

Оценки параметров облачного покрова в светлое время суток по данным геостационарного метеоспутника METEOSAT-8

Е.В. Волкова, А.Б. Успенский

ГУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»

123242, Москва, Б. Предтеченский пер., д.7

E-mail: uspensky@planet.iitp.ru

Представлена пороговая методика автоматической классификации данных измерений радиометра SEVIRI геостационарного ИСЗ METEOSAT-8, которая позволяет детектировать облачность и идентифицировать ее тип (13 классов) и фазовое состояние воды в слое вблизи ее верхней границы (4 класса), оценивать высоту верхней (10 градаций или в метрах) и нижней (4 градации) границ облачности, максимальную водность облачного слоя и водозапас (по 8 градаций), выделять зоны осадков, гроз и града и определяется их интенсивность (9 градаций для осадков и по 3 градации для грозы и града). Методика применима для умеренных широт в светлое время суток (высота солнца более 6°) и угла спутникового визирования не более $7,7^\circ$ в течение всего года. Настройка и испытание метода проводились на материале архива синхронных спутниковых и наземных метеорологических наблюдений для Европейской территории России, Украины и Восточной Европы за 2006-2007 гг. Полученные спутниковые оценки хорошо согласуются с наземными наблюдениями и аналогичными оценками по данным радиометра AVHRR полярно-орбитального ИСЗ NOAA-18. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 07-05-01030 и 07-05-13585).

Введение

В данной работе рассматривается комплексная пороговая методика автоматического анализа данных радиометра SEVIRI ИСЗ Метеосат второго поколения, (METEOSAT-8, -9) применяемая для детектирования облачности и зон осадков в умеренных широтах в светлое время суток в течение всего года независимо от типа подстилающей поверхности. Разработка этой методики позволила создать достаточно эффективную систему спутникового мониторинга облачности и осадков регионального покрытия, не требующую больших вычислительных и информационных ресурсов. Получаемые с ее помощью данные могут существенно дополнить, а в ряде случаев и заменить информацию наземной наблюдательной сети (наблюдения на метеостанциях, данные метеорологического радиолокатора). Также они могут использоваться для решения ряда задач анализа и прогноза погоды и климатических исследований.

Исходные данные

При разработке методики в качестве прототипа привлекались созданные ранее процедуры анализа данных радиометра AVHRR ИСЗ серии NOAA, см. [1, 2]. Настройка и испытание методики проводились на материале архива синхронных спутниковых (SEVIRI/METEOSAT-8 и AVHRR/NOAA-18) и наземных метеорологических (телеграммы SYNOP) наблюдений для Европейской территории России, Восточной Европы и Украины за 2006–2007 гг.

Методика использует в качестве предикторов измерения радиометра SEVIRI в каналах 1, 2, 3, 4, 9 и 10, подобных 6-ти каналам радиометра AVHRR/NOAA. Предикторные характеристики обозначены также как в методике для AVHRR/NOAA [1,2]: канал 1 радиометра SEVIRI - $\lambda=0,6$ мкм (альbedo A1), канал 2 - $\lambda=0,8$ мкм (альbedo A2), канал 3 - $\lambda=1,6$ мкм (альbedo A3), канал 4 - $\lambda=3,9$ мкм (температура T3), канал 9 - $\lambda=10,8$ мкм (температура T4) и канал 10 - $\lambda=12,0$ мкм (температура T5). Дополнительно используются разности ((T4-T5), (A2-A1), (A1-A3) и (T3-T4)) и сумма (A1+(T3-T4)). Динамические пороговые значения предикторов рассчитываются для каждого пиксела спутникового изображения как функции высоты солнца (h_0), календарного дня (data), приземной температуры воздуха на уровне 2м (T_a) и приведенной к уровню моря ($T_{a_{sea}}$), максималь-

ной температуры воздуха в атмосферном столбе над данной точкой ($T_{a_{max}}$) и др. Формулы расчета динамических порогов подбирались эмпирически на материале представительной выборки синхронных спутниковых и наземных наблюдений, извлеченных из описанного выше архива данных. Для измеренных предикторов T3, T4 и T5 проводится коррекция на угол визирования, а для A1, A2 и A3 – на угол визирования и высоту солнца по формуле Ламберта для сферической атмосферы.

В качестве дополнительной информации в методике привлекаются данные численного анализа (или прогноза) полей температуры и относительной влажности воздуха на стандартных барических уровнях и приземной температуры воздуха за 12 ч МСВ, извлекаемые из базы данных Гидрометцентра РФ. Также используются значения температуры воздуха на промежуточных уровнях (средние арифметические из значений температуры воздуха на соседних стандартных уровнях), а также значения $T_{a_{sea}}$. Перечисленные данные заданы на сетке $2,5 \times 2,5^\circ$ по широте и долготе, поэтому для каждого пиксела спутникового изображения проводится интерполяция значений температуры и влажности с 4х ближайших к ней узлов на каждом уровне в атмосфере.

Первоначальная оценка работоспособности методики осуществлялась путем визуального сравнения фрагмента классифицированного изображения с геостационарного ИСЗ (данные SEVIRI) размером 600×600 пикселей в исходной проекции с 2мя изображениями с полярно-орбитального ИСЗ NOAA-18 (AVHRR/3) размером 600×600 пикселей (отдельно для севера ЕТР и юга ЕТР и Украины) в равномерной широтно-долготной географической проекции с разрешением $1'$ по широте и $1,5'$ по долготе. Результаты классификации также сравнивались с исходными спутниковыми изображениями в отдельных каналах и наземными метеорологическими наблюдениями.

Данные наземных наблюдений за облачностью, осадками, грозой, градом и высотой НГО извлекались из телеграмм SYNOP за 12 ч МСВ (в кодах КН-01). В соответствии со значениями кода (0-100) выделялись следующие классы: «без осадков»; «слабые осадки»; «умеренные/сильные осадки»; «сильные/очень сильные осадки»; «гроза»; «град». Результаты классификации облачности по типам сопоставлялись с данными метеонаблюдений за типами облачности нижнего, среднего и верхнего яруса (в кодах), а оценки высоты нижней границы облачности (НГО) – с данными наземных наблюдений высоты НГО в кодах.

При определении фазового состояния воды на верхней границе облачности (ВГО), максимальной водности облачного слоя и его водозапаса из-за отсутствия соответствующих регулярных наземных наблюдений использовалась справочная информация ВМО об основных типах облачности [3] и климатические данные [4], а получаемые оценки сопоставлялись с синоптической ситуацией, результатами нефанализа и соответствующими оценками по данным радиометра AVHRR/NOAA.

Описание методики и валидация результатов классификации

Детектирование облачности

С помощью методики формируется маска «ясно-облачно» над сушей и водной поверхностями, при этом не требуется априорное задание маски «суша/вода» и дополнительных сведений о состоянии снежно-ледового покрова. Выделяются 1 класс «облачно» и 3 класса «безоблачно»: «суша без снега», «вода» и «снег/лед». Решающее правило использует предикторы A1, A2, A3, T4, (A2-A1) и (T3-T4), пороговые значения которых рассчитываются как функции $data$, $T_{a_{sea}}$, T_a , h_o .

Сопоставление результатов детектирования облачности по данным радиометров SEVIRI и AVHRR/3 показывает, что описываемая методика хорошо детектирует крупные облачные массивы и обширные безоблачные пространства (ср. рис. 1а и 1б). Однако, в случаях с редкими небольшими кучевыми, высококучевыми облаками или разорванной кучевообразной облачностью результаты детектирования могут заметно различаться. Если размер кучевообразного облака существенно меньше элемента разрешения SEVIRI, то облако “размывается” по пикселу и он причисляется к классу «безоблачно». Если, наоборот, размеры облачного просвета меньше эле-

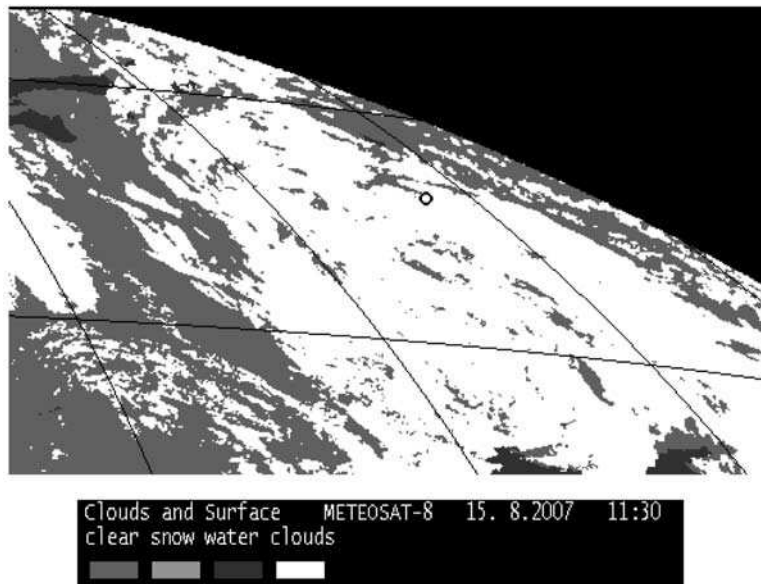


Рис. 1-а. Детектирование облачности по данным радиометра SEVIRI геостационарного ИСЗ METEOSAT-9. Проведены меридианы 20, 30 и 40° в.д. и параллели 50 и 60° с.ш. Кругочком показан г.Москва. Время МСВ

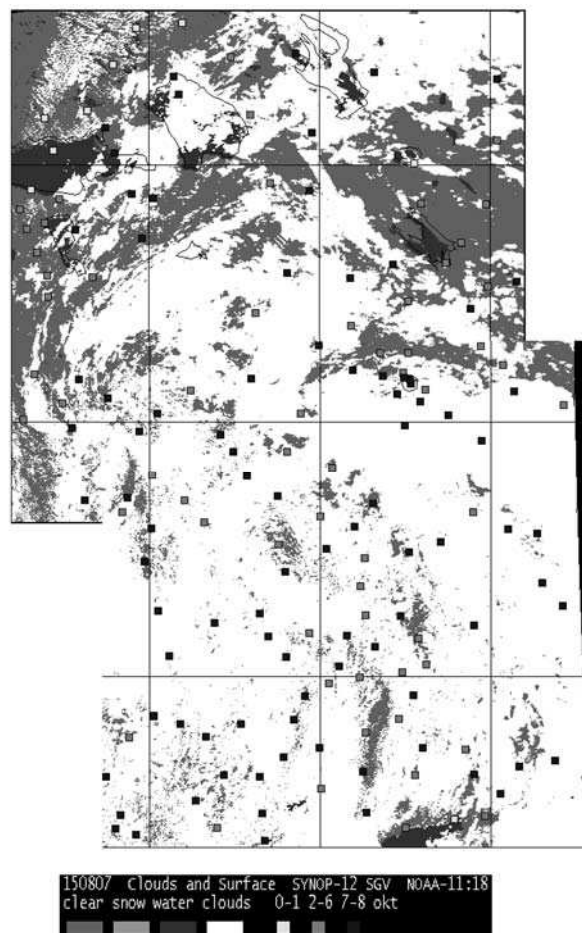


Рис. 1-б. Детектирование облачности по данным радиометра AVHRR полярно-орбитального ИСЗ NOAA-18. Проведены меридианы 30, 35 и 40° в.д. и параллели 50, 55 и 60° с.ш. Кругочком показан г. Москва. Время МСВ. Дополнительно нанесены (квадратики) результаты наблюдения за количеством общей облачности на метеостанциях и контуры крупных водоемов

причисляется к классу «безоблачно». Если, наоборот, размеры облачного просвета меньше элемента разрешения, то происходит слияние отдельных облаков в поле облачности и ситуация «ячейки из C_u или A_c » детектируется как « S_c из C_u или A_c ». Поэтому достоверность оценок количества облачности по данным SEVIRI при сопоставлении с наземными наблюдениями ухудшается (по сравнению с аналогичными оценками по информации AVHRR).

Определение высоты ВГО

Определяемая по спутниковым данным температура ВГО, как правило, оказывается выше реальной (даже у плотной облачности излучает не верхний край облачности, а некоторый нижележащий слой, а сквозь неплотную облачность вдобавок «просвечивает» подстилающая поверхность или нижележащая более теплая облачность). Для ее корректировки и оценки «уточненной» температуры ВГО (T_{4n}) получена эмпирическая зависимость: $T_{4n}=f(T_4, T_5, T_3, A_1, (T_4-T_5), data, h_o, T_{a_{sea}}, T_{a_{max}})$. Используя T_{4n} , данные о вертикальном распределении температуры и влажности в атмосфере, значение давления на уровне моря в данной точке, $T_{a_{sea}}$ и барометрическую формулу для политропной атмосферы, производится расчет высоты ВГО ($h_{ВГО}$) над уровнем моря в гПа или в метрах.

Конечный продукт может быть представлен для каждого пиксела в метрах (матрицей или в виде черно-белого изображения, где интенсивность серого цвета показывает высоту ВГО, дополнительно можно наносить изолинии равных значений $h_{ВГО}$), а также в градациях высоты (<2 км, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7, 7-8, 8-9, 9-12 и >12 км).

Сопоставление оценок $h_{ВГО}$ с результатами классификации облачности по типам, синоптической ситуацией, картами рельефа и оценками $h_{ВГО}$ по данным AVHRR показывают удовлетворительное согласование (сравни рис. 2-а и 2-б). Наиболее типичные ошибки при расчете $h_{ВГО}$:

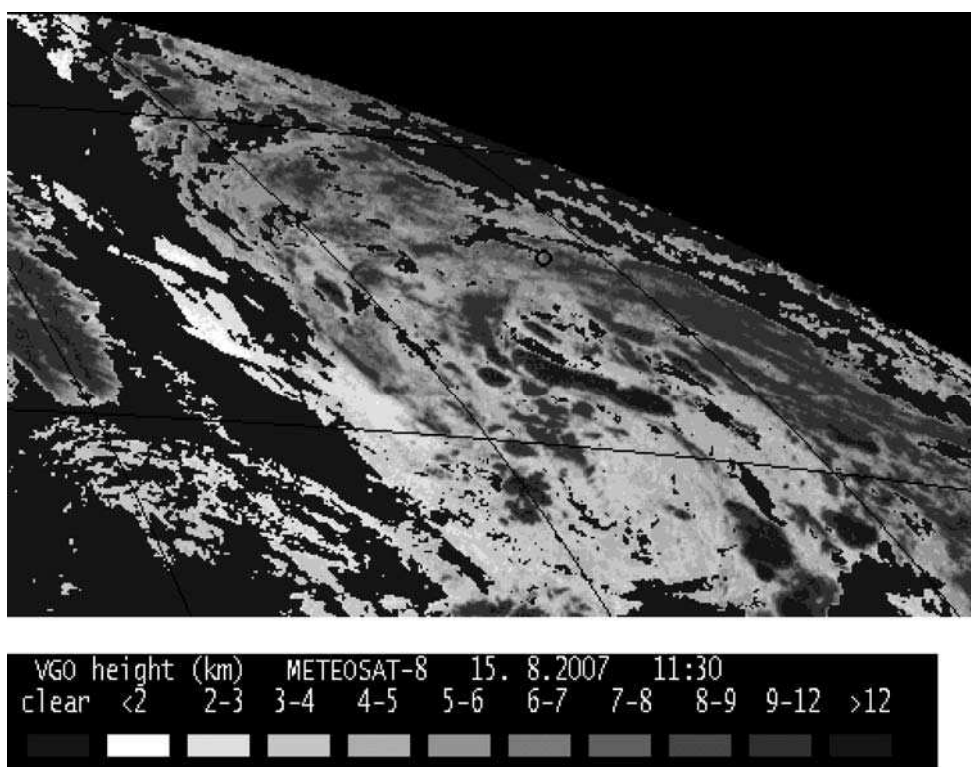


Рис. 2-а. Результат определения высоты ВГО (км) по данным радиометра SEVIRI геостационарного ИСЗ МЕТЕОСАТ-9. Проведены меридианы 20, 30 и 40° в.д. и параллели 50 и 60° с.ш. Кружочком показан г.Москва. Время МСВ

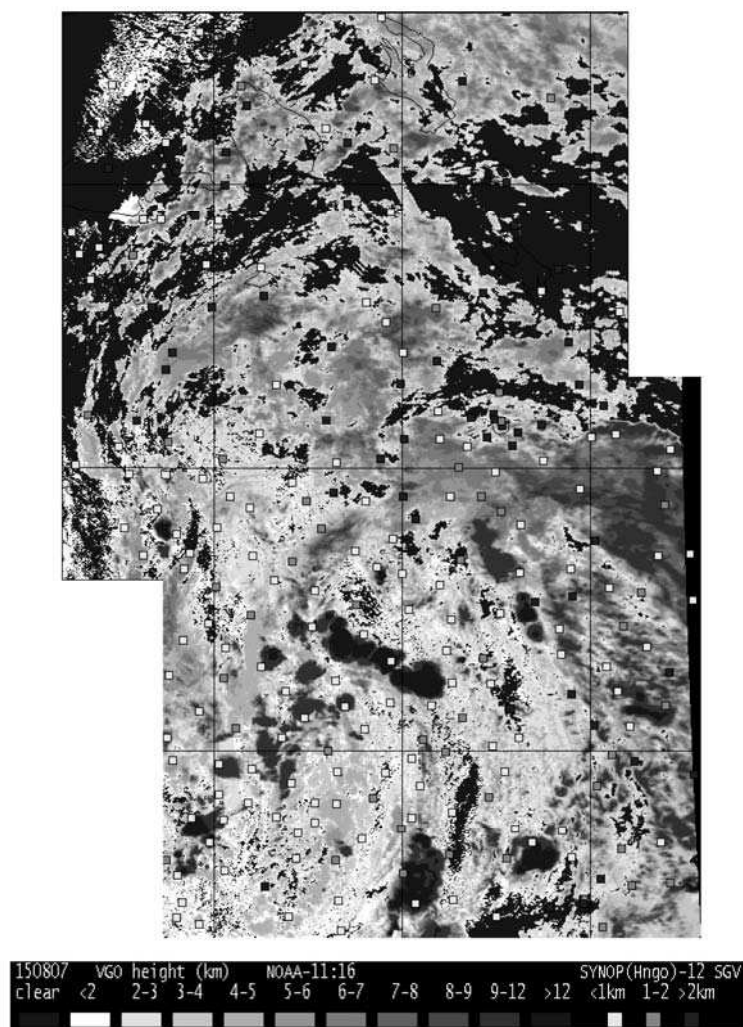


Рис. 2-б. Результат определения высоты ВГО (км) по данным радиометра AVHRR полярно-орбитального ИСЗ NOAA-18. Проведены меридианы 30, 35 и 40° в.д. и параллели 50, 55 и 60° с.ш. Кружочком показан г.Москва. Время МСВ. Дополнительно нанесены (квадратики) результаты наблюдения за высотой нижней границы облачности на метеостанциях и контуры крупных водоемов

“опускание” облачности на краях облачного массива (особенно характерно для С₁, из-за этого они могут превратиться в А_s), а также “просвечивание” мощной кучевой облачности сквозь перисто-образную и высокослоистую, в результате чего на фоне широкого полога из А_s и/или С₁ могут появляться “выпячивания”, т.е. островки с заметно более высокими значениями h_{ВГО}; образование “просветов” в тонкой перисто-образной или высокослоистой облачности, когда просвечивает, наоборот, облачность нижнего или среднего яруса, а С₁ или А_s как бы исчезают. Исследования показывают, что, несмотря на отмеченное, в подавляющем большинстве случаев ошибки определения h_{ВГО} не превосходят 10 % от полученного значения, т.е. 100-300 м для низкой облачности, 300-500 м для облачности среднего яруса и 1 км для облачности верхнего яруса, многослойной и большого вертикального развития.

Классификация облачности по типам

Методика позволяет выделить 13 классов облачности, в том числе 4 вида многослойной (см. табл. 1 с кратким описанием классов облачности). При создании процедуры классификации использовалась информация ВМО об основных типах облачности и их подвидах [3]. Выделяемые типы облачности несколько отличаются от принятых в синоптической метеорологии, т.к. иногда

оказывается легче разделить облака одного вида, но имеющие разный фазовый состав на уровне ВГО или разную структуру ледяных частиц, чем облака, относящиеся к разным видам. Для их детектирования используются предикторы: A1, T3, A3, T4, (T4-T5), (A2-A1), (T3-T4) и (A1-A3), пороговые значения которых зависят от значений data, h_0 , $T_{a_{sea}}$, T4 и Ta. При этом предиктор T3 является определяющим при отделении типов облачности, включающих перисто-образную, от капельных и смешанных облаков. Предиктор T4 в сочетании с другими используется для разделения похожих типов облачности, но отличающихся друг от друга разным вертикальным развитием, например, Cu от Cb или St от Ns. Предикторы (T4-T5) и (A2-A1) практически не используются для полупрозрачной облачности, т.к. способны “увидеть” сквозь нее водоемы. Дополнительные предикторы – полученные на предыдущем этапе оценки $h_{ВГО}$, а также поля температуры воздуха на стандартных и промежуточных уровнях в атмосфере.

Таблица 1. Характеристика типов облаков, детектируемых комплексной методикой

Название класса	Типы облачности	Высота НГО, км	Высота ВГО, км	Микро-структура	Влажность, г/м ³	Осадки
«Ci» (перистые)	Ci, Cs, Cc, As trans.	> 5	> 5,5	Кристаллич.	< 0,1	Не выпадают
«As» (высоко-слоистые)	As, Ci sp., Cs neb., As und.	2-5	2,5-6	Смешан. кристаллич. или капельн.	< 0,3	Морось, слабый снег
«Ac» (высоко-кучевые)	Ac, Cu hum., Cu fr., Sc trans., As und., St und.	1-5	1,5-5,5	Смешан. капельн. или кристаллич.	< 0,3	Морось, слабый снег
«Cu» (кучево-образные)	Cu med., Cu hum., Sc op., Sc cuf., Sc cast., St und.	0,5-1,5	1-4,5	Капельн., смешан. или кристаллич.	< 0,5	Морось, слаб., умер. дождь или слаб., умер., сильн. снег
«Cb calv» (кучево-дождевые лысые)	Cu cong., Cb calv., Cb hum.	0,5-1	3-8	Смешан. или капельн., реже кристаллич.	0,3-неск.	Умер. или сильн. ливн. дождь/снег, гроза, град
«Cb cap» (кучево-дождевые с покровом перистых)	Cb cap., Cb cap. arc., Cu pil.	0,5-1	> 6	Смешан. или капельн., кристаллич. (ВГО)	0,5-неск.	Умер. или сильн. ливн. дождь/снег, гроза, град
«Cb inc» (кучево-дождевые с накопительной)	Cb cap. inc., Cb cap. arc.	0,5-1	> 6	Смешан. или капельн., кристаллич. (ВГО)	0,5-неск.	Умер. или сильн. ливн. дождь/снег, гроза, град
«Ns, Cb» (слоисто-кучево-дождевые)	Ns, St fr., Cu fr., Fnb, Cb hum., Cu cong.,	0,5-1	2-5	Капельн., смешан. или кристаллич.	0,3-1	Морось, слаб., умер., сильн. дождь/снег
«St» (слоистые)	St, туман, Sc, As neb.	0-2	< 2,5	Капельн., смешан. или кристаллич.	< 0,3	Морось, слабый снег
«lmh» (многослойная фронтальная)	Верхн.: Ci, Cs; средн.: As; нижн.: Ns, St, Cu, Sc, Cb	0-3	> 5	Смешан. или капельн., кристаллич. (ВГО)	> 0,1	Морось, слаб., умер., сильн. неливнев. дождь/снег,
«l+h» (многослойная - верхняя над нижней)	Верхн.: Ci, Cs; средн.: As; нижн.: Sc, Cu, Ns, St, Cb	0-3	> 5	Смешан. или капельн., кристаллич. (ВГО)	> 0,2	Морось, слаб., умер., сильн. дождь/снег, гроза, град
«m+h» (многослойная - верхняя над средней)	Ci, Cs, As над As, Ac, Cu hum., Sc trans., или Ci sp.	2-5	> 5	Смешан. или капельн., кристаллич. (ВГО)	< 0,3	Морось, слабый снег
«l+m» (многослойная - средняя над нижней)	Ac, As над Sc, Cu, Ns, St, Cb	0-3	2-5,5	Капельн., смешан. или кристаллич.	> 0,2	Морось, слаб., умер., сильн. дождь/снег

Визуальный анализ больших фрагментов классифицированных спутниковых изображений облачности с точки зрения соответствия выделяемых типов облачности синоптической ситуации,

а также сопоставление с данными нефанализа подтверждают достоверность результатов классификации. Как правило, расхождения с данными нефанализа не превышает 10-20% от всех облачных пикселей и возникают на краях облачных образований, что, по-видимому, связано с наличием пикселей, частично заполненных разными типами облачности.

Определение максимальной водности облачного слоя

Максимальная водность наблюдается в нижней (многослойные) или верхней (некрупные кучевообразные) частях облачного слоя. Некоторые облака (обычно слоистообразные) могут быть достаточно однородны, и максимальная водность для них совпадает со средней водностью облачного слоя. Мощные кучево-дождевые облака могут иметь несколько максимумов водности. Некоторые классы облачности («Cbcalv», «Ns,Cb», «Cbinc», «Cbcar», «l+m», «lmh» и «l+h») имеют большой диапазон изменчивости значений максимальной водности, другие («Ci», «As», «Ac», «Cu,Sc», «St» и «m+h») – очень маленький. Сведения о максимальной водности облачного слоя необходимы для дальнейшего определения водозапаса облака, детектирования зон осадков, грозы и града.

Методика выделяет 8 градаций значений максимальной водности облачного слоя: «<0,1 г/м³», «0,1-0,2 г/м³», «0,2-0,3 г/м³», «0,3-0,5 г/м³», «0,5-1 г/м³», «1-3 г/м³», «3-5 г/м³» и «>5 г/м³», используя предикторы A1, T4, (A2-A1), (T4-T5), (A1-A3), (T3-T4) и (A1+(T3-T4)), пороговые значения которых зависят от значений h_0 , $T_{a_{sea}}$ и T_a . Дополнительно используются оценки h_{BTO} , а также температура воздуха на стандартных и промежуточных уровнях в атмосфере.

Получаемые оценки водности для соответствующих типов облачности и времени года достаточно хорошо согласуются с климатическими данными, синоптической ситуацией и с результатами оценок максимальной водности по данным радиометра AVHRR/NOAA. Количественная валидация спутниковых оценок водности облаков не проводилась из-за отсутствия регулярных наблюдений этой величины.

Выделение зон осадков и определение их мгновенной интенсивности

Детектирование зон осадков и определение их интенсивности осуществляются после оценивания типа облачности, ее водности и h_{BTO} . При этом используются предикторы A1, T4, (T3-T4) и (A1-A3), пороговые значения которых являются функциями h_0 и $T_{a_{sea}}$. Дополнительно используются поля температуры воздуха на стандартных и промежуточных уровнях в атмосфере. В зависимости от интенсивности выделяются 9 классов: «без осадков», «I<0,5 мм/ч», «I=0,5-1 мм/ч», «I=1-3 мм/ч», «I=3-5 мм/ч», «I=5-8 мм/ч», «I=8-15 мм/ч», «I=15-30 мм/ч», «I>30 мм/ч». Интенсивность осадков назначается в мм/ч независимо от типа осадков, в том числе, для снега и града.

Визуальный анализ больших фрагментов классифицированных спутниковых изображений показывает удовлетворительное согласование результатов детектирования зон осадков с синоптической ситуацией, наземными наблюдениями за осадками на метеостанциях и с результатами оценок интенсивности осадков по данным радиометра AVHRR.

Следует отметить, что при сопоставлении результатов детектирования зон осадков разной интенсивности по спутниковым данным с данными наземных наблюдений за погодой в срок наблюдения возникает ряд проблем, затрудняющих получение количественных оценок точности спутниковой классификации. Главная из них – наземные и спутниковые наблюдения за осадками различны: на метеостанциях осадки регистрируются у поверхности земли, а ИСЗ детектирует осадки в облаках, т.е. зоны облаков, способные дать осадки соответствующей интенсивности. Кроме того:

1) при сравнении спутниковых и наземных наблюдений используется один срок, например, 12 ч МСВ. При этом фактическая разница по времени между спутниковыми и наземными наблю-

дениями может достигать 20-25 мин. Летом за это время кучевое облако может успеть сформироваться, дать осадки и распасться;

2) с увеличением угла визирования и $h_{ВГО}$ увеличивается смещение облака на спутниковом изображении относительно его реального местоположения;

3) за время выпадения осадков «дождящее» облако может распасться или сместиться на расстояние до 50-100 км, т.е. наземная станция может регистрировать осадки при отсутствии облачности в ее окрестностях. Возможна также обратная ситуация (в центре облачного массива): осадки только начали выпадать из облака, но еще не успели достигнуть поверхности земли в срок метеонаблюдения. Поэтому ИСЗ регистрирует осадки, а наземный наблюдатель – нет;

4) в летнее время из-за высоких значений температур и низкой влажности в подоблачном слое может происходить испарение мелких капель, и они не долетают до поверхности земли. Т.е. ИСЗ регистрирует осадки (обычно слабые), а наземный наблюдатель их не видит;

5) наземный наблюдатель проводит точечные наблюдения, а спутниковые измерения относятся к площадным (размер пиксела изображения составляет несколько квадратных километров и увеличивается с увеличением угла визирования). Если размеры единичного (обычно кучевого) облака меньше пиксела, то измеряемые со спутника характеристики облака «размазываются» по пикселу, в результате интенсивность осадков уменьшается.

6) интенсивность осадков на метеостанции наземным наблюдателем регистрируется в качественном виде, а спутниковые оценки являются количественными (в градациях интенсивности). Это необходимо учитывать при сопоставлении спутниковых и наземных данных об осадках.

Несмотря на перечисленные ограничения и проблемы, сравнение спутниковых и наземных данных показывает, что наблюдения с геостационарного МИСЗ за осадками вполне пригодны для детектирования зон осадков мезо- и макромасштаба, а также для оценок мгновенной интенсивности осадков из облаков синоптического масштаба.

Детектирование гроз

Методика позволяет детектировать зоны гроз и определять их интенсивность и вероятность события. При этом выделяется 4 класса: 1) отсутствие грозы (вероятность события 0 %); 2) гроза вероятна, при этом она скорее слабая, чем умеренная и никогда сильная; 3) вероятность грозы более 70 %, при этом гроза скорее умеренная, но может быть слабой или сильной; 4) вероятность грозы около 100 %, при этом гроза скорее сильная, чем умеренная и никогда слабая. Эти оценки получены путем визуального сопоставления результатов классификации с наземными наблюдениями.

Аналізу на возможность наличия гроз в методике подвергаются только классы облачности «Cbcalv», «Cbcar», «Cbinc» и «l+h» с высокими значениями максимальной влажности ($>0,5 \text{ г/м}^3$) и $h_{ВГО}$. В качестве предикторов используются A1, T4, (T4-T5), (T3-T4) и (A1-A3), пороговые значения которых зависят от значений h_0 и $T_{a, \text{sea}}$.

При сопоставлении спутниковых оценок гроз с наземными наблюдениями возникает ряд проблем. Главные из них : сдвиг по времени между наблюдениями с земли и с ИСЗ (особенно важно для небольших по размеру грозовых облаков, которые дают кратковременные грозы, т.е. происходит “потеря” грозы наземным наблюдателем или ИСЗ); ухудшение разрешения на краях спутникового изображения важно для небольших грозовых облаков, т.к. происходит осреднение характеристик грозового облака и уменьшение вероятности и интенсивности грозы; пространственный сдвиг облака относительно его реального местоположения (в зависимости от угла визирования и $h_{ВГО}$).

В целом, оценки вероятности и интенсивности гроз хорошо согласуются с синоптической ситуацией, наземными метеонаблюдениями и оценками по информации AVHRR. Качество классификации ухудшается с уменьшением масштаба явления.

Детектирование града

Методика позволяет детектировать зоны града и определять интенсивность и вероятность его выпадения. Выделяется 4 класса: 1) без града (вероятность события 0 %); 2) град в облаках, существует вероятность выпадения града слабой интенсивности; 3) вероятность выпадения града более 70 %, град слабый или умеренный; 4) вероятность выпадения града около 100 %, град умеренный или сильный.

Аналізу на возможность выпадения града подвергаются только классы облачности «Cbcalv», «Cbcar», «Cbinc» и «l+h» с высокими значениями максимальной водности ($>1 \text{ г/м}^3$) и $h_{\text{ВГО}}$. В качестве предикторов служат $A1$, $T4$, $(T4-T5)$, $(T3-T4)$ и $(A1-A3)$, пороговые значения которых зависят от значений h_0 и T_{sea} .

Результаты классификации больших фрагментов спутниковых изображений по степени вероятности и интенсивности града хорошо согласуются с синоптической ситуацией, наземными метеонаблюдениями и оценками по информации AVHRR/NOAA.

Количественные оценки вероятности и интенсивности града затруднены из-за пространственно-временных сдвигов между наземной и спутниковой информацией (см. выше проблемы для осадков и гроз) и малой длительности события град. Согласно выполненному анализу методика применима для детектирования градоносных облаков макромасштаба. Качество классификации убывает с уменьшением масштаба явления.

Определение фазового состояния воды на ВГО

Некоторым классам облачности, выделяемым описываемой методикой, присущ только один вариант фазового состояния воды на ВГО. Например, у классов «Ci», «m+h», «l+h», «lmh», «Cbcar» и «Cbinc» вода в верхнем слое присутствует только в кристаллической форме. Фазовое состояние воды на уровне ВГО для других классов облачности зависит от времени года и температуры на уровне ВГО.

С помощью предикторов $T3$, $T4$, $(T3-T4)$, $T4n$, Ta и T_{max} , пороговые значения которых зависят от $A1$, h_0 и T_{sea} , методика выделяет 4 класса облачности в зависимости от фазового состояния воды в верхней части облачного слоя: «вода в жидкой фазе», «вода в твердой фазе», «смешанные, жидкая фаза преобладает» и «смешанные, твердая фаза преобладает». Количественная валидация спутниковых оценок не проводилась из-за отсутствия регулярных наблюдений за фазовым состоянием воды на ВГО.

Определение высоты НГО

Высота НГО – это высота основания облака над подстилающей поверхностью. Т.к. в пределах одного пиксела может присутствовать облачность нескольких видов, то оценки $h_{\text{НГО}}$ представляют собой некоторую среднюю величину. Оценки $h_{\text{НГО}}$ в методике получаются «косвенно» – по типу облачности, ее водности, $h_{\text{ВГО}}$, а также величинам $A1$ и $(T3-T4)$, пороговые значения которых являются функциями h_0 и T_{sea} . В результате, выделяются 4 градации $h_{\text{НГО}}$: «<1 км», «1-3 км», «3-5 км» и «>5 км».

Визуальный анализ фрагментов классифицированных спутниковых изображений и сопоставление с результатами наземных наблюдений за высотой НГО показывает, что методика вполне пригодна для макромасштабных оценок $h_{\text{НГО}}$.

Определение водозапаса облака

Водозапас облака (или суммарная водность облачного слоя) зависит от типа облачности, максимальной водности облачного слоя и мощности облака, т.е. разности высот ВГО и НГО. Для

оценки водозапаса используются предикторы A1, T4, (T3-T4) и (A1-A3), пороговые значения которых зависят от h_0 и $T_{a,sea}$. Дополнительно используется температура воздуха на стандартных и промежуточных уровнях в атмосфере. Выделяется 8 градаций водозапаса: « $<0,5 \text{ кг/м}^2$ », « $0,5-1 \text{ кг/м}^2$ », « $1-2 \text{ кг/м}^2$ », « $2-5 \text{ кг/м}^2$ », « $5-10 \text{ кг/м}^2$ », « $10-20 \text{ кг/м}^2$ », « $20-30 \text{ кг/м}^2$ » и « $>30 \text{ кг/м}^2$ ».

Визуальный анализ больших фрагментов классифицированных спутниковых изображений показывает удовлетворительное соответствие выделяемых классов с реальной синоптической ситуацией, климатическими оценками и с результатами оценок по данным радиометра AVHRR.

Заключение

Предложена комплексная пороговая методика автоматического детектирования облачности в умеренных широтах в светлое время суток по данным радиометра SEVIRI геостационарного ИСЗ METEOSAT-8, которая позволяет для каждого пиксела спутникового изображения детектировать облачность и определять ее параметры (тип, водность и водозапас, высоту ВГО и НГО, фазовое состояние воды на уровне ВГО, зоны осадков разной интенсивности, зоны гроз и града разной интенсивности) в течение всего года независимо от региона, синоптической ситуации и состояния подстилающей поверхности в светлое время суток. Решающее правило (набор предикторных характеристик и порядок выполнения классификации) сохраняются неизменными для всего года. Соотношения, описывающие изменение пороговых значений предикторных характеристик в зависимости от географического положения пиксела, календарного дня, высоты солнца и др. параметров, достаточно просты и легко могут корректироваться при переносе методики на любой соседний регион, кроме горного, в полосе $45-65^\circ$ с.ш.

Литература

1. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Оценки параметров облачного покрова по данным радиометра AVHRR ИСЗ NOAA регионального покрытия в светлое время суток в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сб. научных статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2007. Выпуск 4. Т. 2. С.65-73.
2. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Детектирование облачности и определение ее параметров со спутниковым данным в темное время суток // Метеорология и гидрология, 2007. №12.
3. Атлас облаков. Под ред. М.М. Ясногородской. Л.: Гидрометиздат, 1978. 268 с.
4. Облака и облачная атмосфера. Справочник. Под ред. И.П. Мазина и А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометиздат, 1989. 647 с.