

Оценки параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным радиометра AVHRR с МИСЗ серии NOAA круглосуточно в автоматическом режиме

Е.В. Волкова

*ФГБУ НИЦ космической гидрометеорологии «Планета», Москва, Россия
E-mail: quantocosa@bk.ru*

Рассмотрена методика автоматической попиксельной классификации данных измерений радиометра AVHRR с МИСЗ серии NOAA, позволяющая в круглосуточном режиме оценивать параметры облачного покрова и выделять зоны осадков и опасных явлений погоды разной интенсивности в умеренных широтах. Настройка и испытание методики проводились на материале архива синхронных спутниковых и наземных метеонаблюдений за облачностью и осадками для 1998–2011 гг. Приводятся оценки точности работоспособности методики для каждого детектируемого параметра.

Ключевые слова: AVHRR, NOAA, облачность, облачная маска, водность облака, осадки, облачный анализ, высота верхней границы облачности, нефанализ.

Введение

В данной работе, продолжающей исследования (Волкова, Успенский, 2007), рассматривается комплексная пороговая методика (КПМ) автоматического анализа данных измерений радиометра AVHRR с полярно-орбитального МИСЗ серии NOAA, применяемая для детектирования параметров облачного покрова и осадков в умеренных широтах (Европейская территория России, Восточная Европа, Прибалтика и Украина) в круглосуточном режиме независимо от типа подстилающей поверхности. На основе КПМ создана достаточно эффективная система спутникового мониторинга облачности, осадков и опасных погодных явлений, не требующая больших вычислительных и информационных ресурсов. Получаемые с ее помощью данные можно рассматривать в качестве равноценной замены и дополнения существующей наземной наблюдательной метеосети, включающей в себя метеостанции и метеорологический радиолокатор (МРЛ), и использовать для решения ряда задач анализа и прогноза погоды, а также климатических исследований мезомасштабных процессов.

Исходные данные

Настройка и испытание КПМ проводились на материале архива синхронных спутниковых (радиометры AVHRR / NOAA и SEVIRI / Meteosat-9) и наземных (метеостанции, МРЛ) наблюдений для территории 46,7–63,0° с. ш. и 20,0–51,26° в. д. за 1998–2011 гг. В качестве предикторов используются измерения радиометра AVHRR в пяти каналах, а также их разности (Волкова, Успенский, 2007), пороговые значения которых рассчитываются для каждого пикселя спутникового изображения как функции высоты солнца, календарного дня, приземной температуры воздуха, географической широты, высоты места над уровнем моря и др. Формулы расчета динамических порогов подбирались эмпирически на материале описанного выше архива.

Дополнительная информация включает в себя извлекаемые из БД Гидрометцентра РФ результаты численного анализа (или прогноза) полей температуры воздуха на девяти стандартных барических уровнях, поля приземной температуры воздуха и атмосферного давления на уровне моря за 0 и 12 ч ГВ, заданные на сетке $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, а также цифровая карта рельефа (gtopo30).

Оценка работоспособности КПМ осуществлялись путем визуального сопоставления классифицированного изображения AVHRR / NOAA (разрешение: $df = 1'$ и $d\lambda = 1,5'$) с аналогичными классифицированными изображениями SEVIRI / Meteosat-9 (Волкова, Успенский, 2010), с наблюдениями на метеостанциях за количеством общей облачности (КОО), высотой нижней границы облачности ($h_{НГО}$), интенсивностью и типом осадков, грозой и градом (за 0 и 12 ч ГВ) и с наблюдениями МРЛ (Москва) за интенсивностью осадков и высотой верхней границы облачности ($h_{ВГО}$). Дополнительно анализировалась синоптическая ситуация и использовалась справочная информация ВМО об основных типах облачности (Ясногородская, 1978) и климатические данные (Мазин, Хргиан, 1989). Косвенно о качестве спутниковых оценок ряда параметров облачности можно также судить по точности детектирования в КПМ с их помощью зон осадков, грозы и града, валидация которых проводилась по наземным метеонаблюдениям.

В КПМ применяются косвенные методы оценки параметров облачного покрова, осадков и ОЯ. Соблюдается следующий строгий порядок выполнения классификации (так как параметры, полученные на предыдущих этапах, используются на последующих): облачная маска, температура на ВГО, высота ВГО, фазовое состояние воды в облачных частицах на уровне ВГО, максимальная водность облачного слоя, тип облачности, высота НГО, водозапас облачного слоя, зоны осадков и их интенсивность, зоны гроз и их интенсивность, зоны града и его интенсивность, тип осадков у поверхности земли, зоны обледенения разной интенсивности и высота верхней и нижней границы для каждой интенсивности обледенения, нефанализ.

В процессе классификации каждый пиксел изображения подвергается анализу на одновременное выполнение серии тестов, состоящих из 1–10 пороговых решающих правил. Порядок присвоения градаций интенсивности явления – от малых к большим. Набор решающих правил устанавливался автором как на основе известных положений (например, чем больше ВГО и водозапас облака, тем сильнее осадки), так и эмпирически полученных уравнений, в которые помимо прямых спутниковых измерений (радиационная температура и альbedo) входят высота ВГО и НГО, водность, водозапас и др. Подробнее см. в (Волкова, Успенский, 2007).

Описание методики и валидация результатов классификации

Детектирование облачности

КПМ формирует облачную маску без дополнительной информации о состоянии подстилающей поверхности. В светлое время суток класс «безоблачно» разделяется на три подкласса: «суша без снега», «вода», «снег / лед». Сопоставление результатов определения КОО

по данным AVHRR и на метеостанциях показывает (рис. 1), что КПМ несколько завышает КОО (в среднем на 0,5 окт.). Лучше всего детектируется класс «сплошная облачность», несколько хуже – «безоблачно» и наименее точно – отдельные градации разорванной облачности. КПМ детектирует облачную маску со средней точностью ± 1 окт. в 70–75% случаев, ± 2 окт. в 75–85% случаев. Точность классификации зависит от времени суток и года, синоптической ситуации и состояния подстилающей поверхности. Ошибок следует ожидать при наличии температурной инверсии или сильного приземного выхолаживания, в ночное или зимнее время, а также в горных районах, на границе суша / вода, над водоемами и снежно-ледовым покровом. Могут теряться тонкие Ci и As и отдельные мелкие Cu и Ac. Суммарные ошибки детектирования облачной маски никогда не превосходят 15–20% площади всего спутникового изображения, в подавляющем большинстве случаев они составляют менее 5–10%.

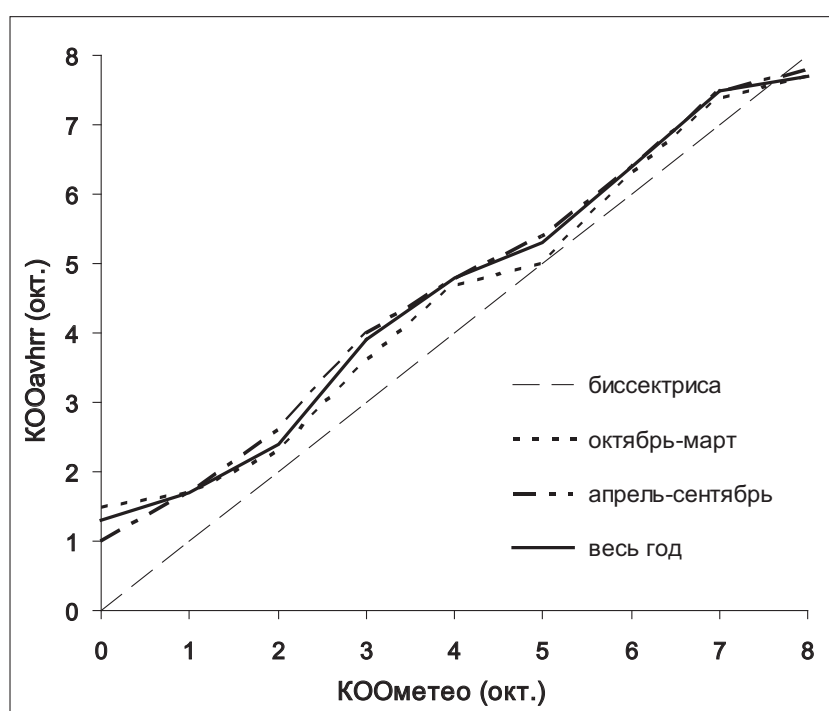


Рис. 1. Сопоставление оценок количества общей облачности (КОО, окт.) по спутниковым (KOO_{AVHRR}) и наземным (KOO_{METEO}) наблюдениям на метеостанциях

Примечание. 1 октан = 12,5% покрытия облачностью небосвода.

Определение температуры и высоты ВГО

Процедура определения температуры ВГО ($T_{ВГО}$) и $h_{ВГО}$ подробно описана в (Волкова, Успенский, 2009). Получаемые КПМ средние, минимальные и максимальные оценки $h_{ВГО}$ для основных классов облачности хорошо согласуются с климатологией и наблюдениями МРЛ для соответствующих типов облачности. Ошибки определения $h_{ВГО}$ обычно не превосходят ± 10 –15% полученного значения и не зависят от времени суток и года, но на них влияют оптическая плотность облака и наличие температурной инверсии, а также пространственно-временное разрешение дополнительной информации.

Определение фазового состояния воды в слое вблизи ВГО

Для разных типов облачности в зависимости от времени года, $T_{\text{ВГО}}$ и $h_{\text{ВГО}}$ может меняться фазовое состояние воды в облачных частицах в слое вблизи ВГО, т.е. соотношение облачных частиц в жидко-капельной и кристаллической формах. КПМ выделяет четыре класса: «вода в жидкой фазе», «вода в твердой фазе», «смешанные, жидкая фаза преобладает» и «смешанные, твердая фаза преобладает». Косвенные оценки показывают, что ошибки почти всегда не превышают 1-й класс. Фаза воды может неточно определяться для очень мелких C_u и A_s , тонких C_i и A_s (в т.ч. в составе многослойной облачности) при наличии небольших просветов в многослойной облачности и на краях облачных массивов.

Определение максимальной водности облачного слоя

КПМ по косвенным признакам выделяет восемь градаций значений максимальной водности облачного слоя: $< 0,1$, $0,1-0,2$, $0,2-0,3$, $0,3-0,5$, $0,5-1$, $1-3$, $3-5$ и > 5 г/м³. Результаты классификации хорошо согласуются с климатическими данными для соответствующих типов облачности и времени года, а также с синоптической ситуацией. Косвенные оценки показывают, что ошибки более чем в 80–90% случаев не превышают ± 1 -й класс и в $\sim 95\%$ случаев – ± 2 -го класса. Качество оценок сильно зависит от точности дополнительной информации и может несколько падать при низком положении солнца и над водоемами, а также при анализе полей мелких C_u , S_c и A_s , если размеры облаков и просветов сопоставимы с размером элемента спутникового разрешения, и у многослойной облачности из-за экранирования верхней облачностью нижней.

Классификация облачности по типам

КПМ выделяет 13 классов облачности (в т.ч. четыре вида многослойной и три стадии развития мощной кучево-дождевой) в соответствии с классификацией ВМО: $C_i C_s$, A_s , $A_c C_u$, St , $C_u S_c$, $N_s C_b$, $C_b calv.$, $C_b cap.$, $C_b inc.$, многослойная – C_i над C_b , $C_s A_s N_s$, C_i над облаками среднего яруса, A_s над облаками нижнего яруса. Визуальный анализ классифицированных спутниковых изображений на соответствие выделенных типов облачности синоптической ситуации и возможность сочетания определенных типов облачности друг с другом, а также сопоставление с данными нефанализа свидетельствуют о хорошем качестве результатов классификации. Высокая точность подтверждается также и косвенно при дальнейшем детектировании в КПМ зон осадков, грозы и града. Ошибки распознавания отмечаются на границах схожих классов и на краях облачных массивов, но не более чем для 10–15% всех облачных пикселей спутникового изображения. Результаты классификации не зависят от времени суток и сезона, но на них могут влиять высота места над уровнем моря, наличие водоема и точность дополнительной информации.

Нефанализ

Нефанализ содержит сведения о среднем количестве и преобладающей форме облаков для некоторой территории. Для небольших фрагментов изображения размером 5 x 5 пикселей, КПМ рассчитывает КОО по четырем градациям: безоблачно (0%), небольшая (0–50%), значительная (50–100%) и сплошная облачность (100%), и определяет преобладающий тип или сочетание типов облачности (9 классов): Ci, StAs, Cu, Sc, Cb, CuAs, CbCi, ScCi, CuAsCs. Сопоставление спутниковых оценок с «традиционными» картами нефанализа показывает хорошее соответствие как по типу облачности, так и по его количеству.

Определение высоты НГО

Высота НГО в КПМ вычисляется косвенно как высота основания облака над подстилающей поверхностью для 4х градаций: < 1,5, 1,5–3, 3–5 и > 5 км. Визуальное сопоставление результатов классификации с реальной синоптической ситуацией и количественное с наземными метеонаблюдениями за $h_{\text{НГО}}$ показывает, что вероятность правильного определения каждой градации $h_{\text{НГО}}$ превышает 75–85% и зависит от времени года и суток, типа облачности и точности дополнительной информации. Почти всегда ошибки не превышают ± 1 градацию. Средняя вероятность правильного распознавания класса « $h_{\text{НГО}} \leq 1,5$ км» составляет 97,5%, а класса « $h_{\text{НГО}} > 1,5$ км» – 80% при сопоставлении с наземными наблюдениями на метеостанциях. Наиболее часто ошибки отмечаются при определении $h_{\text{НГО}}$ у многослойной облачности и на краях облачного массива, в горных районах и над водоемами.

Определение водозапаса облака

Получаемые КПМ оценки водозапаса включают в себя всю воду, независимо от фазы, содержащуюся в вертикальном столбе внутри облака, и являются максимальными для площади рассматриваемого пиксела спутникового изображения. Выделяются восемь градаций водозапаса: < 0,1, 0,1–0,5, 0,5–1, 1–2, 2–5, 5–10, 10–25 и > 25 кг/м². Визуальный анализ классифицированных спутниковых изображений показывает хорошее соответствие выделяемых классов реальной синоптической ситуации и климатическим оценкам для соответствующих типов облачности и времени года. Согласно косвенным оценкам, более чем в 80–85% случаев ошибки не превышают ± 1 градацию и более чем в 90–95% случаев ± 2 градации. Неточности возникают при анализе полей многослойной облачности и мелких Cu, а также над водоемами.

Выделение зон осадков и определение их мгновенной интенсивности

В КПМ зоны и мгновенная максимальная интенсивность (I_{max}) осадков детектируются косвенно. Выделяются девять градаций I_{max} независимо от типа осадков: 0 («без осадков»), < 1,1–3, 3–8, 8–15, 15–25, 25–50, 50–100 и > 100 мм/ч. Визуальный анализ

классифицированных изображений показывает хорошее соответствие спутниковых оценок синоптической ситуации, климатологии и наземным (МРЛ и метео-) наблюдениям за интенсивностью осадков. Значения I_{\max} имеют хорошо выраженный сезонный, суточный и широтный ход. Однако в теплый период года может наблюдаться некоторое занижение значений I_{\max} из небольших C_u , а в холодный период – небольшое завышение из многослойной облачности.

Количественное сопоставление с наблюдениями на метеостанциях и МРЛ показывает, что в среднем вероятность правильного детектирования зон осадков составляет 95%, без осадков – 90%. При этом вероятность выпадения осадков в пределах выделенной зоны осадков равна 95%, вне ее – не более 15–20%. Суммарная ошибка – не более 10%. Вероятность правильного детектирования классов «слабые», «умеренные» и «сильные осадки» составляет соответственно 85%, 80% и 50–80%. В теплый период года (особенно днем) точность детектирования зон осадков выше, чем в холодный период года. Слабые осадки распознаются лучше в холодный период года и ночью, а умеренные и сильные осадки – в теплый период года и днем. На качество детектирования зон осадков (особенно слабых и умеренных) сильно влияет точность дополнительной информации.

Детектирование гроз

КПМ детектирует зоны гроз и определяет их интенсивность и вероятность события. Выделяются четыре 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 умеренной интенсивности, но может быть слабой или сильной; 4) вероятность грозы около 100%, при этом гроза скорее сильная и вряд ли слабая. В целом получаемые оценки вероятности и интенсивности гроз хорошо согласуются с синоптической ситуацией, наземными метеонаблюдениями и климатологией. Вероятность правильного распознавания грозового облака превышает 85% летом днем. Потери гроз не превышают 10–20%. Качество детектирования грозовых облаков сильно зависит от точности дополнительной информации и ухудшается с уменьшением масштаба и интенсивности явления. Ночью и в холодный период года может происходить некоторое завышение размеров зон гроз слабой и умеренной интенсивности.

Детектирование града

КПМ детектирует зоны града в облаках и определяет вероятность его выпадения и интенсивность. Выделяются четыре 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 более 90%, град умеренный или сильный. В целом результаты классификации градоносных облаков вполне удовлетворительно согласуются с синоптической ситуацией, наземными

метеонаблюдениями и климатологией. Качество результатов несколько ухудшается с уменьшением масштаба и интенсивности явления, а также в ночное время. По сравнению с наземными метеонаблюдениями КППМ несколько завышает размеры и количество градоносных облаков из-за высокой локальности и малой продолжительности явления «град у поверхности земли». В ночное время и холодный период года может отмечаться некоторое ошибочное завышение размеров и количества градоносных облаков и града слабой / умеренной интенсивности. Точность классификации сильно зависит от точности дополнительной информации.

Определение типа осадков у поверхности Земли

КППМ детектирует 13 классов типа осадков у поверхности земли: «без осадков», «слабый снег», «умеренный снег», «сильный снег», «мокрый снег / снег + дождь», «ледяной дождь», «морось», «слабый дождь», «умеренный дождь», «сильный дождь», «сильный ливень», «град (с осадками или без)» и «снежная крупа». Сопоставление результатов классификации с синоптической ситуацией, климатологией и наземными наблюдениями за типом осадков показывает хорошую точность КППМ. В целом с уменьшением количества классов осадков (за счет их объединения) увеличивается точность классификации по КППМ при сопоставлении с наземными наблюдениями. Так, вероятность правильного распознавания (POD) трех основных классов «снег», «дождь» и «мокрый снег / снег + дождь / крупа» достигает соответственно 85, 85 и 25%. Чем локальнее и кратковременнее явление, тем ниже значения POD для него получаются. Так, значения POD для классов «слабый снег», «умеренный снег», «слабый дождь» и «умеренный дождь» достигают 70%, для классов «морось» и «сильный дождь» – не более 50%, а для классов «сильный снег», «ливень» и «град» – до 30%. Для класса «снежная крупа» значения POD не превышают 20%, для класса «мокрый снег / снег + дождь» – 10%, а для класса «ледяной дождь» – 5%.

Таким образом, КППМ вполне пригодна для мезомасштабных наблюдений за типом осадков. Ее точность практически не зависит от времени суток, но может зависеть от высоты места над уровнем моря и времени года, а также пространственно-временного разрешения и точности дополнительной информации. Наиболее часто ошибки возникают на границе раздела зон выпадения дождя и снега и связанных с ними переходными типами осадков.

Детектирование зон обледенения в облаках

КППМ детектирует зоны обледенения в облаках (в т.ч. гололед на поверхности земли), определяет его интенсивность (слабое, умеренное и сильное) и рассчитывает высоту верхней и нижней границ слоя для каждой интенсивности обледенения. Получаемые спутниковые оценки не дают количественных характеристик обледенения, а лишь характеризуют степень опасности облака в связи с возможностью процесса обледенения поверхности

летательного средства внутри него. Исследования показывают, что предложенная процедура вполне пригодна для создания достаточно эффективной системы спутникового мониторинга облечения в облачном слое и у поверхности земли. Качество мониторинга не зависит от времени года и суток, но на нее влияет точность дополнительной информации. Количественные оценки работоспособности КПМ не проводились из-за отсутствия регулярных наземных и авианаблюдений за облечением.

Заключение

Представленная в работе КПМ вполне пригодна для мезомасштабного круглосуточного мониторинга параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды в умеренных широтах. 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 с низкими значениями. Точность КПМ несколько падает в темное время суток и холодное время года, при очень низких приземных температурах воздуха, наличии температурных инверсий, над водоёмами и в горах (выше 1 км). Качество оценок детектируемых параметров зависит от типа облачности и синоптической ситуации, а также от точности и пространственно-временного разрешения дополнительной информации. Грубых ошибок выявлено не было.

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. 2007. Вып. 4. Т. 2. С. 65–73.
2. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Оценки параметров облачного покрова по данным геостационарного МИСЗ Meteosat-9 круглосуточно в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 16–22.
3. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Сравнительный анализ оценок высоты верхней границы облачности по данным радиометра AVHRR МИСЗ NOAA и метеорологического радиолокатора // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Вып. 6. Т. 2. С. 104–110.
4. Мазин И.П., Хргиан А.Х. Облака и облачная атмосфера: Справочник. Л.: Гидрометиздат, 1989. 647 с.
5. Ясногородская М.М. Атлас облаков. Л.: Гидрометиздат, 1978. 268 с.

Automatic estimation of cloud cover and precipitation parameters obtained by AVHRR NOAA for day and night conditions

E.V. Volkova

Planeta State Research Centre of Space Hydrometeorology, Moscow, Russia

E-mail: quantocosa@bk.ru

A complicated threshold method of automatic pixel-by-pixel classification of AVHRR NOAA data separates cloud and cloud-free pixels and determines precipitation and weather disaster areas of various intensity for day and night all year round conditions in temperate zones above land, water, snow. The method utilizes empirically derived equations and additional data of air temperature vertical distribution and atmosphere pressure at sea level. The method was tested on the satellite, climatological and ground-based meteorological and radar data archived for the region 46.7–63.0°N, 20.0–51.3°E in 1998–2011. The assessments of all derived cloud parameters show a good correlation with the average climatological and WMO estimations as well as with radar and meteorological cloud and precipitation ground-based observations. The method can be efficiently used for cloud, precipitation and disaster real-time observation and climatic investigation.

Keywords: AVHRR NOAA, cloud mask, precipitation intensity, thunderstorm, cloud analysis, cloud water contents, cloud top height.