

Оценка метеорологических параметров в облачности по спутниковым снимкам

М.В. Бухаров ¹, В.И. Соловьев ¹, А.А. Алексеева ², В.М. Лосев ²

¹ГУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»
123242 Москва, Б.Предтеченский пер., 7
E-mail: bukharov@planet.iitp.ru

²ГУ «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации»
123242 Москва, Б.Предтеченский пер., 9-13
E-mail: alekseeva@mecom.ru

Рассмотрен новый подход к оценке метеорологических параметров в облачности по снимкам ИК-диапазона, получаемым с геостационарных ИСЗ. Он основан на комплексном учете значений радиационной температуры, измеряемой на верхней границе облачности, и специализированной прогностической информации для нижнего слоя атмосферы. Применение этого подхода к данным ИСЗ Meteosat-7 показало, что результаты диагноза летних осадков и гроз не противоречат аналогичному диагнозу, проводимому по информации с ИСЗ NOAA-16.

Введение

Оперативное использование спутниковой метеорологической информации до настоящего времени в основном базируется на интерпретации снимков облачности, осуществляемой визуально экспертами-метеорологами. Между тем все возрастающее количество снимков, поступающих с геостационарных и полярно-орбитальных метеорологических спутников, делает чрезвычайно актуальной задачу создания комплекса методов, которые обеспечат автоматическое распознавание атмосферных явлений в облачности и количественную оценку их интенсивности.

Создание такой системы оказалось возможным на основе комплекса новых методов автоматизированного количественного анализа спутниковой информации, разработанных специалистами НИЦ «Планета» и Гидрометцентра России. Первоначально эти методы были применены к информации, поступающей с полярно-орбитального спутника NOAA-16. В результате, уже с 2004 г. в НИЦ «Планета» начат оперативный выпуск и верификация спутниковых карт таких метеорологических параметров, как средняя и максимальная интенсивность осадков, их фаза, интенсивность гроз и др. [1, 2].

К настоящему времени завершен этап создания новых методов обработки снимков облачности, поступающих с геостационарных ИСЗ [3]. Опытная реализация этих методов, проведенная в НИЦ «Планета» летом 2005 г. на информации с геостационарного ИСЗ Meteosat-7, показала, что дополнительный учет специализированной прогностической информации позволяет по снимкам ИК-диапазона удовлетворительно оценивать значения не только интенсивности осадков и гроз, но и ряда других метеорологических параметров.

Учитывая новизну разработанного подхода, целью работы является рассмотрение методических вопросов диагноза осадков и гроз по информации с геостационарных ИСЗ, а также иллюстрация непротиворечивости с аналогичными результатами, получаемыми по информации с полярно-орбитальных спутников NOAA.

Методические вопросы диагноза осадков и гроз

Проведение непрерывного круглосуточного мониторинга осадков и гроз основано на использовании значений интенсивности уходящего теплового излучения облачности, регистрируемого с геостационарных ИСЗ в ИК-диапазоне 10-12 мкм. Снимки облачности имеют наивысшее пространственное разрешение в

подспутниковой точке (в ИК-диапазоне у ИСЗ Meteosat-7 оно составляет примерно 5 км). В умеренных широтах и при приближении к краю видимого диска Земли пространственное разрешение снимков заметно ухудшается. При этом элемент разрешения принимает форму эллипса, большая ось которого при удалении от подспутниковой точки возрастает до 15-30 км.

Коррекция спутниковых данных

При наблюдении облачности с геостационарных спутников вблизи края видимого диска Земли наблюдается известное «лимбовое потемнение» снимков ИК-диапазона. Причиной этого является увеличенная длина пути ИК-излучения через верхние более холодные, но немного поглощающие (что и дает потемнение), слои атмосферы. Величину лимбового потемнения можно определить, если сравнить синхронные снимки, получаемые (в одинаковых спектральных диапазонах) с геостационарных и полярно-орбитальных ИСЗ серии NOAA. Для этого на снимках NOAA выбирают участки с облачностью, тепловое излучение которой поступает на ИСЗ с направления в надир, т.е. при минимальном зенитном угле, под которым со спутника виден конкретный участок облачного покрова.

С целью максимального использования алгоритмов восстановления метеорологических параметров, ранее разработанных для радиометров полярно-орбитального ИСЗ NOAA-16 [1, 2], введен специальный расчетный параметр – приведенная радиационная температура (T_p) облачности. Причем, значение T_p рассчитывается таким образом, чтобы оно как можно меньше зависело от зенитного угла.

Обобщенное выражение для значений приведенной радиационной температуры облачности на снимках ИК-диапазона, поступающих с ИСЗ Meteosat-7, можно представить в виде:

$$T_p \cong T_{рк} - \delta T_p(\Theta), \quad (1)$$

где $T_{рк}$ – значение радиационной температуры облачности на снимках после их абсолютной калибровки; $\delta T_p(\Theta)$ – расхождение между абсолютными значениями радиационной температуры одних и тех же участков облачности, одновременно измеренными с помощью одинаковых спектральных каналов ИК-диапазона с геостационарного (при зенитном угле Θ) и полярно-орбитального (при $\Theta \sim 0^\circ$) спутников.

Оценка метеорологических параметров

Используя значение T_p , которое практически не зависит от зенитного угла наблюдения, для оценки первого из рассчитываемых параметров – максимальной высоты верхней границы облачности ($H_{вг}$), воспользуемся следующим соотношением [1, 2]:

$$H_{вг} \cong C_{1H}(T_0) * T_p, \quad (2)$$

где C_{1H} - эмпирический коэффициент, величина которого зависит от температуры воздуха у земли T_0 .

Значение температуры воздуха на момент каждой спутниковой съемки можно оценить по ее прогнозу, рассчитываемому для этой же территории, например, по специальной версии региональной модели численного краткосрочного прогноза погоды [4].

Следует отметить, что $H_{вг}$, рассчитываемая по формуле (2), позволяет определить высоту только самых верхних слоев облачного покрова. В районах изолированных кучево-дождевых (Сб) облаков летнего периода $H_{вг}$ обычно соответствуют их максимальной высоте. Однако в районах атмосферных фронтов и циклонов, облачность часто имеет сложную вертикальную структуру. В таких случаях съемка в ИК-диапазоне обеспечивает регистрацию теплового излучения преимущественно самой высокой перисто-слоистой облачности (Cs), которая маскирует возможность наблюдения под ней более низкой слоисто-дождевой (Ns) облачности. Учитывая это, введем дополнительный параметр - эффективная высота верхней границы осадкообразующей облачности ($H_{эф}$) [3]:

$$H_{эф} \cong C_{2H}(\nabla T_0, dT_7, T_p, \Delta T_p) * H_{вг}, \quad (3)$$

где C_{2H} - эмпирический коэффициент, величина которого зависит от максимального значения горизонтального градиента (∇T_0) приземной температуры воздуха в анализируемом районе, дефицита точки росы на уровне 700 гПа (dT_7), приведенной радиационной температуры и ее лапласиана (ΔT_r).

Из соотношения (3) видно, что величина Нэф совпадает с Нвго только при распознавании кучево-дождевой облачности (для нее $C_{2H} = 1$). При значениях параметров ∇T_0 и dT_7 , соответствующих N_s или отсутствию осадкообразующей облачности, величина Нэф оказывается существенно меньше Нвго. Вследствие этого применение Нэф в последующих вычислениях оказывается более корректным, чем Нвго.

Учитывая соотношения (1)-(3), а также взаимосвязи, представленные в работах [1-3], оценку максимальной скорости вертикальной восходящих движений, средней и максимальной интенсивности осадков и гроз по снимкам с геостационарных спутников проведем следующим образом:

$$Wm \cong C_w(T_0) * H\phi^2, \quad (4)$$

$$Imed \cong C_{11} * Wm^2 * F_1(T_r, \gamma, P, Wm), \quad (5)$$

$$Imax \cong C_{12} * Wm * F_1(T_r, \gamma, P, Wm), \quad (6)$$

$$G = G_0(H\phi) * F_2(T_r, Dmax, Imed), \quad (7)$$

где Wm - максимальная скорость вертикальных восходящих движений в облачности; $Imed$, $Imax$ - среднее и максимальное значения интенсивности осадков; G - интенсивность гроз; C_w , C_{11} и C_{12} - эмпирические коэффициенты, причем, значение C_w зависит от температуры воздуха у земли; γ - средний вертикальный градиент температуры воздуха в слое от земли до верхней границы облачности; P - вероятность осадков; $Dmax$ - максимальный диаметр градин в кучево-дождевой облачности; F_1 и F_2 - дискриминантные функции наличия ($F_1 = F_2 = 1$) и отсутствия ($F_1 = F_2 = 0$) осадков и гроз.

При этом значения γ и $Dmax$ рассчитываются аналогично [1-3], а значение вероятности ливневых осадков из кучево-дождевой облачности можно оценить по различию между T_r и ее минимальным значением в ближайшей окрестности.

Как показало сравнение с данными наземных и спутниковых наблюдений, разработанная первая версия методики диагноза по снимкам с ИСЗ *Meteosat-7* позволила на качественном уровне в основном правильно распознавать районы, в пределах которых отмечались осадки и грозы. При этом пространственная и временная детальность районов с осадками и грозами, которые диагностировалось по данным с ИСЗ *Meteosat-7*, оказалась существенно выше, чем у *NOAA-16* и у сравнительно редкой сети наземных метеорологических наблюдений.

Для иллюстрации результатов, получаемых при оценке параметров осадков и гроз по информации с ИСЗ *Meteosat-7* и *NOAA-16*, сравним конкретные примеры спутникового диагноза. При вычислении метеорологических параметров по данным *NOAA-16*, приведенный размер элементов обзора (пикселей) поверхности радиометрами ИК и микроволнового диапазонов принимался одинаковым и изменялся от 24 км в надире до 40x60 км*км на краях учитываемой ширины полосы обзора земной поверхности. Пиксели, размер которых превышал 40*60 км*км, исключались из рассмотрения.

Пример соотношений между параметрами при диагнозе с разных спутников

Обратимся к ситуации, которая наблюдалась в дневное время 14 июня 2005 г., когда на картах приземного анализа погоды на европейской территории России (ЕТР) отмечены атмосферные фронты в малоградиентном барическом поле. В атмосфере также имелись области пониженного давления и значительная неустойчивость теплой и влажной воздушной массы.

Координаты зон осадков и гроз, диагностированных по почти синхронным спутниковым снимкам с ИСЗ *NOAA-16* и *Meteosat-7*, представлены на рис.1.

Из сравнения рис.1а и рис.1б видно, что географическое положение зон осадков, диагностированных по разным спутниковым снимкам, в большинстве случаев совпадает. Размеры отдельных зон, диагностированных по данным ИСЗ *Meteosat-7*, заметно меньше, а их количество примерно в 10 раз

больше, чем по NOAA-16. Наличие осадков в этих районах частично подтверждено и результатами наземных измерений, проведенными в период между стандартными синоптическими сроками 09 и 12 ч МСВ. Причем, по данным ИСЗ Meteosat-7 (рис.1б) дополнительно диагностированы не только локальные зоны конвективных осадков, но и сравнительно большое скопление очагов с осадками в районе с координатами 47-52° в.д. и 50-54° с.ш.

Аналогичное соответствие можно видеть и для гроз (см. рис.1в и рис.1г). При этом количество диагностированных очагов с грозами существенно меньше, чем с осадками (рис.1а, б), а в отдельных случаях они отмечены и при отсутствии осадков. Наличие гроз в этих районах не противоречит результатам ближайших наземных и радиолокационных наблюдений.

Соотношения между рассчитанными значениями ряда параметров, представлены на рис.2. При вычислениях учтено, что пространственная детальность информации радиометров ИСЗ NOAA-16 примерно в 4 раза грубее, чем у Meteosat-7, и время проведения съемок немного различается. Поэтому каждому значению параметра, рассчитываемого по данным ИСЗ NOAA-16, ставилось в соответствие несколько ближайших (в окрестности $\pm 0.2^\circ$ по широте и долготе) значений того же параметра, рассчитываемого по данным ИСЗ Meteosat-7.

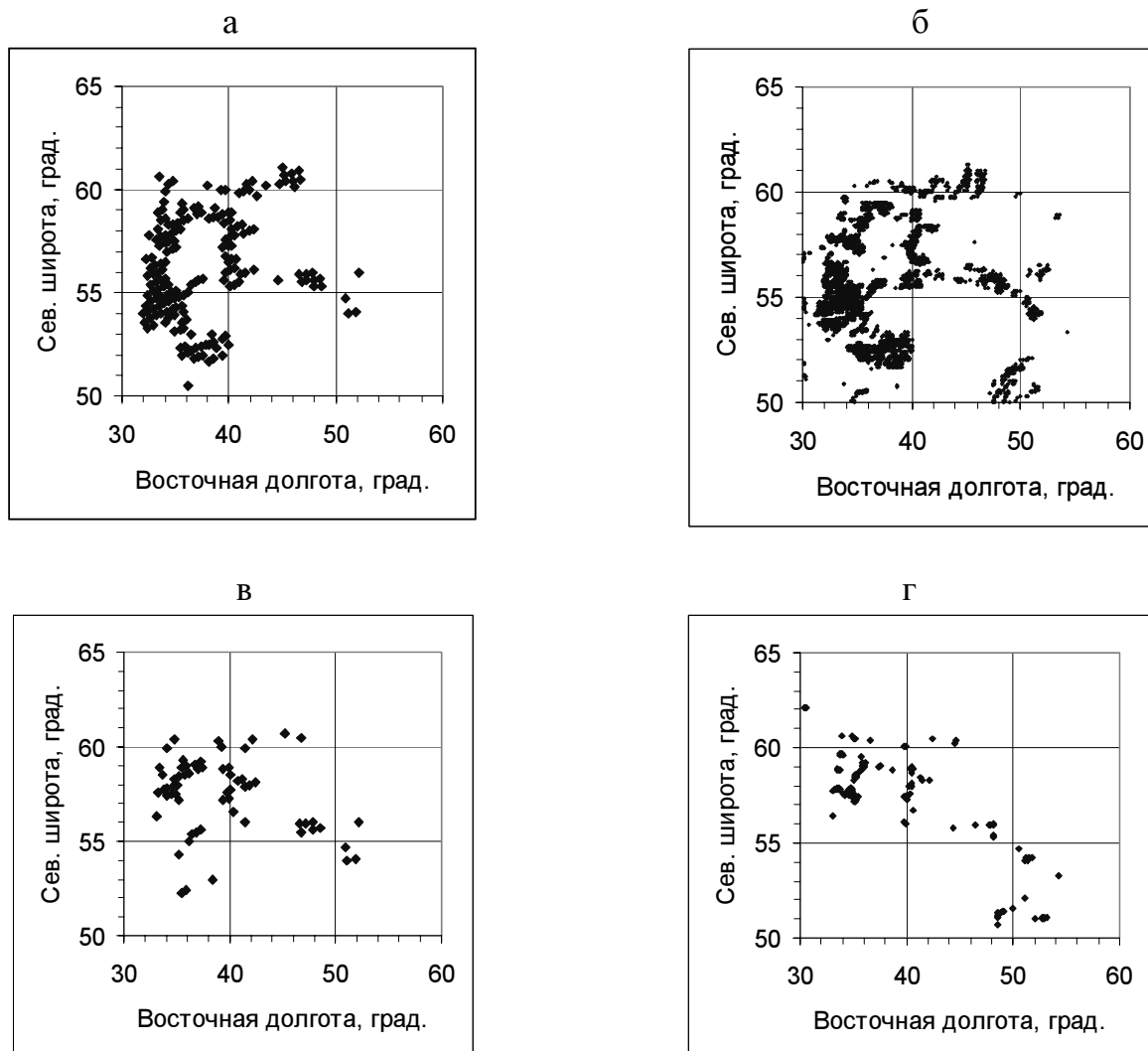


Рис.1. Координаты зон с осадками (а, б) и грозами (в, г), диагностированными по данным радиометров ИСЗ NOAA-16 (а, в) и Meteosat-7 (б, г).
Спутниковая съемка проведена 14 июня 2005 г. в 10 ч 56 мин (Meteosat-7) и в 11 ч 09 мин (NOAA-16) МСВ

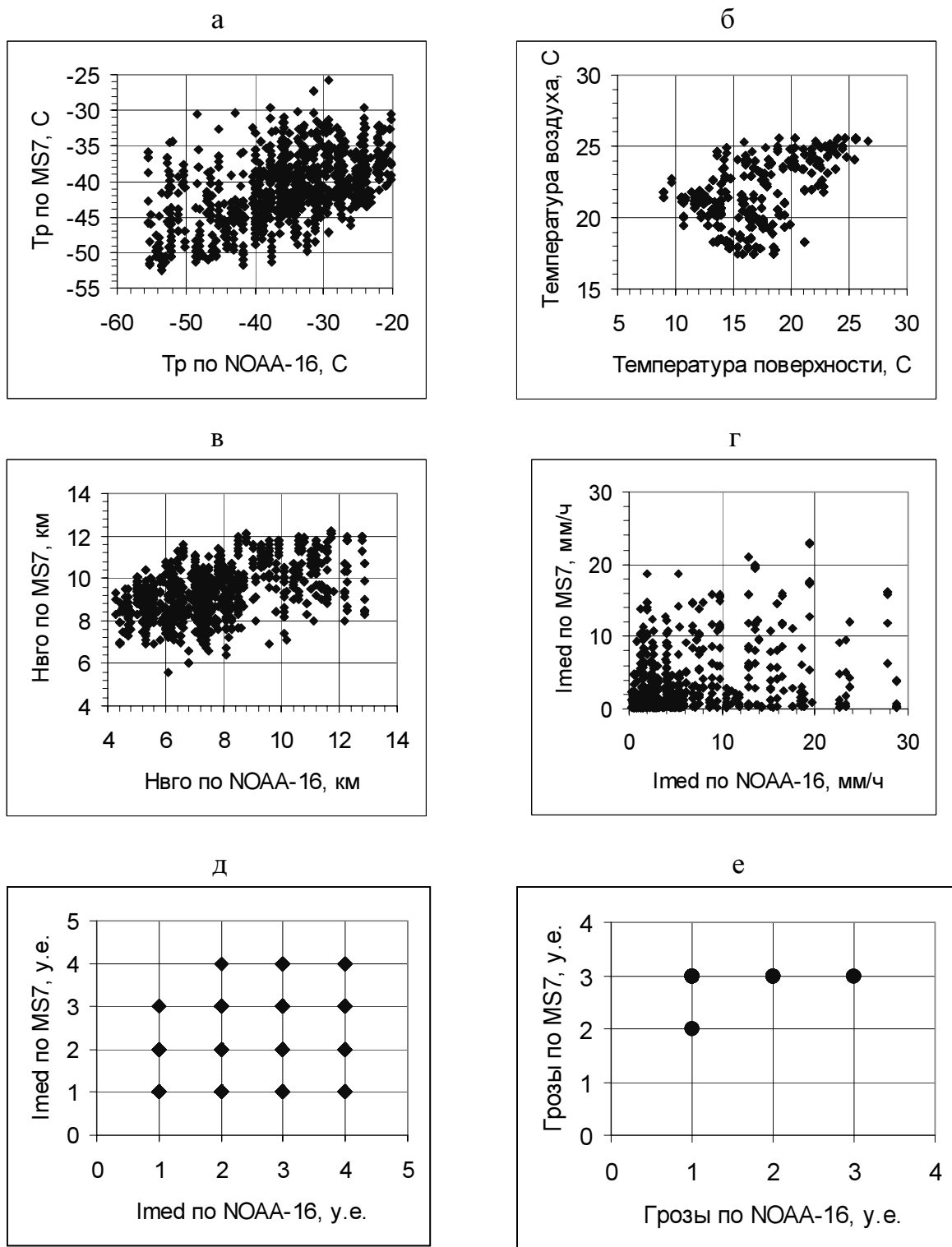


Рис.2. Графики соответствия между значениями радиационной температуры облачности (а), температурой поверхности суши и прогностической температурой воздуха у земли (б), высотами верхней границы облачности (в), средней интенсивностью осадков (г), ее градациями (д) и интенсивностью гроз (е), рассчитанными по измерениям с ИСЗ NOAA-16 и Meteosat-7 для ситуации, представленной на рис.1. Обозначения градаций Iмед (д): 1 (0.1-1 мм/ч), 2(1-5 мм/ч), 3(5-15 мм/ч), 4(15-30 мм/ч); интенсивности гроз (е): 1- слабые, 2 - умеренные, 3 – сильные, 4 – очень сильные

Несмотря на то, что координаты большинства зон с осадками, диагностированными по ИСЗ *Meteosat-7* и *NOAA-16*, оказались примерно одинаковыми (см. рис.1а, б), соответствующие значения радиационной температуры на верхней границе облачности, зарегистрированные в этих же районах, существенно различаются (см. рис.2б). Причем, диапазону сравнительно небольших средних значений T_r от -20 до -30°C , зарегистрированных с помощью измерений на ИСЗ *NOAA-16*, данным ИСЗ *Meteosat-7* соответствуют существенно более низкие температуры (от -26 до -46°C), типичные для облачности с осадками.

Можно показать, что причинами наблюдаемого несоответствия T_r являются: большая пространственная изменчивость T_r в районах развития кучево-дождевой облачности, различное пространственное разрешение используемых радиометров и несколько разное время съемки (11 ч 09 мин для *NOAA-16* и 10 ч 56 мин МСВ для *Meteosat-7*). Эти же причины, а также заметное различие (до $5-10^\circ\text{C}$) между значениями прогностической температуры воздуха и рассчитываемой (по *NOAA-16*) температуры поверхности суши (см. рис.2б), влияют и на большой (до 4-5 км) разброс в оценках $H_{\text{вг}}$ (см. рис.2в) в зонах осадков.

Как видно на рис.2в, вычисления $H_{\text{вг}}$ по измерениям с обоих спутников статистически лучше согласуются при больших значениях ($H_{\text{вг}} > 8$ км), соответствующих кучево-дождевой облачности. В районах с $H_{\text{вг}} < 8$ км, где доминируют N_s , средние значения $H_{\text{вг}}$ по данным с ИСЗ *Meteosat-7* существенно больше (в 1.5-2 раза), чем по *NOAA-16*. Можно показать, что в районах с осадками значения $H_{\text{эф}}$, рассчитываемые по формуле (3) для *Meteosat-7*, лучше согласуются с $H_{\text{вг}}$, вычисляемой по измерениям *NOAA-16*.

Как следствие выше перечисленных причин, соотношения между значениями средней (аналогично и максимальной) интенсивности осадков (рис.2г) и ее грациями (рис.2д), рассчитанные по информации ИСЗ *Meteosat-7* и *NOAA-16*, также имеют сравнительно большой разброс.

Статистически менее значимым оказалось соответствие между значениями интенсивности гроз (рис.2е). Причем, по данным с ИСЗ *Meteosat-7* интенсивность гроз на 1-2 градации выше, что объясняется более высокой пространственной детализацией S_b облачности и, как следствие, более точной оценкой ее $H_{\text{вг}}$. Как показал анализ снимка с ИСЗ *Meteosat-7*, полученного в 11 ч 30 мин МСВ, дополнительной причиной разброса сравниваемых больших значений интенсивности осадков и гроз является сравнительно быстрая изменчивость во времени значений T_r в районах с S_b облачностью.

Более высокая периодичность, пространственная детальность и обзорность съемки с геостационарных спутников делают перспективным дальнейшее совершенствование рассмотренного подхода и его применение для мониторинга таких явлений в районах, где сеть наземных и радиолокационных метеорологических наблюдений отсутствует или не является достаточно плотной.

Литература

1. Бухаров М.В., Алексеева А.А. Диагноз возможных ливней и града по измерениям уходящего теплового излучения Земли со спутника *NOAA* // Метеорология и гидрология, 2004. № 9. С.21-30.
2. Алексеева А.А., Бухаров М.В. Спутниковый диагноз гроз по синхронной информации радиометров микроволнового и инфракрасного диапазонов // Метеорология и гидрология, 2005. № 6. С.30-39.
3. Алексеева А.А., Бухаров М.В., Лосев В.М., Соловьев В.И. Диагноз осадков и гроз по измерениям уходящего теплового излучения облачности с геостационарных спутников // Метеорология и гидрология, 2006. № 7 (в печати).
4. Лосев В.М. Гидродинамическая конечно-разностная модель регионального прогноза на ЭВМ *CRAY* // Труды Гидрометцентра России, 2000. Вып. 334. С. 69-90.