

А.А. Кривобок

К ВОПРОСУ О ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БАЛЛА ОБЛАЧНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ ОБЛАКА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Рассмотрены относительные ошибки определения балла облачности (N) и температуры на верхней границе облачности по спутниковым данным. Показано, что относительная ошибка определения радиационной температуры на верхней границе облачности может быть не меньше ошибки определения балла облачности. В свою очередь, ошибка определения балла облачности увеличивается с уменьшением значений N и увеличением альbedo подстилающей поверхности. Показано, что для значений N, менее 0.5, ошибка может достигать 30%.

Введение

Наличие на борту геостационарного спутника MSG видимого канала высокого пространственного разрешения HRVIS (центральная спектральная полоса канала 0.75 мкм, пространственное разрешение в подспутниковой точке 1×1 км) позволяет существенно улучшить существующие методы определения районов интенсивного конвективного развития облачности. Большинство современных методов определения этих районов на спутниковых изображениях основаны на анализе абсолютных значений и динамике изменения радиационной температуры на верхней границе облачности [1]. Однако из-за низкого пространственного разрешения инфракрасного канала IR10.8 (центральная спектральная полоса канала 10.8 мкм, пространственное разрешение в подспутниковой точке 3×3 км), по которому определяются значения радиационной температуры, является проблематичным раннее обнаружение зарождающейся и быстро развивающейся конвективной облачности в том случае, когда процесс его развития составляет менее часа. Дело в том, что в момент зарождения кучевого облака его горизонтальные размеры меньше, чем пространственное разрешение пикселя (единичного элемента изображения) в инфракрасном канале данного спутника. В связи с этим измеряемая со спутника яркостная

температура пикселя, частично покрытого облачностью, существенно выше, чем реальная яркостная температура верхней границы облачности, что препятствует определению реальной температуры облака. В этом случае, упоминавшиеся данные канала HRVIS должны улучшить точность и заблаговременность его обнаружения. Общая идея и первые результаты по использованию данных канала HRVIS были изложены автором в [2]. Суть изложенного подхода заключалась в том, что за счет более высокого пространственного разрешения по данным канала HRVIS определяется параметр балла облачности (N), и далее при расчете значений температуры на верхней границе облачности (T_c) вводится поправка на значение N . Таким образом, по мнению автора, повышается точность определения температуры на верхней границе развивающегося облака, размеры которого меньше, чем размер пикселя спутникового изображения. Тем не менее, учитывая, что при расчете N и T_c используются некоторые расчетные параметры, в которых уже заложены ошибки определения, остается открытым вопрос о точности расчета вышеуказанных величин и, исходя из этого, о практической ценности предложенных методов. Данная работа посвящена анализу и интерпретации ошибок при определении N и T_c как с теоретической, так и с практической точек зрения.

Определение балла облачности и радиационной температуры по данным спутника MSG

Определение балла облачности по каналам в видимом диапазоне спектра

Интенсивность отраженного солнечного излучения (I_{vis}), измеряемого со спутника над пикселем изображения, частично покрытого облачностью в видимых каналах, может быть записана в следующем виде:

$$I_{vis} = N \times I_{cvis} + (1-N) \times I_{svis}, \quad (1)$$

где N – часть пикселя, покрытого облачностью; I_{cvis} – излучение, регистрируемое на спутнике от части пикселя, покрытого облачностью; I_{svis} – излучение, регистрируемое на спутнике от безоблачной части пикселя.

После процедуры калибровки спутниковых данных уравнение (1) может быть переписано в следующем виде:

$$R_{vis} = N \times R_{cvis} + (1-N) \times R_{svis} , \quad (2)$$

где R_{vis} – измеряемое альbedo; R_{cvis} – альbedo на верхней границе атмосферы (ВГА) от части пикселя, покрытого облачностью; R_{svis} – альbedo на ВГА от безоблачной части пикселя.

Из уравнения (2) N можно оценить, как:

$$N = \frac{R_{vis} - R_{svis}}{R_{cvis} - R_{svis}} . \quad (3)$$

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

Интенсивность инфракрасного излучения (I_{IR}), измеряемого со спутников над пикселем изображения, частично покрытого облачностью, может быть представлена в следующем виде:

$$I_{IR} = N \times I_{cIR} + (1-N) \times I_{sIR} , \quad (4)$$

где I_{cIR} – излучение, регистрируемое на спутнике от части пикселя, покрытого облачностью; I_{sIR} – излучение, регистрируемое на спутнике от безоблачной части пикселя.

В инфракрасном диапазоне длин волн яркостная температура практически линейно зависит от интенсивности излучения, поэтому уравнение (4) можно переписать, как:

$$T_{IR} = N \times T_{cIR} + (1-N) \times T_{sIR} , \quad (5)$$

где T_{cIR} – температура, регистрируемая на спутнике от части пикселя, покрытого облачностью; T_{sIR} – температура, регистрируемая на спутнике от безоблачной части пикселя.

Для нахождения T_{cIR} воспользуемся следующей формулой:

$$T_{cIR} = [T_{IR} - (1-N) \times T_{sIR}] / N . \quad (6)$$

Таким образом, температура верхней границы облачности, частично покрывающей пиксель изображения, зависит от температуры подстилающей поверхности T_{sIR} и от степени покрытия пикселя облачностью N .

Оценка относительной ошибки определения N и T_{cIR}

Оценка ошибки N

Чтобы оценить относительную ошибку определения N , воспользуемся общей теорией ошибок [3]. Считая, что N является функцией, а величины R_{cvis} , R_{vis} и R_{svis} ее аргументами, тогда, если ошибка измерения (R_{vis}) является незначительной, максимальная относительная ошибка (ε_N) определения N , вызванная неопределенностью в значениях R_{cvis} и R_{svis} , будет выглядеть следующим образом:

$$\varepsilon_N = \frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta R_{svis}}{R_{vis} - R_{svis}} + \frac{\Delta R_{cvis} + \Delta R_{svis}}{R_{cvis} - R_{svis}}, \quad (7)$$

где ΔR_{cvis} - абсолютная ошибка оценки R_{cvis} ; ΔR_{svis} - абсолютная ошибка оценки R_{svis} ; ΔN - абсолютная ошибка оценки N .

Анализ уравнения (7) показывает, что увеличение значений первого члена происходит за счет небольших значений разницы $R - R_{svis}$, которая наблюдается над районами с высокими значениями отражательных характеристик подстилающей поверхности и больших значений ΔR_{svis} . Увеличение значений второго члена в уравнении происходит за счет увеличения суммы $\Delta R_{cvis} + \Delta R_{svis}$ (как правило, это связано с переоценкой или недооценкой моделируемых значений R_{cvis} по отношению к наблюдаемым) и низким значением разницы $R_{cvis} - R_{svis}$ (случаи проведения измерений над районами с высокими значениями отражательных характеристик подстилающей поверхности).

Для проведения анализа зависимости изменения относительной ошибки ε_N от N нами были рассчитаны средние значения аргументов, входящих в формулу (7), и их абсолютные ошибки. Расчеты проводились для трех спектральных каналов в видимом диапазоне спектра спутника MSG – HRVIS, VIS0.6 и VIS0.8 над морской поверхностью и сушей с низкими и высокими значениями отражательных характеристик. Канал VIS0.8 использовался для исследования данной зависимости только над морской поверхностью в связи с тем, что по нему определялся балл облачности над этим типом поверхности. Для расчета реальных средних значений R_{svis} , ΔR_{svis} нами в соответствующих каналах MSG были отобраны безоблачные пиксели и по их значениям получены средние и абсолютные ошибки для каждого исследуемого типа подстилающей

поверхности. В табл. 1-4 представлены рассчитанные значения соответствующих параметров для оценки ε_N . Предполагалось, что абсолютная разница между рассчитанными и реальными значениями R_{cvis} составляет $\Delta R_{cvis} = 0.1$. Мы сознательно использовали высокие значения ΔR_{cvis} для того, чтобы оценить точность при самых неблагоприятных условиях. По нашим предположениям, среднее значение ΔR_{cvis} не должно превышать 0.05. Мы рассмотрели случай, когда значения R_{cvis} равнялись 0.8054, 0.8288, 0.8677 для соответственно VIS0.6, VIS0.8 и HRVIS каналов. Эти значения характерны для развитого конвективного облака и они рассчитывались с помощью теории переноса излучения с использованием определенной микрофизической модели и характерных вертикальных размеров конвективного облака [2].

Таблица 1

Средние значения R_{svis} над морской поверхностью и сушей

Тип поверхности	R_{svis}		
	VIS0.6	VIS0.8	HRVIS
Море	0.0353	0.0210	0.0512
Суша	0.1098	-	0.1541
Суша с высокими отражательными характеристиками	0.1834	-	0.2421

Таблица 2

Параметры для оценки ε_N над морской поверхностью

Параметры	Каналы MSG		
	VIS0.6	VIS0.8	HRVIS
ΔR_{svis}	0.0067	0.0041	0.0095
$R_{cvis} - R_{svis}$	0.7701	0.8078	0.8165

Таблица 3

Параметры для оценки ε_N над сушей

Параметры	Каналы MSG	
	VIS0.6	HRVIS
ΔR_{svis}	0.0097	0.0148
$R_{cvis} - R_{svis}$	0.6956	0.7136

На рис. 1-3 показаны зависимости ε_N от N над различными подстилающими поверхностями. Анализ результатов показывает, что мы должны ожидать меньшей ошибки в оценке балла облачности над подстилающей поверхностью с низкими отражательными характеристиками и в случае больших значений N . Для N меньше, чем 0.5 над земной поверхностью с высокими отражательными характеристиками, ε_N может достигать больше 0.3. Наименьшая ошибка ε_N наблюдается для VIS0.6 канала, за исключением морской поверхности, где данные канала VIS0.8 выглядят предпочтительней. Точность определения N по данным канала HRVIS является такой же, как и для канала VIS0.6 при значениях N больше 0.5.

Таблица 4

Параметры для оценки ε_N над земной поверхностью с большими значениями отражательных характеристик

Параметры	Каналы MSG	
	VIS0.6	HRVIS
ΔR_{svis}	0.0211	0.0241
$R_{cvis} - R_{svis}$	0.6220	0.6256

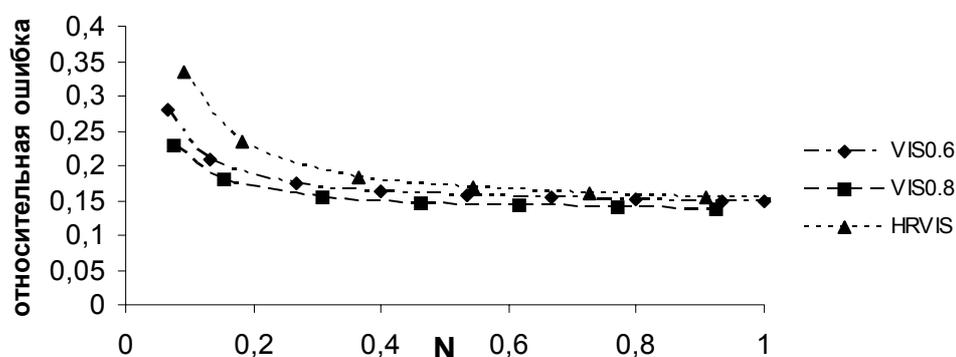


Рис. 1. Зависимость ε_N от N над морской поверхностью

Зависимость относительной ошибки от $\Delta R_{cvis} + \Delta R_{svis}$ показана на рис. 4-6. Данный результат получен в предположении, что разница в значениях $R_{cvis} - R_{svis}$ составляет 0.8, 0.7, 0.6 соответственно в каналах VIS0.6, VIS0.8 и HRVIS. Зависимость относительной ошибки от $\Delta R_{cvis} + \Delta R_{svis}$ показана на рис. 4-6. Данный результат получен в предположении, что разница в

значениях $R_{cvis} - R_{svis}$ составляет 0.8, 0.7, 0.6 соответственно в каналах VIS0.6, VIS0.8 и HRVIS.

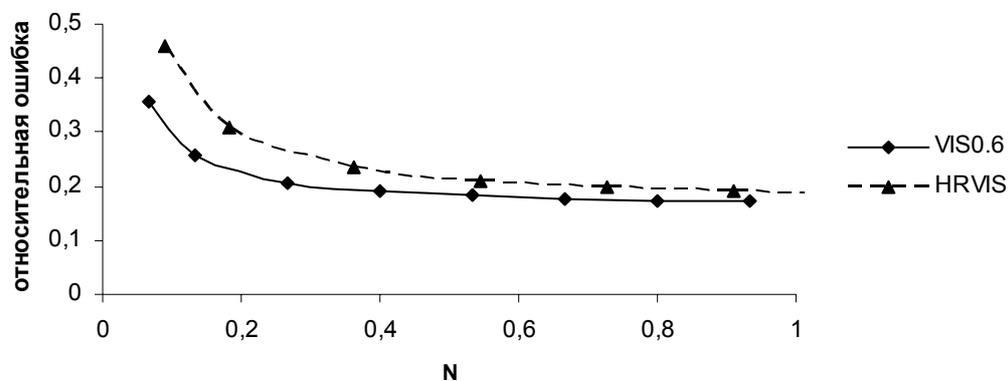


Рис. 2. Зависимость ε_N от N над земной поверхностью

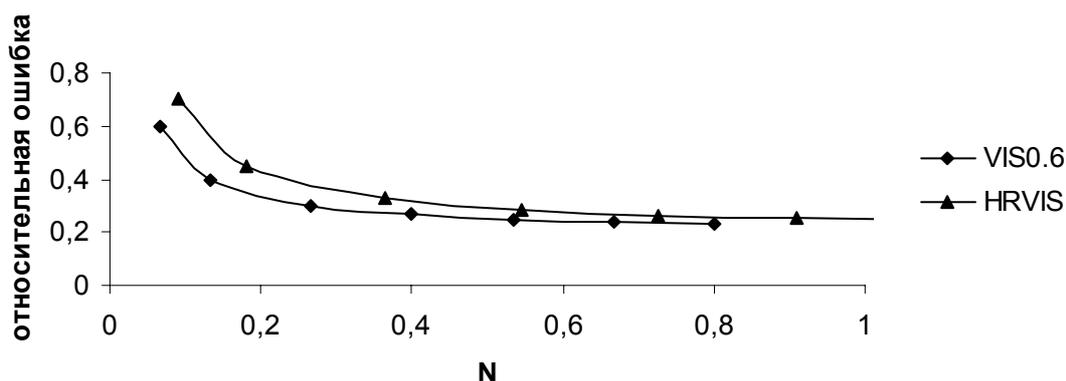


Рис. 3. Зависимость ε_N от N над земной поверхностью с высокими отражательными характеристиками

В основном полученные результаты характеризуют относительную ошибку, вызванную неопределенностью в расчете R_{cvis} , потому что значение ΔR_{cvis} гораздо больше, чем ΔR_{svis} во всех исследуемых каналах.

Для значения $\Delta R_{cvis} + \Delta R_{svis} = 0.06$, что является наиболее реальным над земной поверхностью, max относительная ошибка составляет 0.1 для N больше, чем 0.5 для всех исследуемых каналов. Для небольших значений N относительная ошибка увеличивается до 0.2÷0.5.

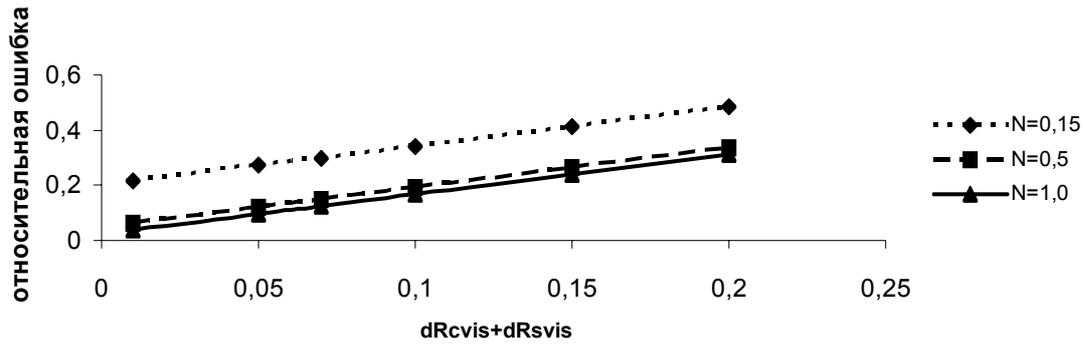


Рис. 4. Зависимость ε_N от $\Delta R_{cviss} + \Delta R_{sviss}$ для канала VIS0.6

Таким образом, зависимость ε_N от $R - R_{sviss}$ и $\Delta R_{cviss} + \Delta R_{sviss}$ показывает, что при значениях $N < 0.5$ мы должны ожидать в большей степени менее правдоподобные результаты, чем при $N > 0.5$.

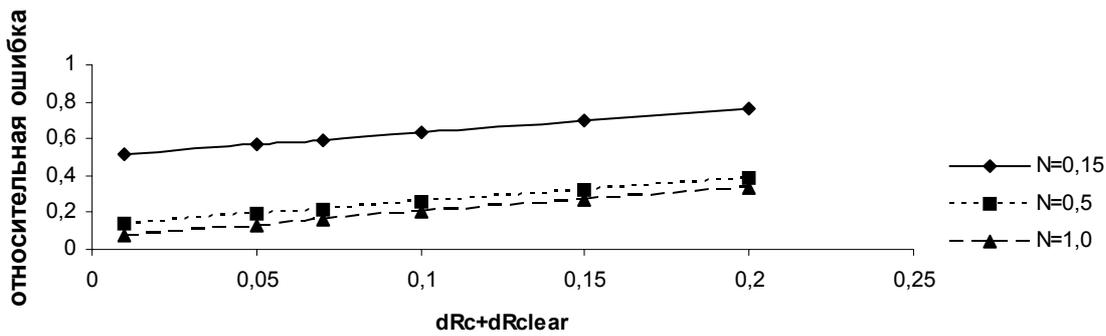


Рис. 5. Зависимость ошибки ε_N от $\Delta R_{cviss} + \Delta R_{sviss}$ для канала VIS0.8

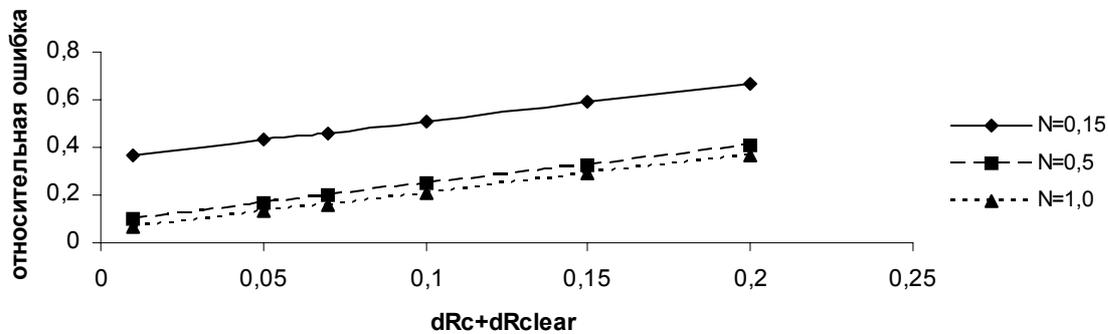


Рис. 6. Зависимость ошибки ε_N от $\Delta R_{cviss} + \Delta R_{sviss}$ для канала HRVIS

Ошибка оценки T_{cIR}

Максимальная относительная ошибка расчета $T_{cIR}(\varepsilon_T)$, обусловленная ошибками в определении T_s и T_{IR} (на основании уравнения (6)), считая, что ошибка измерений незначительна, выглядит следующим образом:

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta T_{cIR}}{T_{cIR}} = \left[\frac{T_{sIR} \Delta N}{T_{IR} - (1-N)T_{sIR}} + (N-1) \frac{\Delta T_{sIR}}{T_{IR} - (1-N)T_{sIR}} + \varepsilon_N \right]. \quad (8)$$

Анализ уравнения (8) показывает, что минимальные значения ε_T наблюдаются, когда N имеет большие значения, т.е. при $N = 1$ $\varepsilon_T \rightarrow \varepsilon_N$. Максимальные значения ε_T будут наблюдаться при небольших значениях N и определяются ε_N и ΔT_{sIR} . Таким образом, считая, что ΔT_{sIR} близка к ошибке измерений, так как предложенный алгоритм [2] нахождения T_{sIR} является достаточно надежным, относительная ошибка определения T_{cIR} зависит в большей степени от ε_N , особенно для случаев, когда $N > 0.5$.

Анализ полей балла облачности и температуры на верхней границе облачности

Анализ восстановленных значений балла облачности и температуры на верхней границе облачности мы провели на примере нескольких случаев интенсивно развивающихся конвективных облаков, зафиксированных спутником MSG 4 июля 2004 года над северным побережьем Африки. По схеме, подробно описанной в [2], были определены значения балла облачности и соответственно с учетом рассчитанных выше значений была восстановлена радиационная температура на верхней границе облаков в определенный момент их развития.

На рис. 7-8 приведены значения балла облачности, рассчитанные по формуле (3). В случае небольших разорванных облаков (конвективная система II, рис. 7) мы получили реальное поле балла облачности – неоднородное, с низкими значениями. Для большого развитого облака (конвективная система I, рис. 8) мы получили наибольшие значения в его центральной части, имеющей максимальные вертикальные размеры, и более низкие значения к краю облака, где наблюдаются пиксели, частично покрытые облачностью.

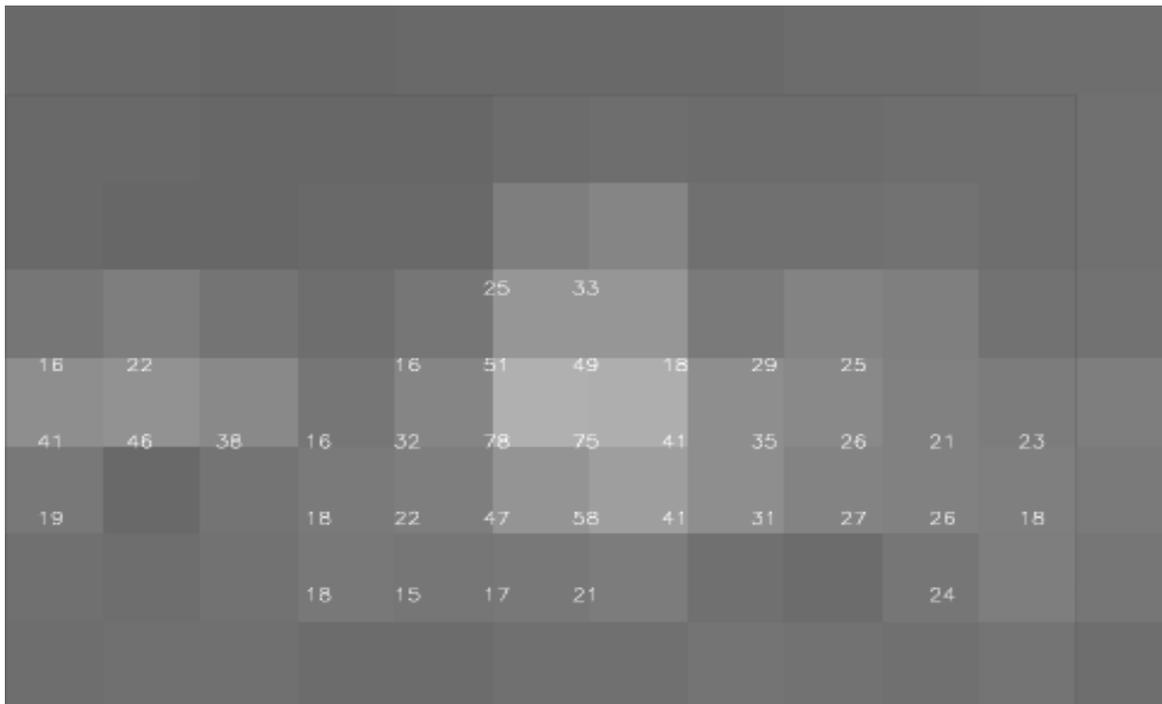


Рис. 7. Восстановленные значения балла облачности (в %) конвективной системы II по данным спутника MSG, 12:00 UTC, 4 июля 2004 года

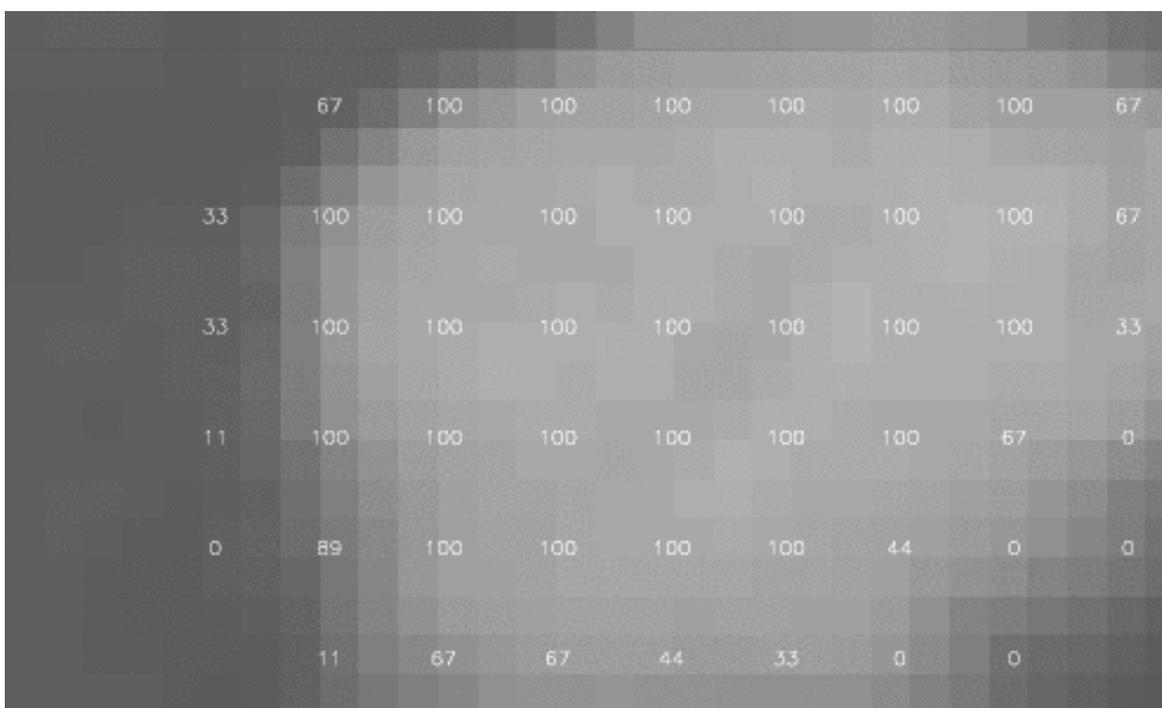


Рис. 8. Восстановленные значения балла облачности (в %) конвективной системы I по данным спутника MSG, 12:00 UTC, 4 июля 2004 года

Над таким облаком мы получили достаточно однородное поле балла облачности. На основании полученных результатов довольно сложно судить о количественных характеристиках точности восстановленных значений балла облачности. Поэтому мы дополнительно проанализировали поля радиационной температуры, полученные по этим данным (рис. 9-12) и оценили их правдоподобность. Проведенный анализ показал, что для конвективной системы I (рис. 9), на фоне температур на верхней границе облачности ($-45\dots-54^{\circ}\text{C}$), отмечены низкие не реалистичные значения ($-72^{\circ}\dots-81^{\circ}\text{C}$) по краям облака там, где наблюдаются пиксели, частично покрытые облачностью. На наш взгляд, это вызвано недооценкой действительного поля балла облачности N конвективной системы I. Как показано в предыдущей главе, при значениях балла облачности меньше 0.5 (50%) относительная ошибка увеличивается до 0.3 и более, что и наблюдается в данном случае. Значениям балла облачности 33% и 44% соответствуют значения радиационной температуры на верхней границе облака: -81°C , -79°C (нижняя часть изображения на рис. 9).

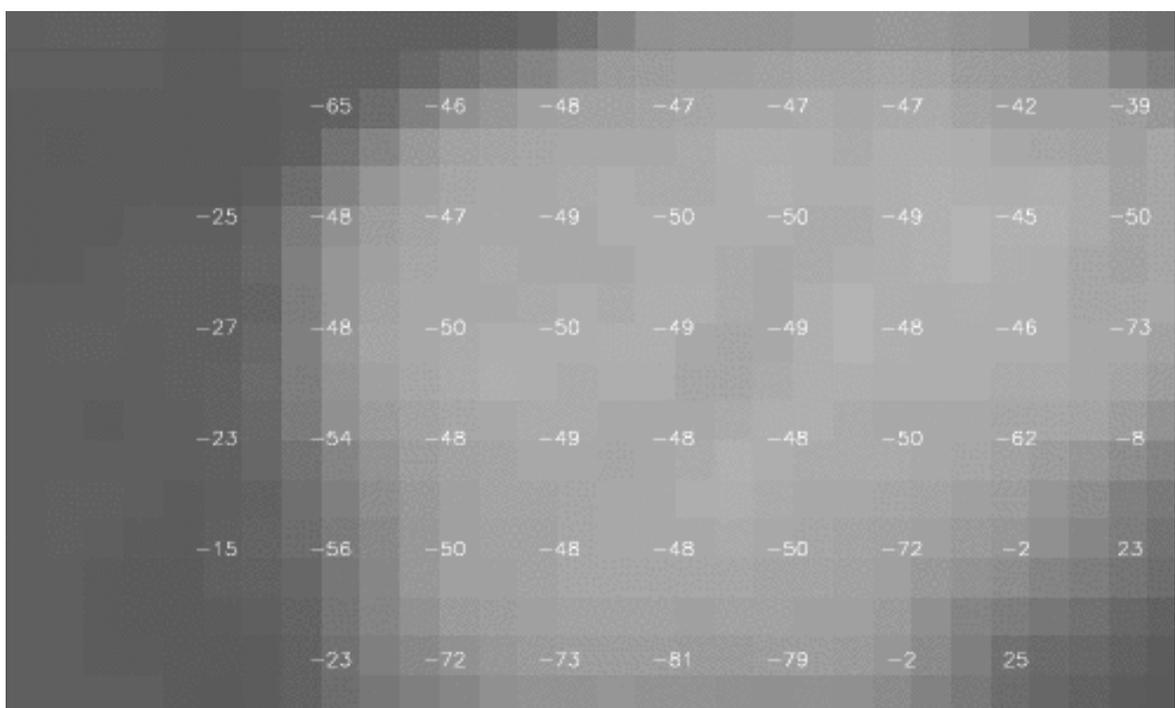


Рис. 9. Восстановленные значения радиационной температуры на верхней границе облачности конвективной системы I по данным спутника MSG, 12:00 UTC, 4 июля 2004 года

В то же время с правого края рассматриваемого облака, при тех же значениях облачности, отмечаются более высокие значения температуры (-15...-25°C), которые, по всей видимости, характеризуют облачность более низкого уровня.

Анализ поля радиационных температур конвективной системы II (рис. 12) показал, что оно является неоднородным, с температурами на верхней границе облачности от -16°C до 27°C, что соответствует облачности нижнего и среднего уровня. Для оценки реалистичности полученных результатов мы проанализировали данные радиационной температуры, полученные 15 и 30 минутами раньше (рис. 10-11) и оценили динамику изменения минимальной температуры на верхней границе облачности (рис. 13).

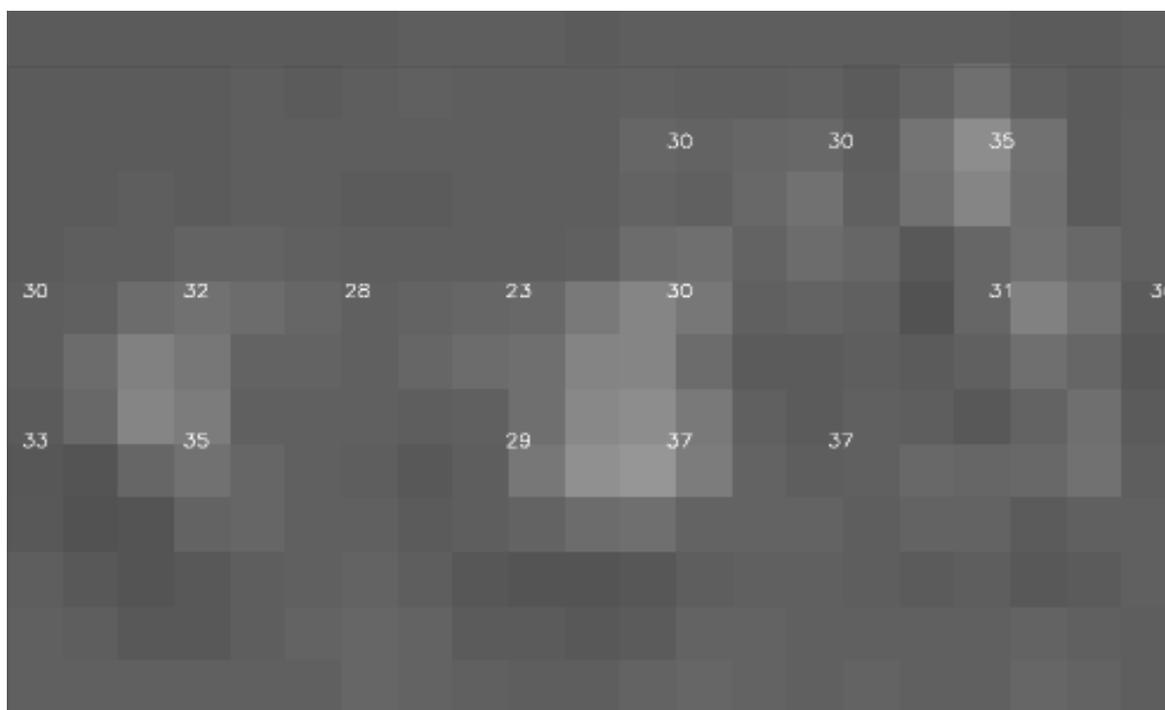


Рис. 10. Восстановленные значения радиационной температуры на верхней границе облачности конвективной системы II по данным спутника MSG, 11:30 UTC, 4 июля 2004 года

Полученные результаты показали, что в момент зарождения облака (рис. 10) температура составляла 23°C. Этой температуре соответствовал один облачный пиксель на изображении. В последующие 15 минут (рис. 11) наблюдается понижение температуры верхней границы облачности и образуются новые облачные пиксели с температурой в диапазоне 9°C

...20°C. Все это достаточно хорошо согласуется с результатами самолетных измерений [4], где указывалось, что скорость горизонтального расширения вершин Сб составляет 1-2 км/мин. С учетом пространственного разрешения спутника и количества облачных пикселей за 30 минут такое расширение, в данном случае, составило около 60 км, что очень близко к реальным данным.

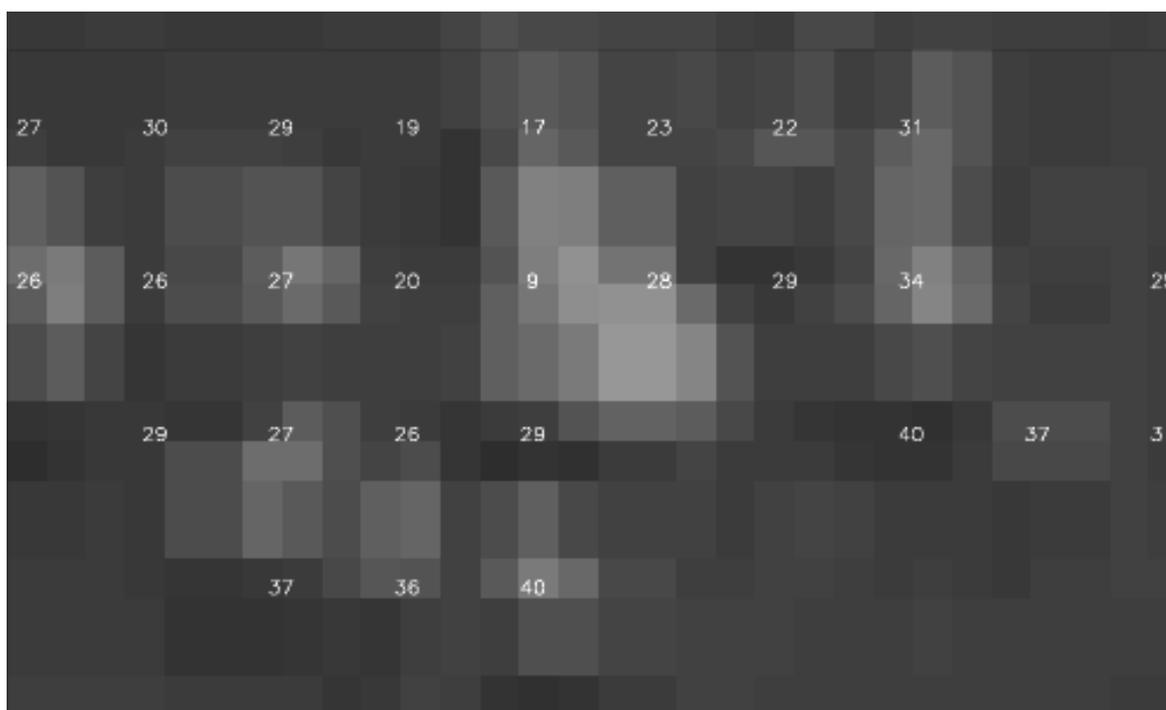


Рис. 11. Восстановленные значения радиационной температуры на верхней границе облачности конвективной системы П по данным спутника MSG, 11:45 UTC, 4 июля 2004 года

При исследовании реалистичности динамики понижения температуры верхней границы облачности мы исходили из того факта, что по результатам фотограмметрических измерений [4] было показано, что вертикальный рост вершин конвективных облаков составляет в среднем 2-3 м/с и, следовательно, за каждые 15 минут рост облака составляет около 2-3 км, что соответствует понижению температуры верхней границы на 20°C...25°C. На рис. 13 показана динамика изменения минимальной температуры на верхней границе облачности, полученная с помощью формулы (6) и непосредственно по данным измерений.

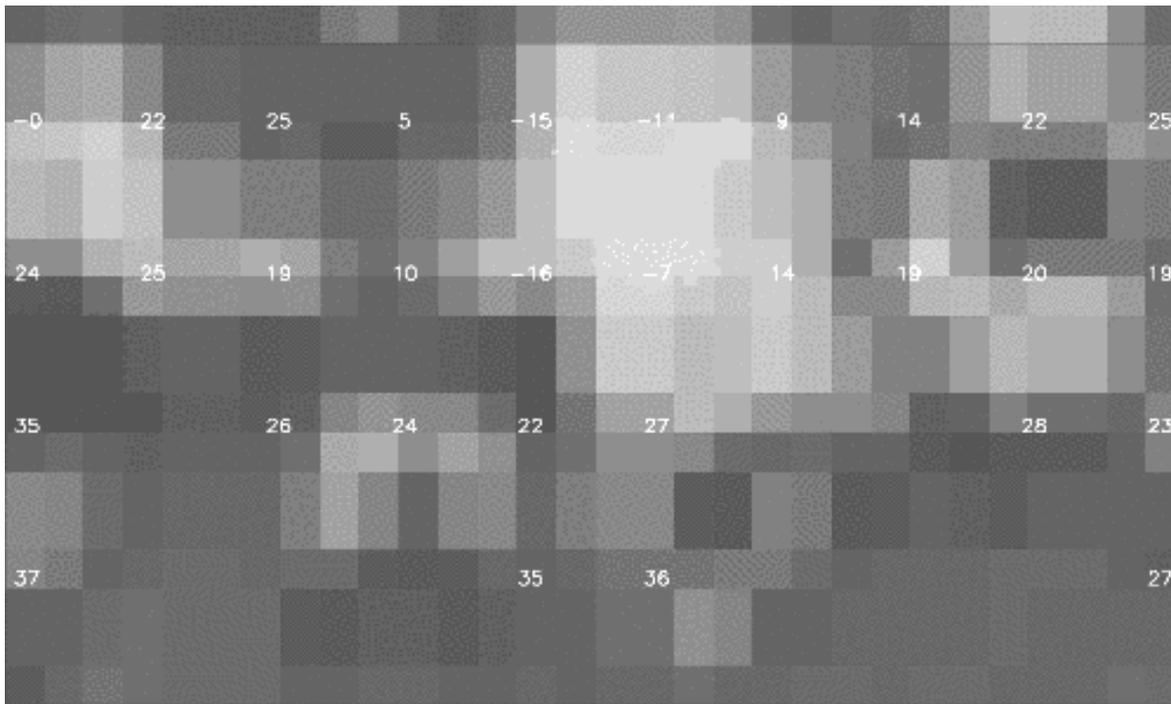


Рис. 12. Восстановленные значения радиационной температуры на верхней границе облачности конвективной системы II по данным спутника MSG, 12:00 UTC, 4 июля 2004 года

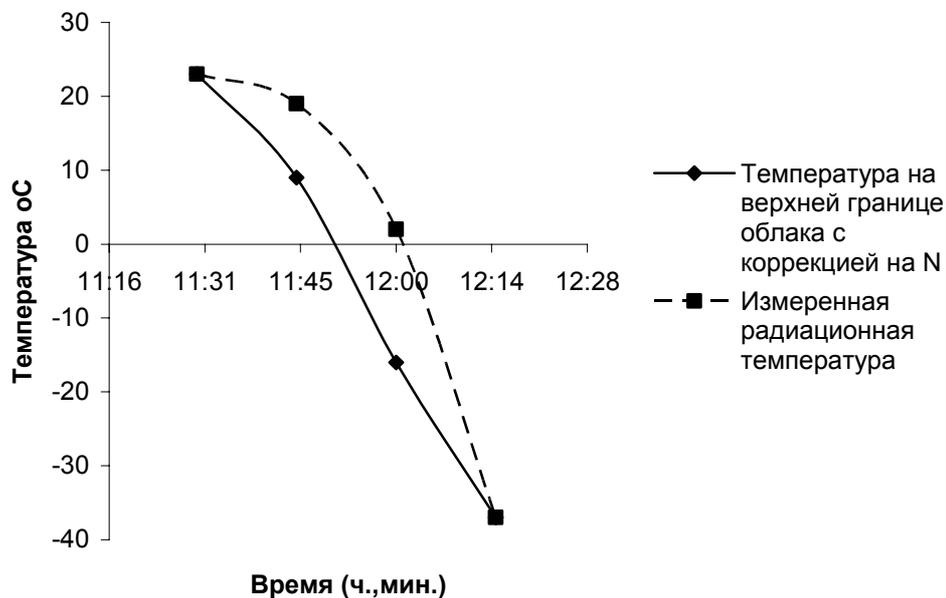


Рис. 13. Динамика изменения минимальной температуры на верхней границе облачности по данным спутника MSG

Полученный 15-ти минутный градиент изменения расчетных значений температуры находится в пределах $14^{\circ}\text{C} \dots 25^{\circ}\text{C}$ в то время, как градиент

измеренной температуры значительно превосходит реальный и достигает 39°C. Таким образом, предложенный метод расчета температуры верхней границы развивающегося конвективного облака с учетом N (2.2) восстанавливает более реалистичное поле радиационных температур, чем непосредственно измеренное.

Выводы

В данной работе проанализированы возможные максимальные относительные ошибки определения балла облачности и температуры на верхней границе облачности.

Анализ результатов показал, что мы должны ожидать меньшей ошибки в оценке балла облачности над подстилающей поверхностью с низкими отражательными характеристиками и в случае больших значений N . Для N меньше, чем 0.5 над земной поверхностью с высокими отражательными характеристиками, \max относительная ошибка может достигать больше 0.3. Наименьшая \max ошибка ε_N наблюдается для VIS0.6 канала, за исключением морской поверхности, где данные канала VIS0.8 выглядят предпочтительней. Точность определения N по данным канала HRVIS является такой же, как и для канала VIS0.6 при значениях N больше 0.5.

Минимальные значения \max относительной ошибки определения температуры на верхней границе облачности ε_T наблюдаются, когда N имеет большие значения, при $N = 1$ $\varepsilon_T \rightarrow \varepsilon_N$. Максимальные значения ε_T будут наблюдаться при небольших значениях N и определяются ε_N и абсолютной ошибкой определения температуры подстилающей поверхности (ΔT_{sIR}). Таким образом, считая, что ΔT_{sIR} близка к ошибке измерений, относительная ошибка определения T_c зависит в большей степени от ε_N , особенно для случаев, когда $N > 0.5$.

Анализ восстановленных значений балла облачности по реальным спутниковым данным показал, что предложенный метод качественно описывает реальное поле облачности как для большого облачного образования, так и для разорванных мелких конвективных облаков.

Проведенный анализ восстановленных значений температуры на верхней границе облачности по спутниковым данным показал, что используемый метод занижает значения радиационной температуры по краям развитого большого конвективного облака. В то же время для небольших по размерам облачных образований полученные значения

радиационной температуры являются правдоподобными и более реальными, чем непосредственно измеренные.

* *

За супутниковими даними розглянуто відносні похибки визначення балу хмарності (N) та температури на верхній межі хмар. Показано, що відносна похибка визначення температури на верхній межі хмар може бути не меншою від похибки визначення балу хмарності. В свою чергу, похибка визначення балу хмарності збільшується зі зменшенням значень N та збільшенням альbedo підстильної поверхні. Показано, що при значеннях N , менших від 0.5, похибка може досягати 30%.

* *

1. Validation report for the PGE11 of the SAFNWC/MTP (SAF/NWC/IOP/MFT/SCI/VAL-01), Meteo-France, 2004. – 124 p.
2. *Kryvobok O.* 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.
3. *Яковлев К.П.* Математическая обработка результатов измерений. – М.: Гостехиздат, 1950. – 388 с.
4. *Шметер С.М.* Термодинамика и физика конвективных облаков. – М.: Гидрометеоиздат, 1987. – 288 с.

*Український науково-дослідницький
гідрометеорологічний інститут, Київ*