

## РАСПОЗНАВАНИЕ ЛИВНЕЙ И ГРАДА ПО ИЗМЕРЕНИЯМ УХОДЯЩЕГО ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗЕМЛИ СО СПУТНИКА NOAA

*А.А. Алексеева\*, М.В. Бухаров\*\**

*\* Гидрометеорологический научно-исследовательский центр России*

*\*\* Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»*

*E-mail: bukharov@planet.iitp.ru*

Рассмотрен новый подход к распознаванию ливней и града по комплексу информации радиометров микроволнового и ИК-диапазона, установленных на полярно-орбитальных спутниках серии NOAA. Подход основан на известных эмпирических взаимосвязях между интенсивностью дождя, диаметром града и метеорологическими параметрами, значения которых вычисляются с помощью новейших методов обработки спутниковых данных. Анализ результатов распознавания ливней и града, наблюдавшихся в летний период 2003 г. на европейской территории России, показал их непротиворечивость с фактической метеорологической информацией.

Диагноз конвективных явлений (ливней, града, шквалов), оценка интенсивности связанных с ними процессов является сложной и еще не решенной проблемой спутниковой метеорологии. Наиболее результативно мониторинг таких процессов осуществляется с помощью наземных метеорологических радиолокаторов (МРЛ) [6, 7, 9]. Вследствие сокращения сети МРЛ возникла острая необходимость в разработке и усовершенствовании спутниковых методов диагноза таких процессов.

Известные и используемые в настоящее время методы оценки параметров атмосферы по измерениям уходящего теплового излучения Земли в микроволновом диапазоне длин волн не обеспечивают обнаружения опасных ливней и града [11]. Методы распознавания и прогноза таких явлений по спутниковым измерениям в инфракрасном (ИК) диапазоне требуют дополнительного учета текущих значений ряда метеорологических параметров [1, 7], которые до последних лет не рассчитывались по спутниковой информации, либо позволяют диагностировать осадки малой интенсивности и только на качественном уровне [5]. Появившиеся в самые последние годы методы оценки метеорологических параметров по информации радиометров микроволнового [10, 11] и ИК-диапазона [2] создали необходимые предпосылки для решения проблемы спутникового диагноза ливней и града.

Учитывая это, в работе рассматривается усовершенствованный подход к диагнозу ливней и града при комплексном использовании информации спутниковых радиометров микроволнового и ИК-диапазонов. Вначале кратко остановимся на методических вопросах спутникового диагноза таких явлений.

### **Методические вопросы распознавания ливней и града**

**Исходная информация.** Для диагноза использована информация микроволнового радиометра AMSU (The Advanced Microwave Sounding Unit) и радиометра AVHRR (The Advanced Very High Resolution Radiometer), поступающая в режиме непосредственной передачи с ИСЗ NOAA-16. В процессе предварительной и тематической обработки спутниковых данных, а также при построении результирующих карт использовано адаптированное специализированное программное обеспечение [4, 8].

В процессе предварительной обработки информация всех спектральных каналов радиометров AMSU и AVHRR совмещается посредством приведения к одинаковому пространственному масштабу. Вследствие того, что прием излучения спутниковыми радиометрами осуществляется в плоскости, проходящей через надир, горизонтальный масштаб усреднения совмещенной информации изменяется от 24 км в надире до ~ 60 км — на краях полосы обзора.

**Методический подход.** В первую очередь на основе спутниковых данных рассчитываются параметры облачности, определяющие процесс образования ливней и града. Далее проводится оценка возможности возникновения таких явлений. Затем рассчитываются значения интенсивности осадков и диаметра града.

В обобщенном виде связь диагностируемых максимальной интенсивности осадков ( $I$ ) и диаметра града ( $D$ ) можно представить следующим образом:

$$I = F_{1I}(W_m, H_{\text{взо}}, T_p, T_3)F_{2I}(T_p, \gamma, P, Q), \quad (1)$$

$$D = F_{1D}(W_m, H_{\text{взо}}, H_0, T_p, T_3)F_{2D}(T_p, H_{\text{вм}}, H_0, \gamma, P), \quad (2)$$

где  $I, D$  — значения максимальной интенсивности осадков и диаметра града у земной поверхности, соответственно, в пределах площади анализируемой облачности;  $W_m$  — максимальная скорость вертикальных восходящих потоков в облачности конвективного масштаба;  $H_{\text{взо}}$  — высота верхней границы облачности;  $T_p$  — радиационная температура на уровне верхней границы облачности;  $T_3$  — температура воздуха у земной поверхности,  $\gamma$  — средний вертикальный градиент температуры в слое от земной поверхности до верхней границы облачности;  $P$  — вероятность осадков;  $Q$  — водозапас облаков;  $H_0$  — высота нулевой изотермы в облачности;  $H_{\text{вм}}$  — высота, на которой наблюдается максимальная скорость вертикальных восходящих конвективных потоков в облачности;  $F_{1I}, F_{2I}, F_{1D}, F_{2D}$  — дискриминантные функции наличия ( $F = 1$ ) и отсутствия ( $F = 0$ ) осадков и града.

Согласно результатам экспериментальных исследований, полученным под руководством Н.И. Глушковой, параметры, являющиеся, наряду с другими, предикторами зависимостей (1) и (2), обладают определенной функциональной взаимосвязью со значениями радиационной температуры  $T_p$ , которая устойчиво проявляется в разных климатических зонах [7]:

$$H_{\text{взо}} = C_H(T_3)T_p, \quad (3)$$

$$W_m = C_W(T_3)H_{\text{взо}}^2 \cong C_W C_H^2 T_p^2, \quad (4)$$

$$I = C_I W_m^2 \cong C_I C_W^2 C_H^2 T_p^2, \quad (5)$$

где  $C_H, C_W, C_I$  — эмпирические коэффициенты, величина которых определяется диапазоном значений температуры воздуха у земной поверхности.

Значения радиационной температуры  $T_p$  и температуры воздуха у земной поверхности  $T_3$  в районах с облачностью рассчитываются по результатам спутниковых измерений радиометрами AVHRR (спектральный канал 10,3–11,3 мкм) и AMSU (спектральные каналы 23,8; 31,4 и 50,3 ГГц), соответственно, по методике [11]. По формулам (3)–(5) рассчитываются значения  $H_{\text{взо}}, W_m$  и  $I$ .

Комплекс условий, при котором дискриминантная функция  $F_{2I}$  диагностирует осадки, следующий:  $T_p < 253$  К,  $\gamma < 9$  К/км,  $P > 70$  %,  $Q > 0,2$  кг/м<sup>2</sup>. Значения вероятности осадков  $P$  и водозапаса облаков  $Q$  рассчитываются по результатам спутниковых измерений радиометрами AVHRR [8] и AMSU (по спектральным каналам 23,8 и 31,4 ГГц) в соответствии с методикой [11], а величина вертикального градиента температуры  $\gamma$  в районе с облачностью — по значениям  $T_p, H_{\text{взо}}$  и  $T_3$ .

Отметим, что, согласно экспериментальным результатам, представленным в работе [5], при  $T_p < 253$  К вероятность существования осадков любой интенсивности в момент съемки оказывается близкой к 70 %, т. е. является достаточно высокой. При более низких значениях  $T_p$  вероятность ливневых осадков, а, следовательно, и правильности их диагноза, увеличивается. Этому же способствует и учет ограничений на допустимые значения параметров  $\gamma, P$  и  $Q$ .

При диагнозе града учитывается, что возможность его образования и фактические значения диаметра градин, выпадающих на земную поверхность, обладают известной функциональной взаимосвязью (оправдываемость прогнозов града, составленных на ее основе, составляет не менее 78 %) с такими метеорологическими параметрами, как  $W_m$  и  $H_0$  [7, 9]. Поэтому для расчета диаметра града, выпадающего на земную поверхность, кроме  $W_m$ , рассчитываемой по соотношению (4), необходимо знать еще и высоту нулевой изотермы  $H_0$  в облачности. Для расчета значения  $H_0$  использована оригинальная спутниковая методика, которая основана на использовании данных о температуре воздуха на уровне верхней границы облачности (т. е. радиационной температуре  $T_p$ ) и рассчитываемых значений  $H_{зо}$  и температуры воздуха у земной поверхности [2]. Отметим, что эта методика с 1996 г. успешно используется в противогорадовой службе Аргентины (провинция Мендоса) для оперативного спутникового картирования значений  $H_0$  в облаках.

После вычисления значений  $W_m$  и  $H_0$ , по известным эмпирическим зависимостям, представленным в работах [6, 7, 9], проводится расчет диаметра возможного града. Затем рассчитывается дискриминантная функция  $F_{2D}$ . Причем, в качестве условий, при которых  $F_{2D} = 1$  (т. е. диагностируется град), принимаются:  $T_p < 233$  К,  $\gamma < 6,5$  К/км,  $P > 90$  %,  $H_{wm} > H_0$ . При этом значение  $H_{wm}$  рассчитывается в соответствии с рекомендациями работ [6, 9].

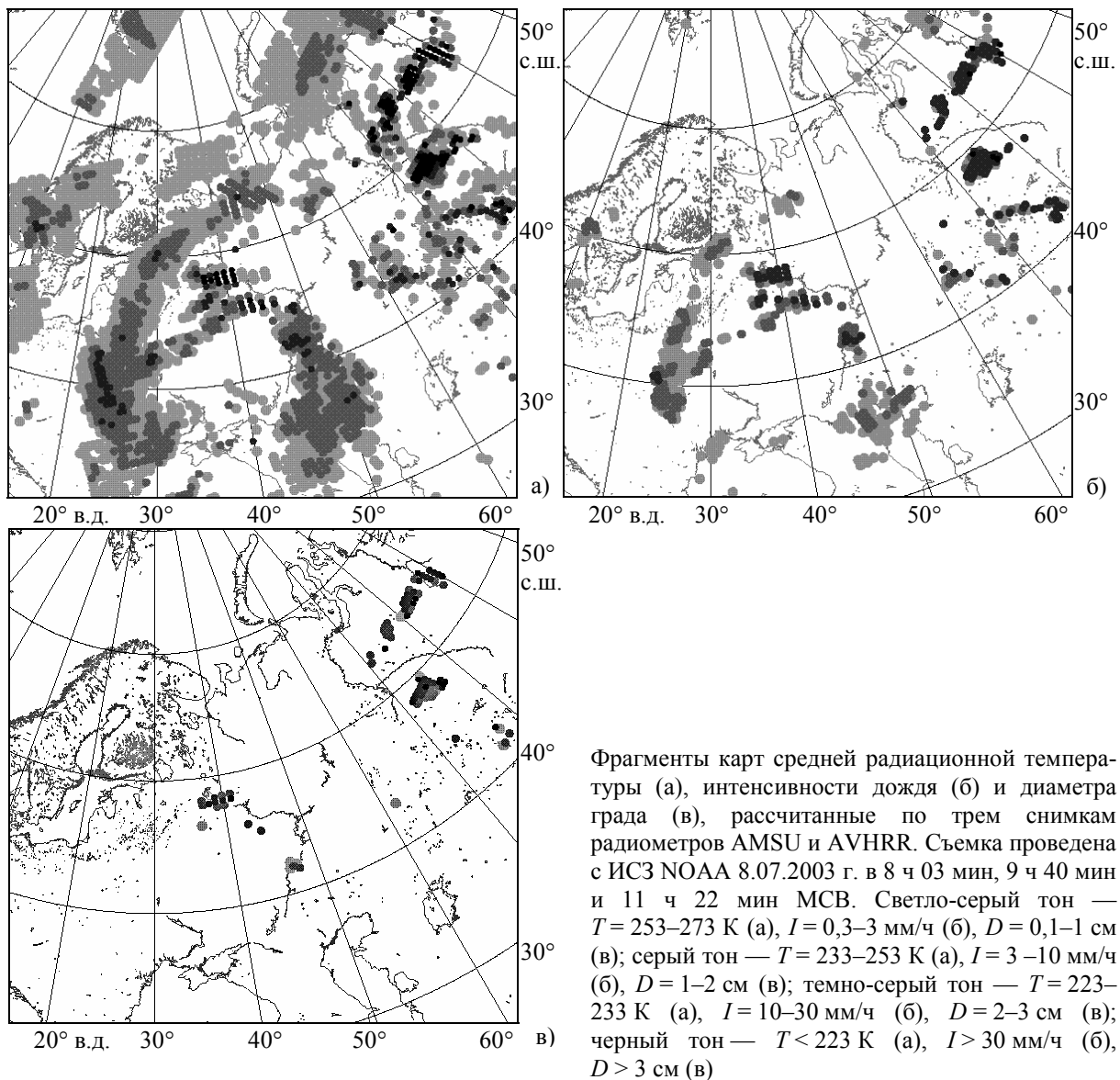
Используя рассмотренный выше подход, в НИЦ «Планета» летом 2003 г. по принимаемой спутниковой информации начато опытное построение диагностических карт интенсивности осадков и диаметра выпадающего града на земной поверхности. Значения интенсивности осадков на картах представляются в виде градаций 0,3–3; 3–10; 10–30 и свыше 30 мм/ч, которые условно соответствуют незначительному и умеренному дождю, сильному и очень сильному ливню.

Как показало сравнение с фактическими данными наземных наблюдений за период с 1 июня по 31 августа 2003 г., разработанная методика позволяет качественно правильно диагностировать градации регистрировавшихся дождей и с удовлетворительной погрешностью рассчитывать диаметр градин, выпадающих на земную поверхность. Однако количество случаев, когда град диагностировался по разработанной методике, оказалось заметно больше, чем число случаев его регистрации наземной метеорологической сетью. Причинами этого, кроме недостаточно высокой плотности сети наземных измерений и неполноты сведений с мест, где нет метеорологических наблюдений, могут быть: неточность интерпретации выпадения града на земную поверхность в случаях диагностирования градоносных состояний облаков [3], а также недостаточно совершенный учет параметров в дискриминантной функции.

С целью иллюстрации непротиворечивости получаемых результатов рассмотрим конкретный пример спутникового диагноза ливней и града и соответствие между диагностируемыми параметрами и фактическими синоптическими условиями.

### Пример диагноза ливней и града

Обратимся к ситуации, которая наблюдалась в дневное время над Европейской территорией России 8 июля 2003 г. в период зарегистрированной значительной грозовой активности атмосферных процессов. Соответствующие этому периоду поля облачности, диагностируемые интенсивности осадков и града, которые построены по результатам обработки трех последовательных и частично перекрывающихся сеансов спутниковых съемок, приведены на рисунке. Карты построены таким образом, что в районах перекрытия информация каждого последующего сеанса спутниковой съемки замещала предшествующую информацию об облачности (а) и дополняла информацию об интенсивности дождя (б) и граде (в).



Согласно картам анализа приземной погоды, в период с 7 по 9 июля 2003 г. погоду в исследуемом районе определяли две фронтальные системы: арктическая и умеренных широт. Под влиянием антициклона (1020 гПа) над северной Атлантикой и Гренландией, который двигался на восток, холодный арктический фронт над восточной Европой стал смещаться к югу и 8 июля, вследствие обострившихся контрастов температуры (примерно до 4-5 °С), вызвал регенерацию и углубление циклона (1000 гПа) в этом районе (21–30° в.д.). От циклона умеренных широт (42–52° в.д., 32–45° с.ш.) в теплый сектор регенерировавшего циклона сместился фронт окклюзии (35–45° в.д., 45–49° с.ш.), в пределах которого наблюдались ливневые осадки (днем 8 июля в Москве зарегистрировано до 34–38 мм) с грозами. Возможность выпадения днем в районе Москвы и к северу от нее ливневых осадков с интенсивностью до 10–30 мм/ч видна и по результатам диагностирования, представленным на рисунке б.

Кроме ливневых осадков, вблизи Рыбинского водохранилища (39–39° в.д., 48-49° с.ш.) по спутниковым данным рассчитана возможность возникновения градоносных облаков или осадков в виде града диаметром до 3 см (см. рисунок в). Причем, из-за съемки этого района в большей степени в первую половину дня, следовало ожидать большей вероятности градоносного состояния облачности (а не выпадения града). Наземные

ятности градоносного состояния облачности (а не выпадения града). Наземные наблюдения подтвердили наличие в этом районе ливней, гроз и града.

Наиболее интенсивные ливневые осадки — до 30 мм/ч и более (см. рисунок б) и возможность градоносных облаков (см. рисунки б, в) также диагностированы по спутниковой информации и в центральной части Западно-Сибирской равнины. Согласно картам приземного анализа, погоду в этом районе определяли фронт окклюзии, сформировавшийся из фронтальной системы умеренных широт, и волновой фронт на арктической фронтальной системе. В этом районе зарегистрирована также высокая температура теплого воздуха (до 25–34 °С) и большие контрасты температуры (до 5–7 °С) на атмосферных фронтах.

Таким образом, общий анализ фрагментов карт, представленных на рисунке, показал, что существует удовлетворительное соответствие между синоптическими условиями, фактическими данными и данными об облачности, интенсивности осадков и граде, которые диагностированы по результатам обработки спутниковой информации, полученной в дневное время суток.

Сравнение данных, представленных на рисунке б, с аналогичной картой интенсивности осадков, которая построена в NOAA/NESDIS по этой же исходной информации [11], показало следующее. Географическое положение зон осадков и небольшие (примерно до 3–4 мм/ч) значения их интенсивности удовлетворительно совпали. Однако максимальные значения интенсивности осадков на карте, построенной в NOAA/NESDIS, достигавшие примерно 10 мм/ч, оказались существенно (в три и более раз) меньше, чем на рисунке б, где рассчитанная интенсивность в ряде случаев превысила 30 мм/ч.

Причинами выявленного расхождения в значениях максимальной интенсивности ливневых осадков могут быть использование разных комплексов исходной спутниковой информации, а также отличия в методах диагностирования.

Сравнение по граду не проведено из-за отсутствия аналогичных карт в NOAA/NESDIS. Отметим, что, кроме дополнительной возможности диагностировать сильные ливни и град, новая методика выгодно отличается от известной [11] еще и большей универсальностью, так как позволяет оценивать интенсивность осадков над любыми типами поверхности, включая снег и лед.

Таким образом, в работе впервые показано, что по комплексу информации спутниковых радиометров микроволнового и ИК-диапазонов можно диагностировать ливни и град и оценивать их интенсивность над любыми типами подстилающей поверхности. Анализ результатов картирования ливней и града, полученных в летний период 2003 г. для Европейской территории России, показал их удовлетворительное соответствие наземным данным.

Учитывая практическую важность созданной технологии спутникового мониторинга ливней и града, в дальнейшем предусматривается проведение более детальных исследований по оценке точности диагноза, сравнению результатов проводимого мониторинга с соответствующими данными наземных МРЛ.

## Литература

1. *Алексеева А.А.* Распознавание конвективных стихийных явлений погоды на основе цифровой информации с ИСЗ с целью их краткосрочного прогноза // Тр. ГМЦ РФ. Вып. 335. Гидрометеорологич. прогнозы. С.-Пб.: Гидрометеиздат, 2000. С. 59–73.
2. *Бухаров М.В., Алексеева А.А., Глушкова Н.И.* Способ определения высоты нулевой изотермы в облаках. Патент РФ № 2193787, G 01 W 1/00. Бюл. № 33 от 27.11.2002.
3. *Бухаров М.В., Геохланян Т.Х., Бугаева Г.В.* Изучение условий существования градовых очагов, наблюдаемых при спутниковой радиолокационной съемке // Исслед. Земли из космоса. 1991. № 6. С. 65–81.

4. Бухаров М.В., Геохланян Т.Х., Соловьев В.И. Распознавание типов снежного и ледового покровов по микроволновым измерениям со спутника NOAA // Метеорология и гидрология. 2003. № 11. С. 54–63.

5. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Детектирование облачности и выделение зон осадков регионального масштаба по данным полярно-орбитальных метеорологических ИСЗ // Метеорология и гидрология. 2002. № 4. С. 28–38.

6. Приходько М.Г. Справочник инженера-синоптика. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 327 с.

7. Руководство по диагнозу и прогнозу опасных и особо опасных осадков, града и шквалов по данным метеорологических радиолокаторов и искусственных спутников Земли. Руководящий документ РД 52.27.339-93 / Н.И. Глушкова, В.Ф. Лапчева. М.: Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 1996. 181 с.

8. Соловьев В.И., Успенский А.Б., Кухарский А.В. Температурно-влажностное зондирование атмосферы регионального покрытия по данным ИСЗ NOAA-16 // Метеорология и гидрология. 2002. № 2. С. 52–63.

9. Сулаквелидзе Г.К., Глушкова Н.И., Федченко Л.М. Прогноз града, гроз и ливневых осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 188 с.

10. Grody N.C., Weng F., Ferraro R. Application of AMSU for obtaining hydrological parameters // Microwave radiometry and remote sensing of Earth's surface and atmosphere / Ed. P. Pampaloni and S. Paloscia, VSP publication, Netherlands, 2000. P. 339–351.

11. Weng F., Zhao L., Ferraro R., Grody N., Moore D., Meng H. The Advanced Microwave Product Algorithms (AMPA) for NOAA-15 Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU) (<http://orbit-net.nesdis.noaa.gov/arad2/MSPPS/>).