

Оценки параметров облачного покрова по данным радиометра AVHRR ИСЗ NOAA регионального покрытия в светлое время суток в автоматическом режиме

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 AVHRR ИСЗ серии NOAA, позволяющая детектировать облачность и зоны осадков, а также оценивать параметры облачного покрова в умеренных широтах в светлое время суток (высота солнца более 6°) в течение всего года. Настройка и испытание метода проводились на материале архива синхронных спутниковых и наземных метеорологических и радиолокационных данных для ЕТР и Украины и периода 1998-2006 гг. Полученные спутниковые оценки хорошо согласуются с наземными наблюдениями.

Введение

Спутниковые наблюдения за параметрами облачного покрова и зонами осадков могут существенно дополнить, а в ряде случаев и заменить информацию наземной наблюдательной сети (наблюдения на метеостанциях, данные метеорологического радиолокатора), поэтому таким постоянным остается интерес к развитию спутниковых методов мониторинга облачности и осадков. Эти данные необходимы для решения многих задач анализа и прогноза погоды, проведения климатических исследований. Кроме того, облачные образования представляют собой главный мешающий фактор при дистанционном зондировании атмосферы и подстилающей поверхности на основе спутниковых измерений уходящего ИК (теплого) излучения, поэтому детектирование облачности (формирование маски «ясно-облачность») является актуальной задачей.

В данной работе, продолжающей исследования [1-3], рассматривается комплексная пороговая методика автоматического анализа данных радиометра AVHRR ИСЗ NOAA, 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.

Исходные данные

Настройка и испытание методики проводились на материале архива синхронных спутниковых данных (измерения радиометров AVHRR ИСЗ NOAA-14 и NOAA-16) и наземных метеорологических и радиолокационных наблюдений для территории $46,7-63,0^\circ$ с.ш., $26,0-43,7^\circ$ в.д. и периода с мая 1998 г. по октябрь 2006 г.

Спутниковые данные представляют измерения в каналах 1 ($\lambda_1=0,58-0,68$ мкм) и 2 ($\lambda_2=0,73-1,1$ мкм) видимого диапазона (альbedo A1 и A2), в канале 3 видимого (NOAA-16) или ИК (NOAA-14) диапазона ($\lambda_3=1,6$ мкм – альbedo A3 или $\lambda_3=3,55-3,93$ мкм – радиационная температура T3), в каналах 4 ($\lambda_4=3,55-11,3$ мкм) и 5 ($\lambda_5=11,5-12,5$ мкм) ИК-диапазона (радиационные температуры T4 и T5), а также их разности (A2-A1), (T4-T5), (T3-T4), (A1-A3). Т.к. T3 и A3 не доступны одновременно, то были разработаны 2 варианта методики: «альбедный», использующий значения A3 и «температурный» - значения T3.

В качестве дополнительной информации привлекаются данные численного анализа или прогноза полей температуры воздуха на 11-ти стандартных уровнях (от 1000 до 100 гПа), относи-

тельной влажности воздуха на 4х стандартных уровнях (от 1000 до 700 гПа) и приземной температуры воздуха (t_a) за 12 ч МСВ; в качестве альтернативы можно использовать результаты температурно-влажностного зондирования атмосферы по данным аппаратуры ATOVS ИСЗ NOAA [4].

Работоспособность методики предварительно оценивалась с помощью визуального анализа фрагментов спутниковых изображений размером 600х600 пикселей, приведенных к равномерной широтно-долготной географической проекции с разрешением 1' по широте и 1,5' по долготе. Результаты классификации сравнивались также с соответствующими метеорологическими и радиолокационными наблюдениями. При сопоставлении с наземными метеонаблюдениями рассматривались фрагменты спутниковых изображений размером 7х7 пикселей с центром в метеостанции. При получении количественных оценок разница по времени (dt) между спутниковыми и наземными метеонаблюдениями не превышала ± 15 мин, для формулировки качественных выводов – ± 1 ч.

Данные наземных наблюдений за облачностью, осадками, грозой и градом извлекались из телеграмм SYNOP за 12 ч МСВ (в кодах КН-01).

Значения кода (0-8) метеонаблюдений за количеством общей облачности соответствуют покрытию небосвода облачностью в октантах (1 окт. = 12,5 %). Для удобства, спутниковые оценки количества облачности в процентах покрытия рассматриваемого фрагмента переводились в октанты согласно [1, 2].

Для оценок достоверности детектирования осадков, грозы и града и определения их интенсивности использовались данные метеонаблюдений за погодой в срок наблюдения. В соответствии со значениями кода (0-100) выделялись следующие классы: «без осадков»; «слабые осадки»; «умеренные/сильные осадки»; «сильные/очень сильные осадки»; «гроза»; «град».

Для визуального контроля результатов детектирования зон осадков и количественных оценок их интенсивности использовались также данные наблюдений метеорологического радара (МРЛ, Крылатское, г.Москва) на длине волны 3 см для территории радиусом ~ 200 км с пространственным линейным разрешением ~ 4 км в виде мгновенных значений интенсивности осадков за срок, ближайший ко времени спутникового зондирования ($dt < \pm 10$ мин). Принималось, что МРЛ регистрирует осадки интенсивностью (I) не менее 0,1 мм/ч.

Для оценок достоверности классификации облачности по типам использовались данные метеонаблюдений за облачностью нижнего, среднего и верхнего яруса, а для верификации оценок высоты (h) верхней границы облачности (ВГО) – наземные наблюдения высоты нижней границы облачности (НГО) и данные МРЛ (Крылатское, г.Москва) о высоте ВГО ($h_{ВГО}$).

При определении фазового состояния воды на ВГО и максимальной водности облачного слоя из-за отсутствия соответствующих регулярных наземных наблюдений использовалась справочная «климатическая» информация об основных типах облачности, а получаемые оценки сопоставлялись с синоптической ситуацией и нефанализом.

Описание методики и валидация результатов классификации

Детектирование облачности

В настоящее время существует большое количество методик (для разных широт, сезонов, времени наблюдения, различных типов подстилающей поверхности), с помощью которых детектируется облачность в поле зрения прибора AVHRR и строится маска «ясно-облачно», используемая для оценок параметров облачного покрова и подстилающей поверхности [5]. При этом авторы большинства методик отмечают трудности детектирования пикселей, частично заполненных облачностью [6, 7]. Наличие подобных пикселей затрудняет проведение границы раздела между облачными и безоблачными пикселями. Кроме того, в зависимости от принятого способа классификации, возможно завышение или занижение оценок количества облачности, а данные в отдельных «безоблачных» пикселях оказываются «искаженными» облачностью и мало пригодны для

восстановления параметров подстилающей поверхности и дистанционного зондирования атмосферы.

В зависимости от дальнейшего использования результатов возможно применение разных подходов к разделению облачных и безоблачных пикселов. При этом пикселы, частично заполненные облачностью, относятся к классу «облачно» или «безоблачно» с учетом степени их заполненности. При одном подходе все пикселы, причисленные к классу «облачно», содержат облачность, но не все «безоблачные» пикселы являются 100%-безоблачными. При другом пикселы разделяются так, что к классу «безоблачно» относятся только 100%-безоблачные пикселы, а все прочие пикселы (независимо от степени их заполненности облачностью) причисляются к классу «облачно».

В комплексной методике возможна реализация обоих описанных подходов. При классификации формируется маска «ясно-облачно» над сушей, водной и снежно-ледовой поверхностями, при этом не требуется априорное задание маски «суша/вода» и дополнительных сведений о снежно-ледовом покрове. Выделяются класс «облачно» и 3 класса «безоблачно»: «суша без снега», «вода» и «снег/лед». При этом используются предикторы A1, A2, T4, (T4-T5), (A2-A1) и (T3-T4) или A3, пороговые значения которых задаются эмпирическими функциями от календарного дня, географических широты и долготы пиксела, высоты солнца, температуры воздуха на уровне 1000 гПа и максимальной температуры воздуха в атмосферном столбе над данной точкой (t_{max}).

Контроль качества детектирования осуществлялся визуально путем сравнения результатов с данными наземных наблюдений за количеством общей облачности (CL). Результаты наблюдений за CL разбивались на 3 группы: 0-1 окт – «безоблачно», 2-6 октов – «разорванная облачность», 7-8 октов – «сплошная облачность». Также сравнивались оценки t_a и температуры подстилающей поверхности (t_s) по данным радиометра AVHRR/NOAA с полями численного прогноза t_a за 12 ч МСВ и наблюдениями за t_a и t_s на метеостанциях. Качественные оценки достоверности выделения «безоблачных» пикселов для оценок параметров подстилающей поверхности и атмосферы показывают, что безоблачные пикселы более чем в 90 % случаев действительно не содержат облачность. Облачные пикселы при этом отсекаются практически со 100%-вероятностью. Согласно [5] оценки t_s по данным радиометра AVHRR (после коррекции на поглощение теплового излучения в атмосфере) оказываются в среднем смещенными (не более чем на 1-2° ниже соответствующих наземных измерений для суши). Среднее квадратическое отклонение (СКО) восстановленных по данным AVHRR значений t_a от данных наблюдений на метеостанциях составляет 1,5-2,0°, для оценок t_s величины СКО лежат в диапазоне 4-5°.

На рис. 1 представлены результаты сопоставления оценок количества облачности над рассматриваемым регионом по спутниковым и наземным данным отдельно для периодов года без снега, со снегом и всего периода 1998-2006 гг.

В целом, методика позволяет удовлетворительно детектировать облачность: более чем в 85 % случаев расхождения в оценках CL между наземными и спутниковыми наблюдениями не превосходят 2 окт., а суммарная ошибка не превышает 30 % для любых времени года и типа подстилающей поверхности. Несколько лучше детектируются классы «сплошная облачность» и «безоблачно». Среднее отклонение спутниковых и наземных оценок количества облачности для них не превышает 0,5 окт. СКО для подклассов из класса «сплошная облачность» составляет не более 1-1,5 окт., для класса «безоблачно» – 1,5-2 окт. Для класса «разорванная облачность» среднее отклонение может достигать 1 окта, а СКО – 2,5 октов. Это, по-видимому, обусловлено проблемами адекватного сопоставления спутниковой и наземной информации (географическая привязка, фактор времени и т.п.), а также способами оценки количества облачности с Земли (субъективный фактор) и из космоса (проблема частично заполненных облачностью пикселов).

Сравнение комплексной методики (табл. 1 - значения вероятности совпадения спутниковых и наземных оценок количества облачности (POD), см. [2]) с зарубежными системами классификации (табл. 2 - аналогичные оценки, полученные с помощью системы SCANDIA Шведского ГМИ [6]) показывает, что описываемая методика не уступает системе SCANDIA. С ее помощью более

достоверно выделяются классы «безоблачно» и «разорванная облачность». Значения POD для соответствующих классов у комплексной методики, в целом, оказываются выше, чем у системы SCANDIA. Хотя значения POD на главной диагонали невысоки, хорошо заметна концентрация более высоких значений вблизи главной диагонали с существенным снижением по мере удаления от нее. Для системы SCANDIA тяготение высоких значений POD к главной диагонали менее выражено, а наибольшие значения POD заметно смещены к более высоким значениям количества облачности, т.е. система SCANDIA завышает реальное количество облачности, т.к. по-видимому, все пиксели с частичной облачностью были отнесены к классу «облачно».

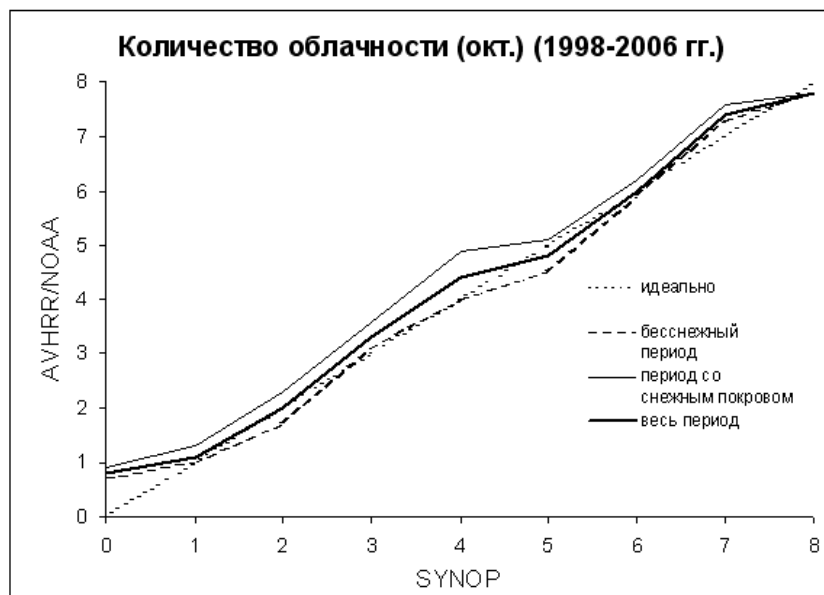


Рис. 1. Сопоставление оценок количества облачности (окт.) по спутниковым и наземным данным

Таблица 1. Вероятность совпадения спутниковых (комплексная методика) и наземных оценок количества облачности.

По данным AVHRR	По данным SYNOP								
	0-2 окт			3-6 окт			7-8 окт		
0-2 окт	58 %			11 %			1 %		
3-6 окт	38 %			72 %			22 %		
7-8 окт	5 %			18 %			77 %		
По данным AVHRR	По данным SYNOP								
	0 окт.	1 окт	2 окт	3 окт	4 окт	5 окт	6 окт	7 окт	8 окт
0 окт	39 %	21 %	8 %	4 %	3 %	2 %	1 %	1 %	~0 %
1 окт	14 %	9 %	3 %	2 %	2 %	~0 %	1 %	~0 %	~0 %
2 окт	26 %	26 %	20 %	14 %	9 %	7 %	5 %	2 %	~0 %
3 окт	9 %	15 %	18 %	15 %	14 %	12 %	9 %	4 %	1 %
4 окт	2 %	4 %	6 %	8 %	8 %	8 %	5 %	3 %	1 %
5 окт	4 %	10 %	18 %	19 %	19 %	18 %	18 %	10 %	2 %
6 окт	4 %	10 %	20 %	28 %	32 %	38 %	39 %	39 %	11 %
7 окт	1 %	3 %	4 %	7 %	9 %	8 %	16 %	29 %	34 %
8 окт	1 %	3 %	3 %	4 %	3 %	6 %	8 %	13 %	52 %

Таблица 2. Вероятность совпадения спутниковых (система SCANDIA) и наземных оценок количества облачности, размеры фрагментов 32x32 пиксела [6]

По данным AVHRR	По данным SYNOP								
	0-2 окт			3-6 окт			7-8 окт		
0-2 окт	47 %			12 %			3 %		
3-6 окт	25 %			26 %			12 %		
7-8 окт	28 %			62 %			85 %		
По данным AVHRR	По данным SYNOP								
	0 окт.	1 окт	2 окт	3 окт	4 окт	5 окт	6 окт	7 окт	8 окт
0 окт	36 %	24 %	13 %	7 %	4 %	2 %	1 %	1 %	1 %
1 окт	14 %	15 %	12 %	8 %	5 %	3 %	2 %	1 %	1 %
2 окт	10 %	10 %	11 %	7 %	6 %	5 %	3 %	2 %	2 %
3 окт	6 %	7 %	8 %	7 %	6 %	5 %	3 %	2 %	2 %
4 окт	5 %	6 %	7 %	8 %	7 %	5 %	5 %	2 %	2 %
5 окт	4 %	5 %	6 %	7 %	7 %	7 %	6 %	3 %	3 %
6 окт	4 %	5 %	7 %	9 %	9 %	9 %	8 %	5 %	5 %
7 окт	6 %	7 %	9 %	11 %	12 %	12 %	11 %	9 %	8 %
8 окт	14 %	20 %	27 %	36 %	44 %	53 %	62 %	75 %	79 %

Определение высоты ВГО

Обычно $h_{ВГО}$ вычисляется следующим образом [2, 7]. Значения T_4 в каждом облачном пикселе сравниваются со значениями температуры $T(p)$ на различных изобарических уровнях в пункте зондирования атмосферы. Профиль $T(p)$ получают по данным ближайшего аэрологического зондирования, а в случае его отсутствия - по данным численного анализа, прогноза или спутникового атмосферного зондирования. В результате определяется предварительная оценка $h_{ВГО}$ в гПа. С ее учетом, используя уравнение переноса ИК излучения в атмосфере и вертикальные профили температуры и влажности в атмосфере, рассчитывается температурная поправка на ослабление излучения в надоблачном слое, поэтому температура ВГО несколько увеличивается и опять сравнивается с вертикальным профилем температуры в атмосфере, что дает более точную оценку $h_{ВГО}$ сначала в гПа, затем в метрах (с помощью барометрической формулы для политропной атмосферы). Сравнения с независимыми оценками $h_{ВГО}$ (по данным МРЛ) показывают, что даже для плотной облачности спутниковые оценки оказываются ниже реальных значений, т.е. регистрируемое со спутника тепловое излучение облака относится не к ВГО, а к некоторому нижележащему слою. Для полупрозрачной облачности любого яруса оценки $h_{ВГО}$ оказываются еще более заниженными, т.к. сквозь них «просвечивает» подстилающая поверхность.

В комплексной методике для повышения точности восстановления $h_{ВГО}$ проводится коррекция значений T_4 (независимо от типа облачности) с помощью эмпирических уравнений $T_{4n}=f(T_3, A_1, (T_3-T_4), solar)$ или $T_{4n}=f(T_5, A_1, A_3)$, которые учитывают ослабление ИК-излучения в атмосфере. Получаемые оценки $h_{ВГО}$ удовлетворительно согласуются с синхронными наблюдениями МРЛ и среднеклиматическими оценками $h_{ВГО}$ для основных типов облачности. Результаты определения $h_{ВГО}$ могут быть представлены в цифровом виде для каждого пиксела или в градусах высоты (см. рис. 2).

Классификация облачности по типам

При классификации облачности по типам (см. [3]) выделяются 11 классов, в том числе 3 вида многослойной облачности. В табл. 3 представлено краткое описание выделяемых классов облачности. Для их детектирования используются предикторы: A_1 , T_3 или A_3 , T_4 , (T_4-T_5) , (A_2-A_1) и (T_3-T_4) или (A_1-A_3) , пороговые значения которых задаются эмпирическими функциями, завися-

щими от календарного дня, высоты солнца и температуры T4. Дополнительно учитываются сведения о температуре воздуха на уровнях 850, 700, 500, 400 гПа, t_a , t_{max} и высоте ВГО.

Таблица 3. Характеристика типов облаков, детектируемых комплексной методикой

Название класса	Типы облачности	Высота ВГО	Микроструктура ВГО	Водность, г/м ³	Осадки
«Сi» (перистые)	Ci, Cs, Cc, As neb., As trans.	> 5 км	кристаллическая	< 0,1	Не выпадают
«As» (высоко-слоистые)	Ci sp., Cs neb., As op.	3-6 км	Смешанная, кристаллическая	< 0,3	Не выпадают
«Ac» (высоко-кучевые)	Ac, Cu hum., Cu med., Cu fr., Sc trans.	1,5-5 км	Смешанная, капельная, кристаллическая	< 0,3	Не выпадают
«Cu» (кучево-образные)	Sc op., Sc cuf., Cu med., Sc cast.	0,5-4 км	Капельная, смешанная, кристаллическая	До 1	Морось, слаб., умер. или сильн. дождь/снег
«Cb» (кучево-дождевые)	Cu cong., Cb calv., Cb hum.	>4 км	Смешанная, кристаллическая	> 0,3	ливн. дождь/снег, гроза, град
«Cbсар» (кучево-дождевые с перистыми)	Cb sar., Cb sar. arc., Cu pil.	> 6 км	Кристаллическая	> 0,5	ливн. дождь/снег, гроза, град
«Cb inc» (кучево-дождевые с накопительной)	Cb inc.	> 6 км	Кристаллическая	> 0,5	ливн. дождь/снег, гроза, град
«Ns» (слоисто-дождевые)	Ns, St fr., Cu fr.	1-5 км	Капельная, смешанная	До 1	Морось, сл., ум., сильн. дождь/снег
«l+h» (многослойная - верхняя над нижней)	Ci, Cs над Sc, Cu, Ns, St, Cb	> 5 км	Кристаллическая	>0,2	Морось, сл., ум., сильн. дождь/снег, гроза, град
«m+h» (многослойная - верхняя над средней)	Ci, Cs или As над Ac, Cu, As	> 5 км	Смешанная, кристаллическая	< 0,3	Невыпадают
«l+m» (многослойная- средняя над нижней)	Ac, As над Sc, Cu, Ns, St, Cb	2,5-6 км	Капельная, смешанная, кристаллическая	>0,2	Морось, сл., ум., сильн. дождь/снег, гроза, град

Визуальный анализ больших фрагментов классифицированных спутниковых изображений облачности с точки зрения соответствия выделяемых типов облачности синоптической ситуации, возможности сочетания определенных типов облачности друг с другом в реальных условиях, а также сопоставление с данными нефанализа подтверждают достоверность результатов классификации. Как правило, ошибки 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 фазового состояния воды на ВГО

Предикторы T4n, T4, t_a , t_{max} и (A1-A3) или T3 и (T3-T4), пороговые значения которых рассчитываются эмпирически в зависимости от высоты солнца, календарного дня и альбедо A1, позволяют разделить облачные пиксели на классы (классификация проводится с учетом типа облачности) в зависимости от фазового состояния воды в верхней части облачного слоя: «кристал-

личные», «жидко-капельные» и «смешанные» (которые разделяются на 2 подкласса: «преобладает вода в жидкой фазе» и «преобладают ледяные кристаллы»). Проверку достоверности подобной классификации осуществить затруднительно ввиду отсутствия регулярных наблюдений за фазовым составом воды в облачности и на ее верхней границе. Однако, по ряду косвенных признаков (соответствие детектированного фазового состава типу облака и реальной синоптической ситуации) можно сделать вывод о работоспособности предложенной процедуры определения фазового состава воды на ВГО.

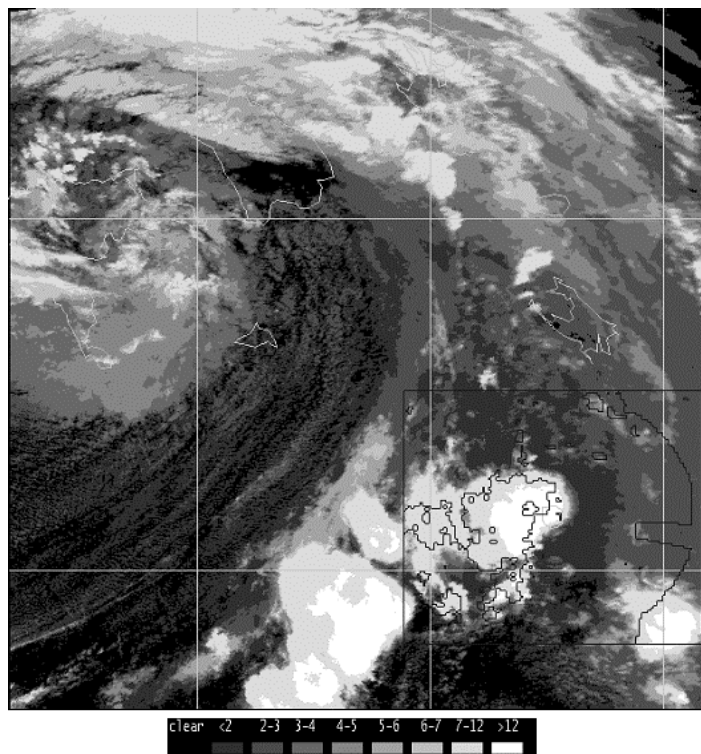


Рис. 2. Высота ВГО (м) (29 июля 2004 г., 12:03 МСВ) по градациям (см. шкалу цвета). Темная изолиния - наблюдения МРЛ (12:00 МСВ) за высотой ВГО ($h_{ВГО}=2000$ м)

Определение максимальной влажности облачного слоя

Сведения о максимальной влажности облачного слоя (W) необходимы для процедуры детектирования зон осадков и оценки их мгновенной интенсивности, а также для определения вероятности события «гроза» и «град» и оценок их интенсивности. Для определения W в методике используются предикторы $A1$, $A3$ или $T3$, $(A2-A1)$, $(T4-T5)$ и $(A1-A3)$ или $(T3-T4)$, пороговые значения которых вычисляются эмпирически в зависимости от высоты солнца и календарного дня. Дополнительно необходима информация о температуре воздуха на уровнях 850, 700, 500 и 400 гПа. Выделяется 8 классов: « $<0,1$ 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». Получаемые оценки W для соответствующих типов облачности и времени года достаточно хорошо согласуются с климатическими данными, синоптической ситуацией. Количественную валидацию спутниковых оценок влажности облаков организовать затруднительно ввиду отсутствия регулярных наблюдений этой величины.

Выделение зон осадков и определение их мгновенной интенсивности

Для детектирования зон осадков и определение их мгновенной интенсивности в комплексной методике используются предикторы А1, Т4, (Т4-Т5), (А2-А1), (А1-А3) или (Т3-Т4), пороговые значения которых рассчитываются эмпирически в зависимости от высоты солнца и календарного дня. Дополнительно используется информация о температуре воздуха на уровнях 850, 700, 500 и 400 гПа. При этом выделяются 8 классов: «без осадков», « $I < 1$ мм/ч», « $I = 1-3$ мм/ч», « $I = 3-5$ мм/ч», « $I = 5-8$ мм/ч», « $I = 8-15$ мм/ч», « $I = 15-25$ мм/ч», « $I > 25$ мм/ч». Интенсивность осадков назначается в мм/ч независимо от типа осадков.

При сопоставлении с наземными (качественными) наблюдениями за осадками фрагмент спутникового изображения размером 7×7 пикселей считался правильно отнесенным к классу «без осадков», если хотя бы один пиксел имел интенсивность 0 мм/ч и по наземным наблюдениям он также был причислен к классу «без осадков» (в противном случае детектирование признавалось ошибочным); к классу «слабые осадки», если хотя бы один пиксел фрагмента имел $I \leq 5$ мм/ч («слабые осадки» должны быть и по наземным данным); к классу «умеренные осадки» - с $I = 1-10$ мм/ч («умеренные осадки» отмечены и по наземным данным); к классу «сильные осадки» - с $I \geq 5$ мм/ч («сильные осадки» и по наземным данным); к классу «осадки», если хотя бы один пиксел имел $I > 0$ мм/ч (метеостанция тоже должна была регистрировать выпадение осадков в срок наблюдения). Такие допущения были приняты из-за того, что за время $dt = \pm 15$ мин облако может сместиться относительно наземного наблюдателя, а интенсивность осадков измениться; кроме того, по спутниковым данным детектируются осадки в облаке, а наземный наблюдатель регистрирует осадки у поверхности земли.

Сравнения спутниковых и наземных данных об осадках показывают, что в целом вероятность спутникового детектирования зон осадков достигает 90 %, вероятность выпадения осадков в пределах зоны осадков при этом составляет более 95 %, вне ее – менее 15 %. Вероятность детектирования осадков разной интенсивности превышает 80 %. При визуальном сопоставлении результатов детектирования осадков разной интенсивности для больших фрагментов спутникового изображения с результатами наземных радиолокационных наблюдений отмечено удовлетворительное совпадение контуров основных зон осадков.

Детектирование гроз и града

Методика позволяет детектировать зоны гроз и града в облаках, а также оценивать и определять их интенсивность и вероятность события. Анализу на возможность выпадения града и вероятность гроз подвергаются следующие типы облачности: Сb, Сb сар., Сb inc., I+m и I+h с высокими значениями максимальной водности (> 1 г/м³ – для града и $> 0,5$ г/м³ – для грозы). При этом для гроз и для града выделяется 4 класса: 1) отсутствие грозы или града (вероятность события 0 %); 2) слабая гроза или град (вероятность события более 50 %); 3) умеренная гроза или град (вероятность события более 70 %); 4) сильная гроза или град (вероятность события более 90 %). В качестве предикторных характеристик для детектирования гроз и града служат А1, Т4, (А2-А1), (Т4-Т5) и (Т3-Т4) или (А1-А3), пороговые значения которых зависят от высоты солнца и календарного дня. Результаты детектирования гроз и града хорошо согласуются с синоптической ситуацией и наземными наблюдениями на метеостанциях.

Заключение

Предлагаемая комплексная пороговая методика позволяет попиксельно с достаточно высокой точностью в автоматическом режиме детектировать облачность, определять ее количество, высоту ВГО, фазовый состав на ВГО и максимальную водность облачного слоя, а также выделять зоны осадков, гроз и града разной интенсивности в умеренных широтах в светлое время суток. Ме-

тодика использует данные измерений радиометра AVHRR любого ИСЗ серии NOAA, при этом может использовать как длинноволновые, так и коротковолновые измерения в канале 3 (предусмотрено автоматическое переключение с «температурного» на «альбедный» вариант). В качестве дополнительной информации используются поля температуры воздуха на стандартных уровнях в атмосфере, восстановленные по информации ИСЗ серии NOAA, либо аналогичные поля численного анализа или прогноза, близкие по времени к наблюдениям AVHRR/NOAA. Решающее правило (набор предикторных характеристик и порядок выполнения классификации) сохраняются неизменными в течение всего года. Эмпирические функции, описывающие изменение пороговых значений предикторных характеристик в зависимости от географического положения пиксела, календарного дня и высоты солнца, достаточно просто корректируются при переносе методики на любой «соседний» по долготам регион (кроме горного) в полосе 45-65° с.ш.

Литература

1. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Определение качества облачности по изображениям облачного покрова в видимом и инфракрасном диапазонах спектра с полярно-орбитальных ИСЗ // Метеорология и гидрология, 1998. №9. С.15-25.
2. 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.
3. Волкова Е.В. Определение типа облачности по данным измерений радиометра AVHRR ИСЗ NOAA для Европейского региона России в теплый период года // Тр. НИЦ «Планета». СПб.: Гидрометеоиздат, 2005. Вып. 1(46). С.22-41.
4. Соловьев В.И., Успенский А.Б., Кухарский А.В. Опыт регионального температурно-влажностного зондирования атмосферы по данным ИСЗ «NOAA» // Метеорология и гидрология, 2003. №3. С.38-46.
5. Музылев Е.Л., Успенский А.Б., Волкова Е.В., Старцева З.П. Использование спутниковой информации при моделировании вертикального тепло- и влагопереноса для речных водосборов // Исследование Земли из космоса, 2005. №4, С.35-44.
6. Dybbroe A., Karlsson K.-G., Moberg M., Thoss A. Scientific report for the SAFNWC. Mid Term Review// SAF/NWC/SMHI/MTR/SR, Issue 1.1, Sept. 2000. 166 pp.
7. LeGleau H., Derrien M. Nowcasting and very short range forecasting SAF. Prototype Scientific Description for Meteo-France/CMS // SAF/NWC/MFCMS/MTR/PSD, Issue 1, Rev.1, May 2000. 210 pp.