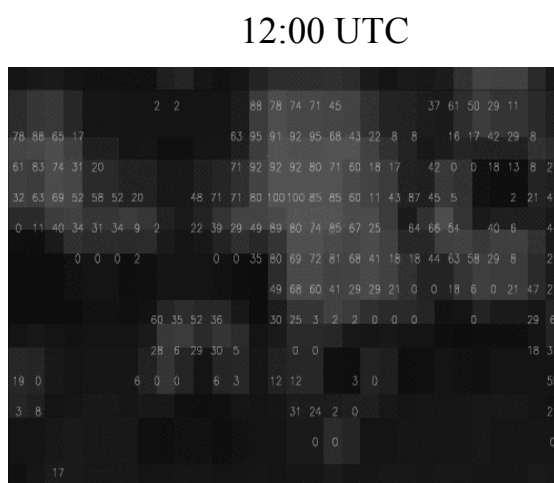
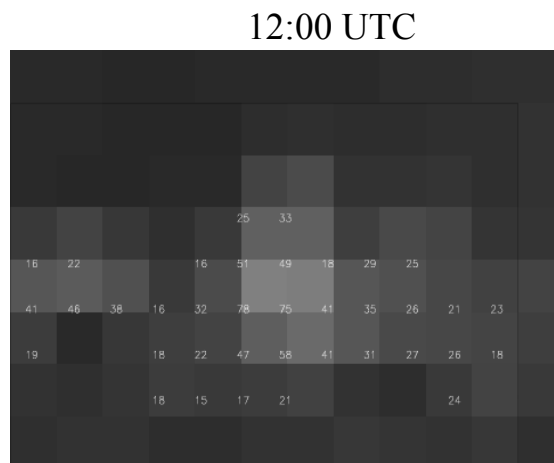


Рис. 5. Поля балла облачности конвективной системы II в 11:30 и 12:00 UTC 4 июля 2004: а) $N_{0.6}$; б) N_{HR} ; в) N_{HR_L}

Анализ полей яркостной температуры верхней границы облачности

Анализ полей радиационной температуры (T_{cN_HR} и T_{cN_06}) показал большое различие в оценке минимальной температуры на верхней границе облачности. В 11:15 UTC эта температура на верхней границы облачности конвективной системы I была $T_{cN_HR} = -23^{\circ}\text{C}$ и $T_{cN_06} = -46^{\circ}\text{C}$ (рис. 6). По нашему убеждению, более реалистичной является значение -23°C , потому что система RDT обнаружила это конвективное образование 15 минутами позже и зафиксировала такую же минимальную температуру -46°C . Маловероятно, чтобы за это время облако не развивалось и температура на верхней границе оставалась постоянной. Достаточно низкие нереалистические значения T_{cN_06} в 11:45, 12:00 UTC говорят о том, что значения $N_{0.6}$ недооценивают действительное поле балла облачности, что приводит к очень низким значениям радиационной температуры на верхней границе облачности.

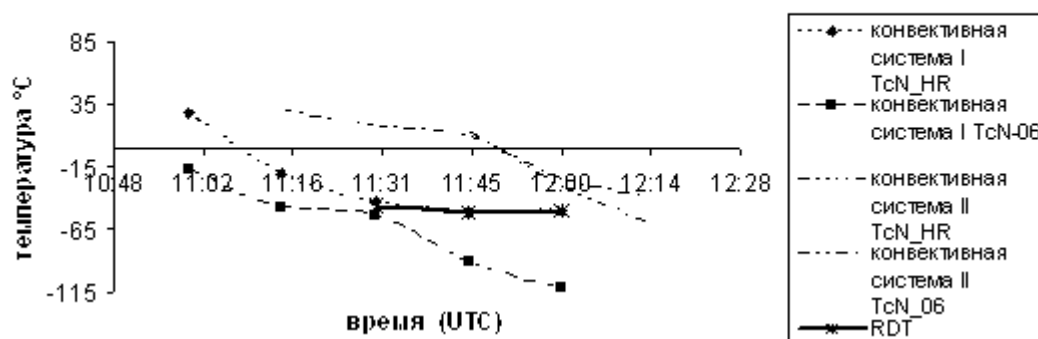


Рис. 6. Динамика изменения минимальной радиационной температуры верхней границы облачности конвективных систем I, II 4 июля 2004 года

Для конвективной системы II наблюдается та же тенденция (см. рис. 6): значения T_{cN_HR} выше, чем T_{cN_06} . Данная система более интересна, чем I, потому что состоит из очень небольших облачных образований, что не позволяет обнаружить их системе RDT в начальный период их развития. Полученные оценки минимальных значений T_{cN_HR} показывают, что они изменялись с 13°C в 11:30 UTC до -39°C в 12:15 UTC, за 15 минут до того, как это образование было обнаружено системой RDT, в 12:00 UTC, минимальное значение T_{cN_HR} составляло -25°C . Более того, четыре облачных

пикселя имели температуру на верхней границе облачности меньше 0°C , в то время как в IR10.8 канале только у одного пикселя значение T_{cN_06} было меньше 0°C .

Выводы

Данная работа показала, что поле балла облачности, полученное по данным канала HRVIS может служить дополнительной характеристикой для определения на спутниковых данных интенсивно развивающейся конвективной облачности. Поле радиационной температуры с учетом коррекции на балл облачности показывает достаточно реалистические значения и позволяет увеличить заблаговременность определения зон развития интенсивной конвективной облачности на 15-30 минут по сравнению с системой RDT.

* *

Розглянуто результати та описано схему практичної реалізації алгоритмів визначення яскравісної температури на верхній межі хмарності, розміри якої менші від одиничного елемента зображення (пікселя). Показано, що високі значення ступеня покриття (балу) хмарністю N мають пікселі зображення з низькими значеннями радіаційної температури на верхній межі хмарності. Використання N для корекції радіаційної температури дозволяє одержати правдоподібне поле радіаційної температури та збільшити завчасність попередження її появи.

* *

1. *Кривобок О.* Monitoring characteristics of young convective clouds for RDT product using MSG data, Visiting Scientist Report, SAF/NWC/IOP/MFT/SCI/RP/02, 2005.– 49 p.
2. *Кривобок А.А.* Восстановление температуры верхней границы облачности по данным геостационарного спутника MSG. Ч. I: Теоретические основы определения температуры верхней границы облачности, размеры которой меньше размеров пикселя // Вісн. Одес. держ. екол. ун-ту. – 2007. – Вип. 4. – С. 164-171.
3. Validation report for the PGE11 of the SAFNWC/MTP (SAF/NWC/IOP/MFT/SCI/VAL-01).

4. *Hervé Le Gléau, Marcel Derrien.* Validation Report for the PGE01-02-03 of the SAFNWC/MSG, SAF/NWC/IOP/MFL/SCI/VAL/01, 2005. – 87 p.
5. *Gutman G., Tarpley D., Ignatov A. and Olson S.* The enhanced NOAA global land dataset from the Advanced Very High Resolution Radiometer, Bulletin of the American Society, 1995. – 76 (7). – P. 1141-1156.
6. *Oort A.H.* Global atmospheric circulation statistics, 1958-1973. NOAA professional Paper, 1983. – № 14.

*Украинский научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, Киев*