

А.А. Косторная, М.Г. Захватов, Ю.В. Токарева

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДИКИ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ОБЛАЧНОГО ПОКРОВА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Введение

Выделение и определение типов облачности на исходных космических изображениях — непростая задача. В руководящем документе РД 52.27.339-93 определены общие правила использования спутниковых изображений для диагноза и прогноза опасных и особо опасных осадков, града и шквалов. Согласно этому документу, основными дешифровочными признаками, позволяющими различать изображение облаков разного типа, являются тон и рисунок изображения [7]. Для дешифрирования облачности на спутниковом изображении специалист-метеоролог должен обладать глубокими знаниями, применять вспомогательные материалы, а также понимать региональные климатические особенности. Но и в этом случае не исключены ошибки визуальной интерпретации снимка из-за неверного восприятия изображения.

Закономерный шаг в развитии спутниковой метеорологии — автоматизация процесса дешифрирования космических снимков облачности [4, 5]. Первые технологии автоматического восстановления количественных характеристик облачного покрова имели низкую оправдываемость ввиду отсутствия учета физических процессов, протекающих в атмосфере. Последующие исследования и наработки в области динамики и физики атмосферы (в том числе микрофизики облаков и осадков) и развитие космической техники способствовали созданию современных научных алгоритмов, позволяющих с хорошей достоверностью детектировать облачность и оценивать ее параметры.

Краткое описание методики

Методика дешифрирования облачности и расчета ее характеристик позволяет предоставлять специалистам тематические продукты на основе спутниковых данных – карты классификации облачности, высоты (км) и температуры (°С) верхней границы облаков (ВГО). Предикторами являются измеренные спутниковым радиометром спектральные характеристики объектов. Кроме того, используется значительный объем дополнительных данных: численный прогноз погоды NCEP, цифровые маски водоемов, пустынь и т. п.

Процесс дешифрирования облачного покрова методикой многоэтапный: при поступлении спутниковой информации происходит последовательный запуск алгоритмов, выполняющих классификацию и восстановление количественных характеристик облачности.

На первом этапе производится обнаружение облачности; построение маски облачности. Алгоритм построения маски облачности основан на байесовском классификаторе, после выполнения которого с помощью пороговых значений апостериорной вероятности формируется четырехуровневая маска облачности со значениями: ясно, возможно ясно, облачно и возможно облачно [8].

После процедуры обнаружения облачности запускается алгоритм определения типа облачности и ее фазового состояния. Каждый пиксель изображения классифицируется в одну из семи категорий: туман, облака капельно-жидкого строения (подразделяются на «теплые» и «холодные» по значениям яркостной температуры в канале прозрачности атмосферы 11 мкм), облака смешанного строения (состоящие из воды и льда), облака конвекции (развитые по вертикали облака с большой оптической толщиной), многослойная облачность (высоко расположенные облака над более низкими ярусами) и перистая облачность (прозрачная кристаллическая облачность с малой оптической толщиной).

Третий этап определяет характеристики облачности: высоту и температуру ВГО. Расчет производится только для пикселей, ранее определенных как облачные. Используя измеренное радиометром уходящее тепловое излучение в каналах прозрачности атмосферы (11 и 12 мкм), происходит восстановление значений температуры ВГО с помощью регрессионной зависимости.

На следующем этапе происходит определение оптических и микрофизических свойств облака на пикселях дневного периода. Такими в алгоритме считаются пиксели с солнечным зенитным углом $\leq 65^\circ$. Алгоритм основан на стандартном биспектральном подходе к оценке величин оптической толщины облака и эффективного радиуса частиц, используя каналы 0,65 и 3,7 мкм. Значения параметров восстанавливаются на основе регрессионной зависимости. Входными данными алгоритма являются атмосферные профили NCEP (температура, содержание водяного пара и озона по высотам), результаты расчетов прошлых алгоритмов (облачная маска, информация о фазовом состоянии облака и температуре его верхней границы) и таблицы априорных значений оптических параметров облака (коэффициенты излучения, отражения и пр.). Оптические и микрофизические свойства облачности дают важную информацию о степени ее развития и мощности [8].

Завершающий этап производит подробную морфологическую классификацию облачности с помощью порогового метода, который в качестве входных параметров использует выходные данные предыдущих этапов выполнения методики. При создании алгоритма классификации использовалась информация ВМО об основных типах облачности и их подвидах, пороговые значения величин высоты облачности брались из справочной литературы [6], а также с учетом пороговых значений и разделений классов облачности методикой Е.В. Волковой [2, 3].

Выделенные классы облачности несколько отличаются от принятых в других методиках дешифрирования облачного покрова. Данное обстоятельство вызвано особенностью дешифрирования спутниковой информации данной методикой. Полученные классы облачности и соответствующие им типы приведены в табл. 1.

Методика испытаний

Методика дешифрирования облачности реализована на данных спутников NOAA-19, NOAA-18, NOAA-15 и MetOp-B, позволяющих создать продукцию по испытываемой методике 24 раза в сутки с запаздыванием не более 15 минут от срока съемки. Продукты, получаемые методикой, сопоставлялись с аналогичными данными, полученными радиолокационным методом на основе доплеровского метеолокатора.

Таблица 1

Классификация облачности

	Ci+Cb	Ci+med	Ci; Cs; Cc	Ac; Cu	Sc; Cu
Обозначение класса облачности на карте					
Описание типов облачности	Многослоистая облачность, верхний ярус (Ci, Cs) над облачным слоем более низкого яруса (Cu, Ns)	Многослоистая облачность, верхний ярус (Ci) над средним или нижним ярусом (St, As, Sc, Ac)	Класс перистообразных (Ci, Cs, Cc)	Преимущественно Ac, отдельные мало-мощные Cu или плотные As	Преимущественно Sc, небольшой мощностью Cu и иногда Ac
Обозначение класса облачности на карте	Ns; Cb	St; As	Low+As	Cb cap; Cb calv	Cb inc
Описание типов облачности	Ns, мощные Cu cong., Cb hum	As (в теплое время года), St, Sc, низкие Ac	Многослоистая облачность, нижний ярус – Ns, St, Sc, Cu под As, реже Ac	Помимо Cb cap и Cb calv, мощные Cu cong	Кучево-дождевые облака с наковальной

Испытание продуктов методики проводилось Западно-Сибирским филиалом ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» с 1 июня 2015 г. по 11 мая 2016 г. Учитывая особенности и ограничения радиолокационного метода, привлекалась вспомогательная информация: синоптические карты погоды, карты нефанализа и данные бортовой погоды. Сравнению подвергались параметры облачности над территорией обзора Барабинского ДМРЛ-С. Карты классификации облачности и высоты верхней границы облачности, полученные на основе информации со спутников NOAA-19, NOAA-18, NOAA-15 и MetOp-B в сроки, наиболее близкие к времени пролета спутника над территорией наблюдения, сравнивались с данными ДМРЛ-С. В сводной таблице дежурным синоптиком указывались дата и время сеанса, спутник, средние значения высот по территории охвата ДМРЛ-С (или интервалы высот), рассчитанные методикой и определенные ДМРЛ-С. При сравнении учитывалось, что границы массивов облачности на картах дешифрирования могут отличаться от данных ДМРЛ-С по причине различного пространственного разрешения выходной продукции.

Проводилось сравнение типов облачности и высоты верхней границы облачности, как по отдельности независимо друг от друга, так и в совокупности (должно быть наличие обоих продуктов методики в рассматриваемый срок). 1 – присваивалась при полном совпадении данных методики и данных ДМРЛ-С, 0 – при полном расхождении данных методики и данных ДМРЛ-С.

Дополнительная оценка точности расчета методикой параметров ВГО (высоты и температуры) была проведена на основе лидара CALIOP КА CALIPSO. Данная оценка рассматривалась как авторское испытание. Лидар CALIOP позволяет получать вертикальные профили рассеяния излучения от облачности и количественные параметры обнаруженных облачных и аэрозольных слоев [8, 9]. Для проведения сравнения использовались данные лидара в форматах level1 и level2, а исходными данными испытываемой методики были данные радиометра AVHRR КА NOAA-19.

Результаты испытаний

С целью определения степени достоверности конечных продуктов методики были проведены разнохарактерные оценки качества ее результатов.

Первичная оценка качества рассчитанных параметров проводилась на основе данных наземной наблюдательной сети с помощью приземных карт погоды за ближайшие сроки. В глобальном масштабе оценивалась точность обнаружения методикой облачности холодных фронтов первого и второго рода, фронтов окклюзии, теплых секторов циклонов, циклонов в различных стадиях развития, высотных ложбин и гребней, выявленных по синоптическим картам. В мезомасштабе с данными методики сравнивались типы и формы облачности, указанные на станциях наблюдателями, а также привлекались косвенные признаки облачности (зоны осадков различной интенсивности, гроз, шквалов и пр.). Продукты методики при сопоставлении с данными метеонаблюдений показали высокую достоверность: на картах дешифрирования прослеживаются основные барические образования, наиболее мощная облачность наблюдается вдоль линий фронтов, типы облачности в большинстве случаев совпадают с наблюдаемыми на станциях, кучево-дождевым формам облачности соответствуют области осадков и пр.

Период испытаний составил 346 дней. Сравнению подверглись данные за 212 дней. Сравнение не проводилось в случае: отсутствия облачности (ясная погода) над территорией наблюдения ДМРЛ-С в момент анализа (108 дней); отсутствия данных методики / ДМРЛ-С (12 дней); по каким-либо другим причинам (14 дней). Подробней сведения о выборке данных представлены в табл. 2 и 3.

Было произведено 546 сравнений данных по высоте ВГО и 384 сравнения классификации облачности (т. е. было произведено 384 сравнений продуктов в совокупности). Для алгоритма классификации облачности необходима информация в каналах 0,6 и 3,7 мкм, доступных только в дневное время при зенитном угле Солнца не более 65°. Продолжительность светового дня в зимние месяцы составляет не более 7–9 часов. В 162 сроках (из 546, т. е. в 30 % данных) информация в дневных каналах отсутствует, а следовательно, отсутствуют и карты классификации облачности, поэтому проанализированных данных по классификации облачности меньше, чем по ВГО.

За весь анализируемый период количество сроков с соответствием данных методики данным ДМРЛ-С (наличие и совпадение двух продуктов методики – ВГО и типизации) составляет 83,1 % от числа сроков с сравнением (319 из 384 сроков).

Таблица 2

Сведения о выборке данных дешифрирования облачности по спутниковым данным, используемых в оперативных испытаниях в период июнь 2015 – май 2016 гг.

Период испытаний (месяц)	Общее количество дней в месяце, доступных для проведения анализа	Количество дней / %					общее количество дней с непроведённым сравнением
		с проведённым сравнением облачности	с непроведённым сравнением облачности по причине ее отсутствия	с непроведённым сравнением по причине отсутствия данных методики / ДМРД-С	с непроведённым сравнением по другим причинам*		
июнь	30	30 / 100	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0
июль	31	23 / 74	7 / 23	1 / 3	0 / 0	0 / 0	8 / 26
август	31	23 / 74	8 / 26	0 / 0	0 / 0	0 / 0	8 / 26
сентябрь	30	21 / 70	9 / 30	0 / 0	0 / 0	0 / 0	9 / 30
октябрь	31	25 / 81	6 / 19	0 / 0	0 / 0	0 / 0	6 / 19
ноябрь	30	13 / 43	12 / 40	2 / 7	3 / 10	3 / 10	17 / 57
декабрь	31	13 / 42	12 / 39	2 / 6	4 / 13	4 / 13	18 / 58
январь	31	11 / 35	18 / 58	2 / 6	0 / 0	0 / 0	20 / 65
февраль	29	10 / 34	11 / 38	5 / 17	3 / 10	3 / 10	19 / 66
март	31	14 / 45	16 / 52	0 / 0	1 / 3	1 / 3	17 / 55
апрель	30	23 / 77	6 / 20	0 / 0	1 / 3	1 / 3	7 / 23
май	11	6 / 55	3 / 27	0 / 0	2 / 18	2 / 18	5 / 45
общее количество	346	212 / 61	108 / 31	12 / 3	14 / 4	14 / 4	134 / 39

Примечание. * – повышенная загруженность смены синоптиков, либо технические неполадки рабочего компьютера синоптика.

Таблица сопряженности для оценки результатов дешифрирования облачности (наличие, отсутствие) по спутниковым данным методикой в период июнь 2015 г. – май 2016 г.

Данные методики (количество дней)	Данные ДМРЛ-С (количество дней)			Отсутствие данных по другим причинам*	Сумма
	наличие облачности	отсутствие облачности	нет данных (сбои)		
наличие облачности	212	0	10	0	222
отсутствие облачности	0	108	0	0	108
нет данных (сбои)	2	0	0	0	2
Отсутствие данных по другим причинам*	0	0	0	14	14
Сумма	214	108	10	14	346

Примечание. * – повышенная загруженность смены синоптиков, либо технические неполадки рабочего компьютера синоптика.

Количество сроков с расхождением в данных составляет 1,3 % (5 из 384 сроков). Типы облачности на картах классификации методики совпадают с типами облачности ДМРЛ-С в 96,9 % случаев. Оправдываемость ВГО – 80,2 %. Более подробные результаты сравнения представлены в табл. 4.

Результаты испытаний показали, что в переходные сезоны и летний период (март–октябрь) данные дешифрирования по методике согласуются с данными радиолокационных наблюдений без существенных отклонений (оправдываемость до 98–100 %). Точность расчета параметров облачности уменьшается при падении температуры воздуха у подстилающей поверхности и установлении снежного покрова, затрудняющего обнаружение облачности. В среднем на 6 % уменьшается точность определения типов облачности и на 19 % точность определения параметров ВГО.

В рамках испытаний при сравнении с данными ДМРЛ-С был проведен анализ синоптических условий, при которых отмечается

Таблица 4

Результаты сравнения данных дешифрирования облачности (ВГО и типизации облачности) методикой с данными ДМРЛ «Барабинск» по месяцам в период испытаний июнь 2015 г. – май 2016г.

Период испытаний, месяц	Количество дней / сроков сравнения	Оправдываемость при сравнении с данными ДМРЛ-С				Колличество сроков / % с ложной облачностью		
		ВГО		типизации облачности				
		общее количество сроков	количество сроков / % с соответствием	общее количество сроков	количество сроков / % с соответствием			
Июнь	30 / 74	74	58 / 78	74	71 / 96	56 / 76	1 / 1	0 / 0
Июль	23 / 62	62	48 / 77	62	57 / 92	44 / 71	1 / 2	0 / 0
Август	23 / 65	65	61 / 94	65	64 / 98	60 / 92	0 / 0	0 / 0
Сентябрь	21 / 57	57	47 / 82	42	42 / 100	39 / 93	0 / 0	0 / 0
Октябрь	25 / 60	60	45 / 75	30	30 / 100	25 / 83	0 / 0	0 / 0
Ноябрь	13 / 34	34	22 / 65	11	10 / 91	7 / 64	1 / 9	0 / 0
Декабрь	13 / 28	28	22 / 79	8	7 / 88	7 / 88	1 / 12	3 / 0,5
Январь	11 / 25	25	12 / 48	10	9 / 90	5 / 50	1 / 10	4 / 0,7
Февраль	10 / 22	22	15 / 68	6	6 / 100	5 / 83	0 / 0	2 / 0,4
Март	14 / 29	29	26 / 90	16	16 / 100	16 / 100	0 / 0	0 / 0
Апрель	23 / 65	65	63 / 97	45	45 / 100	44 / 98	0 / 0	0 / 0
Май	6 / 25	25	19 / 76	15	15 / 100	12 / 80	0 / 0	0 / 0

«ложное» детектирование облачности. На текущий день автоматической системой дешифрирования облачности не решена проблема «ложного» детектирования в зимний период. Низкие значения температуры заснеженной поверхности создают сложности для алгоритма построения маски облачности, так как снежный покров имеет высокое альbedo и может быть ошибочно принят за облачность. Выявлены условия погоды, при которых методика имеет тенденцию к ложному детектированию облачности в зимний период:

- при температурах воздуха у подстилающей поверхности ниже -21°C (особенно при резких ночных понижениях) в антициклонах, сформированных в холодных воздушных массах;

- при туманах, возникающих вследствие понижения температуры воздуха у подстилающей поверхности ниже -13°C ;

- при метелях и поземках, охватывающих большие территории, в отсутствии облачности.

Повторяемость сроков с дешифрированием ложной облачности составляет 1,6 % (9 сроков из 546) от общего числа произведенных наблюдений (табл. 4).

Авторские испытания по оценке точности восстановления параметров ВГО с данными КА CALIPSO были проведены в дни тандемной съемки над территорией России спутников CALIPSO и NOAA-19 в 2014 году.

КА CALIPSO был запущен на орбиту в 2006 году для изучения влияния облачности и аэрозолей на излучение Земли и ее климата. Он летает в составе международного «созвездия» («A-train») с пятью другими спутниками (Aqua, CloudSat, PARASOL, Aura, Glory) для осуществления параллельных наблюдений за Землей. Спутник CALIPSO включает в себя три прибора: облачно-аэрозольный лидар с ортогональной поляризацией (CALIOP) для получения вертикальных профилей рассеяния от облачности и для описания распределения в ней водяного пара, аэрозолей и т.д.; ИК-радиометр (IRR) и широкоугольную камеру высокого разрешения (WFC) [10, 11].

Зарубежные космические (NASA, ESA, JAXA) и метеорологические агентства (NOAA) на регулярной основе производят валидацию измерений лидара CALIOP с применением наземных и самолетных измерений. В качестве наземных измерений используется лидарная сеть GALION.

Лидар CALIOP обладает высокими техническими показателями: вертикальное разрешение составляет 30 метров, а горизонтальное достигает одного километра в диапазоне высот от $-0,5$ до 20 километров [9].

При сравнении методика показала достаточно высокую оправдываемость обнаружения как нескольких слоев облачности, так и отдельных единичных облачных образований. Наибольшая точность расчета параметров ВГО (высоты и температуры) прослеживается у слоистообразной и кучевообразной облачности, наименьшая — у перистых типов. В целом по сезонам максимальная оправдываемость восстановленных параметров ВГО отмечается в теплый период года с апреля по сентябрь с расхождениями в значениях высоты не более 1,5 км, а температуры не более 5–10 градусов Кельвина, что согласуется с результатами испытания на основе доплеровского метеолокатора. Подробное описание результатов испытания методики с данными КА CALIPSO в статье не приводится из-за значительного объема. Подробно ознакомиться с методикой и результатами испытания можно в научно-исследовательском отчете «Валидация продуктов программного комплекса CLAVR-x» [1].

Рекомендации к внедрению

ЦМКП Росгидромета в своем решении от 11.10.2016 г. рекомендовала внедрить метод дешифрирования облачного покрова и получения высоты верхней границы облачности в оперативную практику СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета» в качестве основного.

Заключение

Методика позволяет с высоким пространственным разрешением и достаточно достоверно детектировать облачность и определять ее количественные характеристики (ВГО и тип облачности) в автоматическом режиме. Высокая скорость обработки исходных спутниковых данных позволяет получать дешифрованную информацию об облачности в автоматическом режиме через 15 минут после ее приема с КА. За сутки обрабатывается до 24 зарегистрированных сеансов. Большим преимуществом методики является возможность проведения анализа облачного покрова над большей частью территории России независимо от времени года и суток.

В ходе проведенных испытаний тематические продукты методики – карты классификации облачности, высоты и температуры ВГО – показали способность к обнаружению грозových ячеек, к отслеживанию их перемещения, развития и трансформации, а также к оценке мощности облачных образований и степени их опасности. Установлены средние значения оправдываемости конечных продуктов методики: для типов облачности порядка ~97 %, для ВГО около 80 %. Выявлены месяцы (апрель–сентябрь) с наибольшей оправдываемостью восстановленных параметров облачности. Повторяемость «ложного» детектирования облачности – 1,6 % случаев. Выявлены синоптические условия «ложного» детектирования облачности.

Результаты дешифрирования облачного покрова могут использоваться как дополнение к данным синоптических и радиолокационных наблюдений в региональных и мезомасштабных схемах численного анализа и прогноза погоды, а также для целей краткосрочного прогноза состояния облачного покрова в метеорологических службах и в аэропортах. Важной областью применения продукции дешифрирования являются климатические исследования облачного покрова и осадков. Количественные характеристики облачности важны при проведении научных исследований в целях изучения особенностей процессов, происходящих в атмосфере, как в рассматриваемом регионе, так и в конкретном пункте.

Дальнейшее развитие методики представляется не только в улучшении визуализации конечных продуктов, но и планируется создание новых продуктов для обеспечения потребителей информацией о зонах осадков и их интенсивности.

Список литературы

1. Антонов В.Н., Захватов М.Г., Косторная А.А. Обзор технологии получения карт облачных продуктов на основе данных AVHRR. Валидация первичных результатов с использованием синоптической информации и данных CALIPSO // Сборник трудов Всероссийской конференции «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов», Усть-Сем, 2015г. – С. 146–151.

2. Волкова Е.В. Определение типа облачности по данным измерений радиометра AVYRR ИСЗ NOAA для Европейского региона России в теплый период года // Труды НИЦ «Планета». – 2005. – Вып. 1(46). – С. 22–41.

3. *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. 15–25.
4. *Гарбук С.В., Гершензон В.Е.* Космические системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Издательство А и Б, 1997. – 296 с.
5. *Герман М.А.* Спутниковая метеорология. Основы космических методов исследования в метеорологии. – Л.: Гидрометеоздат, 1975. – 366 с.
6. *Мазин И.П., Хргиан А.Х.* Облака и облачная атмосфера. – Л.: Гидрометеоздат, 1989. – 646 с.
7. РД 52.27.339-93. Руководство по диагнозу и прогнозу опасных и особо опасных осадков, града и шквалов по данным метеорологических радиолокаторов и искусственных спутников Земли. – 180 с.
8. *Heidinger A.* The clouds from AVHRR Extended User's Guide. Version 5.4.1. – NOAA/NESDIS Center for Satellite Applications and Research (STAR). – 2014. – 60 с.
9. *Heidinger A.K., Evan A.T., Foster M.J., Walther A.* A naive Bayesian cloud-detection scheme derived from CALIPSO and applied within PATMOS-x // J. Applied Meteor. Clim. – 2012. – Vol. 51, Is. 6. – С. 1129–1144.
10. *Kacelenbogen M., Vaughan M.A. et al.* An accuracy assessment of the CALIOP/CALIPSO version 2/version 3 daytime aerosol extinction product based on a detailed multi-sensor, multi-platform case study // Atm. Chem. Phys. – 2011. – Vol. 11, Is. 8. – P. 3981–4000.
11. *Winker D., Vaughan M., Omar A., Hu Y., Powell K.* Overview of the CALIPSO Mission and CALIOP Data Processing Algorithms // J. Atm. Ocean. Tech. – 2009. – Vol. 26. – С. 2310–2323.