

Оценки параметров облачного покрова по данным геостационарного МИСЗ METEOSAT-9 круглосуточно в автоматическом режиме

Е.В. Волкова, А.Б. Успенский

*ГУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»
123242, Москва, Большой Предтеченский пер., д.7. Тел.: (499) 795-24-07.
E-mail: uspensky@planet.iitp.ru, quantocosa@bk.ru .*

Рассмотрена методика автоматической классификации данных измерений радиометра SEVIRI ИСЗ METEOSAT-9, позволяющая в круглосуточном режиме оценивать параметры облачного покрова и выделять зоны осадков и опасных явлений погоды разной интенсивности. Настройка и испытание методики проводились на материале архива синхронных спутниковых и наземных метеонаблюдений за облачностью и осадками для 2006-2009 гг. Приводятся оценки точности работоспособности методики для каждого детектируемого параметра. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 07-05-01030).

Ключевые слова: SEVIRI METEOSAT, облачность, интенсивность осадков, опасные явления погоды, тип облачности, ВГО, водность, обледенение

Введение

В данной работе рассматривается комплексная пороговая методика автоматического анализа данных измерений аппаратуры SEVIRI геостационарного МИСЗ METEOSAT-9, применяемая для детектирования параметров облачного покрова и осадков в умеренных широтах и тропиках в круглосуточном режиме в течение всего года независимо от типа подстилающей поверхности. На основе этой методики создана достаточно эффективная система спутникового мониторинга облачности, осадков и опасных погодных явлений, не требующая 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 макромасштабных процессов.

Исходные данные

Настройка и испытание методики проводились на материале архива синхронных спутниковых (SEVIRI/METEOSAT-9 и AVHRR/NOAA-18) и наземных (метеостанции) наблюдений для территории 69° с.ш.- 69° ю.ш. и 69° з.д.- 69° в.д. за 2006–2009 гг.

В качестве предикторов используются измерения радиометра SEVIRI в 11ти каналах [5], а также их разности. Их пороговые значения рассчитываются для каждого пикселя спутникового изображения как функции высоты солнца, календарного дня, приземной температуры воздуха, угла спутникового визирования, географической широты, высоты места над уровнем моря и др. Формулы расчета динамических порогов подбирались эмпирически на материале описанного выше архива.

Дополнительная информация включает извлекаемые из базы данных Гидрометцентра РФ результаты численного анализа (или прогноза) полей температуры и относительной влажности воздуха на стандартных барических уровнях, поля приземной температуры воздуха и атмосферного давления на уровне моря за 0 и 12 ч МСВ, заданные на сетке $2,5 \times 2,5^\circ$ по широте и долготе, а также цифровая карта рельефа.

Оценка работоспособности методики и верификация результатов осуществлялись путем визуального сравнения классифицированного изображения SEVIRI/METEOSAT-9 в исходной проекции с классифицированными изображениями AVHRR(3)/NOAA-18 (для территории ЕТР и Украины [1]), а также с исходными спутниковыми изображениями в отдельных каналах и наземными наблюдениями на метеостанциях за количеством общей облачности, высотой нижней границы облачности ($h_{НГО}$), интенсивностью и типом осадков, грозой и градом (за 0 и 12 ч МСВ). Дополнительно анализировалась синоптическая ситуация и использовалась справочная информация ВМО об основных типах облачности [3] и климатические данные [4]. Для таких параметров облачности, как фазовое состояние воды вблизи верхней границы облачности (ВГО), максимальная и суммарная водность облачного слоя, регулярные наземные наблюдения не проводятся. Косвенно о качестве спутниковых оценок этих параметров облачности можно судить по точности детектирования с их помощью зон осадков, грозы и града.

Описание методики и валидация результатов классификации

Детектирование облачности

Методика формирует маску «ясно-облачно», не требуя дополнительных сведений о состоянии подстилающей поверхности. В светлое время суток класс «безоблачно» подразделяется на 5 подклассов: «суша без снега», «вода», «снег/лед», «пыль» и «дым». Сопоставление результатов детектирования облачности по данным SEVIRI и AVHRR показывает, что описываемая методика хорошо детектирует крупные облачные массивы (см. рис. 1). Точность распознавания облачности практически не зависит от сезона и времени суток. Ошибки обычно связаны с наличием в атмосфере слоя с высоким влагосодержанием, температурной инверсией и снежно-ледовым покровом и обычно занимают не более 5 % площади всего изображения.

Определение температуры и высоты ВГО

Эмпирическим путем была получена функциональная зависимость для расчета температуры ВГО ($T_{ВГО}$) учитывающая ослабление ДВИ в атмосфере и вклад излучения подстилающей поверхности и нижележащей облачности. Далее, по значениям $T_{ВГО}$ с помощью барометрической формулы для политропной атмосферы производится расчет высоты ВГО ($h_{ВГО}$) над уровнем моря сначала в гПа, затем в метрах. Сопоставление оценок $h_{ВГО}$ с данными классификации облачности по типам, синоптической ситуацией, картами рельефа и аналогичными оценками $h_{ВГО}$ по данным AVHRR/NOAA [2] показывают удовлетворительное качество результатов спутникового зондирования. В большинстве случаев ошибки определения $h_{ВГО}$ не превосходят $\pm 10\%$ от полученного значения и не зависят от времени

суток и года, но сильно зависят от пространственного и временного разрешения дополнительной информации, оптической плотности облака и наличия температурной инверсии.

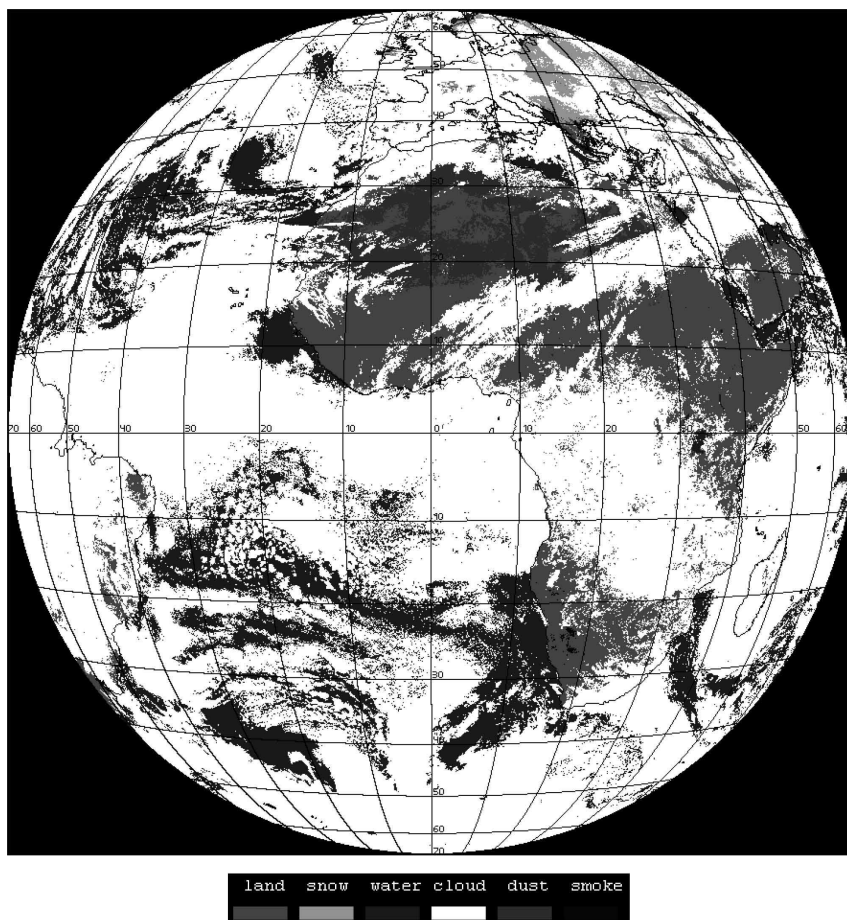


Рис. 1. Детектирование облачности и подстилающей поверхности в светлое время суток (3 января 2008 г., 11:45 МСВ, SEVIRI/METEOSAT-9). Обозначения: land – безоблачно/суша, snow – безоблачно/снег-лед, water – безоблачно/водоемы, cloud – облачно, dust – пыль в атмосфере, smoke – дым в атмосфере

Определение фазового состояния воды вблизи ВГО

Для разных типов облачности в зависимости от времени года, температуры и $h_{ВГО}$ может меняться фазовое состояние воды вблизи ВГО, т.е. соотношение облачных частиц в жидко-капельной и кристаллической формах. Методика выделяет 4 класса: «вода в жидкой фазе», «вода в твердой фазе», «смешанные, жидкая фаза преобладает» и «смешанные, твердая фаза преобладает». Косвенные оценки показывают, что ошибки определения фазового состояния воды в облачных частицах вблизи ВГО почти в 100 % случаев не превышают 1 соседний класс.

Определение максимальной водности облачного слоя

Методика выделяет 7 градаций значений максимальной водности облачного слоя: $<0,15$, $0,15-0,3$, $0,3-0,5$, $0,5-1$, $1-3$, $3-10$ и >10 г/м³. Получаемые оценки водности хорошо согласуются с климатическими данными для соответствующих типов облачности и времени года, а также синоптической ситуацией и результатами аналогичных оценок максимальной водности по данным AVHRR/NOAA. Косвенные оценки показывают, что ошибки

более чем в 85-90 % случаев не превышают ± 1 соседний класс и почти в 100 % случаев они менее ± 3 градаций. Ошибки обычно наблюдаются при больших углах спутникового визирования, анализе полей кучевообразной и слоисто-кучевой облачности (размеры облаков и просветов меньше размера пиксела) и многослойной облачности (экранирование нижней облачности верхней).

Классификация облачности по типам

При создании процедуры классификации использовалась информация ВМО об основных типах облачности и их подвидах [3]. Методика выделяет 13 классов облачности, в том числе 4 вида многослойной: перистая, высоко-слоистая, высоко-кучевая, слоистая (в т.ч. туман), кучевая и слоисто-кучевая, слоисто-дождевая, кучево-дождевая лысая, мощная кучево-дождевая с покровом перистой, мощная кучево-дождевая с наковальней, многослойная – перистая над кучевообразной, перистая над слоистообразной, перистая над облаками среднего яруса, высоко-слоистая над облаками нижнего яруса. Визуальный анализ классифицированных спутниковых изображений облачности на соответствие выделяемых типов облачности синоптической ситуации, а также сопоставление с данными нефанализа свидетельствуют об удовлетворительном качестве результатов классификации. Ошибочное детектирование имеет место на границах схожих классов и не более чем для 10 % всех облачных пикселей. Удовлетворительная точность классификации подтверждается также косвенно при распознавании зон осадков, грозы и града. Результаты классификации не зависят от времени суток, сезона и региона, но на них может влиять угол спутникового визирования и высота места над уровнем моря.

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 усредненную высоту. Оценки $h_{\text{НГО}}$ получают в методике косвенно для 4 градаций: $<1,5$, $1,5-3$, $3-5$ и >5 км, с использованием сведений о типе облачности, ее водности, $h_{\text{ВГО}}$ и др. Визуальное сопоставление результатов классификации с наземными метеонаблюдениями за $h_{\text{НГО}}$ и аналогичными оценками по данным AVHRR/NOAA показывает удовлетворительное качественное соответствие. Вероятность определения $h_{\text{НГО}}$ с точностью ± 1 градация превышает 98 % и зависит от времени года, типа облачности и пространственного и временного разрешения дополнительной информации и не зависит от времени суток и сезона.

Определение водозапаса облака

На водозапас облака (суммарная водность облачного слоя) влияют максимальная водность облачного слоя, тип и мощность облака и др. Методика выделяет 9 градаций водозапаса: $<0,5$, $0,5-1$, $1-2$, $2-5$, $5-10$, $10-25$, $25-50$, $50-100$ и >100 кг/м². Визуальный анализ классифицированных спутниковых изображений показывает хорошее соответствие выделяемых классов с реальной синоптической ситуацией, климатическими оценками и наблюдениями по данным AVHRR/NOAA. Согласно косвенным оценкам, более чем в 80 %

случаев ошибки не превышают ± 1 градацию и более чем в 90-95 % случаев ± 2 градации. Ошибки отмечаются при больших углах визирования, а также при наличии многослойной облачности и мелких кучевых облаков.

Выделение зон осадков и определение их мгновенной интенсивности

В методике зоны и мгновенная интенсивность осадков детектируются косвенно по информации о типе и водности облака, $h_{ВГО}$ и $h_{НГО}$, фазовом состоянии облачных частиц вблизи ВГО и др. Выделяются 8 градаций мгновенной интенсивности осадков: 0 («без осадков»), <0,5, 0,5-3, 3-10, 10-20, 20-50, 50-100 и >100 мм/ч. Интенсивность осадков назначается в мм/ч независимо от типа осадков, включая снег и град. Визуальный анализ классифицированных изображений показывает хорошее соответствие спутниковых оценок синоптической ситуации, наземным наблюдениям за осадками и оценкам интенсивности по данным AVHRR/NOAA. Вероятность выпадения осадков в пределах выделенной зоны осадков превышает 80-85 %, вне ее – менее 15-20 % в зависимости от времени года и региона. Расхождения спутниковой и наземной оценок не превышают ± 1 градацию интенсивности более чем в 85-90 % случаев и ± 2 градации более чем в 95 % случаев. Ошибки обычно возникают в холодный период года, в ночное время, при наличии температурных инверсий и больших углах спутникового визирования, а также в случаях с многослойной и некрупной кучевообразной облачностью.

Детектирование гроз

Методика детектирует зоны гроз и определяет их интенсивность и вероятность события. Выделяются 4 класса: 1) без грозы; 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. В целом, получаемые оценки вероятности и интенсивности гроз хорошо согласуются с синоптической ситуацией, наземными метеонаблюдениями и соответствующими оценками по информации AVHRR/NOAA. Качество оценок ухудшается с уменьшением масштаба явления и с увеличением угла визирования. В ночное время может происходить некоторое завышение размеров зон гроз слабой и умеренной интенсивности. В целом, вероятность распознавания грозового облака превышает 90 %. Ошибочное детектирование – не более 10-15 % в светлое время суток и до 30 % в темное. Вероятность потери грозовых облаков по спутниковым данным составляет менее 5-10 % и связано, в основном, с небольшими грозовыми облаками и слабой грозовой активностью.

Детектирование града

Методика детектирует зоны града в облаках и определяет вероятность его выпадения и интенсивность. Выделяется 4 класса: 1) без града; 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. Результаты классификации спутниковых изображений хорошо согласуются с синоптической ситуацией, наземными метеонаблюдениями и аналогичными оценками по данным AVHRR/NOAA. Качество результатов ухудшается с уменьшени-

ем масштаба явления и с увеличением угла визирования, а также в ночное время. Методика может несколько завышать зоны выпадения града. Однако, возможно, это обусловлено проблемой пространственно-временного сопоставления спутниковых и наземных наблюдений, а также высокой локальностью и малой продолжительностью этого явления.

Определение типа осадков у поверхности Земли

Методика выделяет 13 классов типа осадков: «без осадков», «слабый снег» ($I < 0,5$ мм/ч), «умеренный снег» ($I = 0,5-3$ мм/ч), «сильный снег» ($I \geq 3$ мм/ч), «мокрый снег», «ледяной дождь», «морось» ($I < 0,5$ мм/ч), «слабый дождь» ($I = 0,5-3$ мм/ч), «умеренный дождь» ($I = 3-10$ мм/ч), «сильный дождь» ($I = 10-20$ мм/ч), «сильный ливень» ($I \geq 20$ мм/ч), «град (с дождем, снегом или без них)» и «снежная крупа». Сопоставление спутниковых и наземных наблюдений за типом осадков показывает, что более чем в 80% случаев совпадают тип осадков – «дождь» или «снег». Ошибки возникают на границе раздела этих классов. При этом «ледяной дождь» чаще ошибочно детектируется как «дождь» или «мокрый снег», чем как «снег», а «мокрый снег» чаще ошибочно принимается за «снег», чем за «дождь». Наибольшие расхождения между наземными и спутниковыми оценками зафиксированы для класса «снежная крупа» (очень кратковременное явление): обычно этот класс ошибочно классифицируется как «снег». В целом, методика вполне пригодна для макромасштабных оценок типа осадков у поверхности земли. Точность детектирования сильно зависит от пространственного и временного разрешения дополнительной информации и от высоты места над уровнем моря и не зависит от времени суток.

Детектирование зон обледенения в облаках

Методика позволяет детектировать зоны обледенения в облаках (в т.ч. гололеда на поверхности земли), определять его интенсивность (слабое, умеренное и сильное) вероятность, а также рассчитывать высоты верхней и нижней границ слоя для каждой из интенсивности обледенения. Спутниковые оценки не дают количественных характеристик интенсивности обледенения, а характеризуют степень опасности облака в связи с возможностью обледенения поверхности летательного средства внутри него. Для расчета высоты (над уровнем моря) нижней и верхней границ слоя обледенения соответствующей интенсивности, как и при расчете $h_{ВГО}$, используется барометрическая формула для политропной атмосферы, при этом помимо положения изотерм внутри облака учитывается и его водность. Исследования показывают, что предложенная процедура вполне пригодна для создания достаточно эффективной системы спутникового мониторинга обледенения в облачном слое и у поверхности земли. Качество мониторинга не зависит от времени года и времени суток. Количественные оценки работоспособности методики не проводились из-за отсутствия регулярных наблюдений за обледенением.

Заключение

Комплексная пороговая методика вполне пригодна для макромасштабного кругло-суточного мониторинга параметров облачного покрова, осадков и опасных погодных яв-

лений в умеренных широтах и тропиках. Получаемые с ее помощью оценки являются площадными, т.е. средними для всего пиксела, в пределах которого могут встречаться участки облачности как с более высокими, так и низкими значениями. Точность методики несколько падает в темное время суток, при очень низких приземных температурах воздуха, наличии температурных инверсий, при больших углах спутникового визирования и в горных регионах. Качество оценок детектируемых параметров также сильно зависит от точности и пространственно-временного разрешения дополнительной информации, в т.ч. карты рельефа. Грубых ошибок выявлено не было. Программный пакет написан на языке ФОРТРАН. Время обработки полного спутникового изображения составляет 5-10 мин. Периодичность поступления информации – 15 мин.

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 // Четвертая Всероссийская открытая конференция. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Москва, 13-17 ноября 2006 г. Сб. научных статей. С. 65-73.
2. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Сравнительный анализ оценок высоты верхней границы облачности по данным радиометра AVHRR МИСЗ NOAA и метеорологического радиолокатора // Шестая Всероссийская открытая конференция. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Москва, 10-14 ноября 2008 г. Сб. научных статей. Т.2, С. 104-110.
3. Атлас облаков / Под ред. М.М.Ясногородской. // Л.: Гидрометиздат, 1978. 268 с.
4. Облака и облачная атмосфера. Справочник. / Под ред. И.П.Мазины и А.Х.Хргиана. // Л.: Гидрометиздат, 1989. 647 с.
5. Schmetz J., Pili P., Tjemkes S. et al. An introduction to Meteosat Second Generation (MSG)//Bull. Amer.Meteor. Soc., 2002. 83, P. 977-992

Estimation of cloud cover parameters from METEOSAT-9 geostationary meteorological satellite data for day and night time

E.V.Volkova, A.B.Uspensky

State Research Centre of Space Hydrometeorology "Planeta"

123242, Moscow, B. Predtechensky per., 7.

Tel.: (499) 795-24-07.

E-mail: uspensky@planet.iitp.ru, quantocosa@bk.ru .

The advanced threshold method for automatic pixel-by-pixel classification of SEVIRI/ METEOSAT-9 data has been developed that provides the estimation of cloud parameters as well as detection of precipitation zones together with some severe weather phenomena of various intensity for day and night time. The training and testing of the proposed technique have been carried out using the archive of synchronous satellite and ground-based meteorological data for the various dates of years 2006-2009. The validation results for each of derived cloud parameters are discussed.

Keywords: SEVIRI instrument, METEOSAT-9, clouds, precipitation intensity, severe weather phenomena, cloud type, cloud top height, cloud water contents