

Методика определения типов атмосферных фронтов на основе результатов классификации облачности по спутниковым данным MODIS

А. В. Скороходов¹, В. Г. Астафуров^{1,2}

¹ *Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, 634055, Россия*
E-mail: vazime@yandex.ru

² *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 634050, Россия*
E-mail: astafurov@iao.ru

Предложена методика определения типов атмосферных фронтов на основе результатов классификации облачности по снимкам радиометра MODIS в видимом диапазоне спектра и тематической обработки его данных. Подход основан на том факте, что структуры фронтальных макросистем облаков неоднородны и зависят от происходящих в них мезопроцессов. Рассмотрено пять типов атмосферных фронтов: тёплый, холодный 1-го и 2-го рода, окклюзия по типу тёплого и холодного фронта. Изложены механизмы их формирования и наблюдаемые при этом условия окружающей среды. Приведены характерные последовательности разновидностей облачности, наблюдаемых из космоса, для указанных типов атмосферных фронтов. Представлено описание методики анализа характеристик облачного поля и параметров окружающей среды. Классификация облачности осуществляется алгоритмом, основанным на применении вероятностной нейронной сети, текстурного анализа и физических признаков. Обсуждаются результаты определения типов атмосферных фронтов над территориями Западной Сибири и Казахстана по спутниковым данным MODIS, полученным в период с 2016 по 2017 г. Установлено, что основной причиной неверной интерпретации эпизодов наблюдения неразвитой окклюзии является смещение областей наиболее вероятного выпадения обильных осадков в переходную зону одного из смыкающихся фронтов.

Ключевые слова: атмосферный фронт, облачность, обработка изображений, спутниковые данные, характеристики облаков

Одобрена к печати: 11.04.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-209-216

Введение

Фронтальные зоны представляют собой переходные области в тропосфере, разделяющие воздушные массы с отличающимися характеристиками, к числу которых относятся: температура, давление, скорость ветра, влажность и ряд других. Как правило, прохождение атмосферного фронта (АФ) сопровождается изменением погоды в исследуемом регионе (Дашко, 2005). Поэтому идентификация фронтальных зон и определение их типов относятся к числу основных задач при построении синоптических карт и составлении надёжных прогнозов погоды.

Классическая методика выделения фронтальных зон заключается в использовании данных сети наземных метеостанций, нанесённых на географическую карту исследуемого региона. На основе этой информации синоптиком проводятся изобары, находятся области низкого давления и выпадения осадков, отмечаются типы наблюдаемой облачности и выделяются переходные зоны, разделяющие тёплые и холодные воздушные массы. При этом учитывается тип подстилающей поверхности и рельеф местности, направление и скорость ветра, а также ряд других параметров (Шакина, 2013). Поскольку сеть метеостанций неравномерна, а различные характеристики окружающей среды могут существенно отличаться даже на небольшом расстоянии между пунктами их фиксации, то процедуру выделения АФ можно считать достаточно субъективной.

Начиная с 60-х гг. прошлого столетия предпринимались попытки создания объективных методик выделения фронтальных зон на картах погоды с использованием стандартных

метеорологических параметров (Clarke, Renard, 1966). В настоящее время в Гидрометцентре России применяется алгоритм, основанный на вычислении фронтального параметра, являющегося характеристикой бароклинности, и определении вероятности нахождения АФ в рассматриваемом узле расчётной сетки по набору предикторов (Шакина и др., 2000). Данный подход опирается на использование результатов аэрологического зондирования, выполняемого только на некоторых станциях Росгидромета. Поэтому для расчёта фронтального параметра чаще всего применяются модельные данные (<https://meteolo.com/europa/ukmo/ukmo-europa>).

В настоящее время стали широко использоваться результаты спутниковой съёмки, которые позволяют визуально подтвердить или опровергнуть факт наличия АФ над рассматриваемой территорией на основе анализа структуры наблюдаемой при его прохождении макросистемы облачности (Волкова, 2017). Такие образования облаков имеют ширину в несколько сотен километров по направлению движения, а их длина соответствует протяжённости фронтальной зоны. Известно, что различные АФ характеризуются определёнными последовательностями форм облачности (мезосистемами), которые являются основными сигнатурами для синоптиков при детектировании фронтальных зон по спутниковым данным (Герман, 1985). Несмотря на это, эффективных алгоритмов автоматического выделения АФ и определения их типов только на основе результатов дистанционного зондирования Земли из космоса на данный момент не существует.

Целью настоящей работы является исследование различных характеристик макросистем фронтальной облачности и разработка методики автоматического определения типа АФ на основе результатов классификации облаков по изображениям из космоса в видимом диапазоне спектра и тематической обработки спутниковых данных.

Исходные данные

Рассмотрим характеристики мезосистем облачности, которые соответствуют различным типам АФ (Беспалов и др., 2011). В табл. 1 приведены характерные последовательности разновидностей облаков, расположенные в порядке их появления при перемещении различных типов АФ над фиксированной точкой наблюдения. При этом используются стандартные обозначения типов облачности и их подтипов: кучевые (*Cu*) мощные (*Cu cong*), кучево-дождевые (*Cb*) лысые (*Cb calv*) и волосатые (*Cb cap*), слоисто-кучевые (*Sc*), слоистые (*St*), слоисто-дождевые (*Ns*), высокослоистые (*As*) плотные (*As op*) и просвечивающие (*As trans*), высококучевые (*Ac*) чечевицеобразные (*Ac lent*), перистые (*Ci*), перисто-слоистые (*Cs*) и перисто-кучевые (*Ce*).

Таблица 1. Характерные последовательности облаков для различных типов АФ

Тип фронта	Последовательность
ТФ	$Ci \rightarrow Cs \& As\ trans \rightarrow As\ op \& Ac \rightarrow Ns \& Cb \rightarrow St$
ХФ 1-го рода	$St \rightarrow Ns \& Cb \rightarrow As\ op \& Ac \rightarrow Cs \& As\ trans \rightarrow Cu$
ХФ 2-го рода	$Ce \& Ac\ lent \rightarrow Cs \& Cb\ cap \rightarrow Cb\ calv \rightarrow Cu$
ФО по типу ТФ	$Cu \rightarrow Sc \rightarrow As \& Ns \& Cs \rightarrow Cb \& Cs \rightarrow St$
ФО по типу ХФ	$Cu \rightarrow Sc \& Ac \rightarrow As \& Cs \rightarrow Cb\ calv \& Cb\ cap \rightarrow Cu\ cong \& Cs \rightarrow Cb\ calv \& Cs$

Тёплый фронт (ТФ) является разделом двух воздушных масс, при котором более нагретые из них надвигаются на клин холодного воздуха, вытесняя его. Поскольку фронтальная поверхность имеет угол наклона менее $0,5^\circ$, то восходящее движение тёплого воздуха происходит очень медленно, из-за чего образуется облачность в основном слоистообразных форм. Ширина данного типа АФ составляет 600–800 км, а предвещающие его облака *Ci* и *Cs* появляются на расстоянии 800–1000 км от условной линии разграничения воздушных масс.

Холодные фронты (ХФ) разделяются на два типа в зависимости от скорости восхождения тёплого воздуха, а также влагосодержания и степени неустойчивости атмосферы. Характерной особенностью ХФ 1-го рода является медленное поднятие тёплых воздушных масс над клином холодного воздуха. При этом наблюдается аналогичная с ТФ последовательность разновидностей облаков, но расположенная в обратном порядке по ходу его продвижения. На расстоянии около 800 км от линии фронта по спутниковым данным может детектироваться облачность *Cu* отдельно и в сочетании с *Cs*. Общая ширина фронтальной системы облаков не превышает 500–600 км.

Клин воздуха у ХФ 2-го рода обладает сравнительно большим углом наклона к подстилающей поверхности и движется гораздо быстрее, тем самым создавая неустойчивость тёплых воздушных масс, что способствует возникновению конвективных процессов. Это приводит к интенсивному развитию мощной облачности *Cb cap*, высота которой может достигать тропопаузы. Предвестниками ХФ 2-го рода являются облака *Ac lent* и *Cc*, образующиеся на расстоянии 300–400 км от условной линии разграничения воздушных масс. Ширина полосы конвективной облачности составляет 100–200 км. За ней обычно следуют более низкие облака *Cb calv* и *Cu*, которые могут выстраиваться цепочками параллельно условной линии АФ.

Фронт окклюзии (ФО) образуется при смыкании ХФ и ТФ, когда первый из них настигает второй из-за большей скорости вследствие нисходящих движений холодного воздуха. При этом происходит вытеснение вверх тёплых воздушных масс, которые перестают соприкасаться с поверхностью Земли. ФО подразделяются на два типа в зависимости от температуры воздуха перед ними и в их тылу. ФО по типу ТФ возникает, когда более тёплые воздушные массы натекают на клин воздуха с более низкой температурой. Характерная последовательность разновидностей облачности рассматриваемого типа ФО сходна с аналогичной у ТФ при протяжённости его фронтальной полосы менее 600 км.

Фронты окклюзии по типу ХФ возникают, когда быстро движущийся клин холодных воздушных масс вытесняет вверх воздух с более высокой температурой. Облачная система для данного типа фронта имеет общие черты как с ТФ, так и ХФ 2-го рода. При этом ширина полосы мощной конвективной облачности, в которой происходит выпадение основной массы осадков, составляет 300–400 км.

В работе использовались снимки MODIS видимого диапазона спектра с пространственным разрешением 250 м (0,62–0,67 мкм) и тематические продукты MOD06_12 и MYD06_12, содержащие информацию о спектральных и физических характеристиках облачности, а также геопривязке, полученные в период с 2016 по 2017 г. над территорией, расположенной в ячейке 40–60° с. ш. и 80–100° в. д. географической сетки (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>). Информация о нахождении АФ над указанным регионом извлекалась из архивов синоптических карт Росгидромета за соответствующий период времени (<http://www.kcgm.ru/unimas/>). При этом рассматривались эпизоды, когда на спутниковых снимках фиксировались облачные проявления не только конкретных АФ, но и одновременно двух или трёх типов, зафиксированных в моменты их смыкания. Были исключены ситуации, когда фронтальные зоны располагались на границах исследуемой ячейки, а также определение их типа синоптиком было неоднозначным. Следует отметить, что на синоптических картах ХФ и ФО на подтипы не подразделяются.

Методика определения типа атмосферного фронта

Методика выделения АФ и определения их типов основана на использовании результатов автоматической классификации облачности. Для анализа структуры облачного поля применяется алгоритм (Астафуров и др., 2016), позволяющий распознавать 16 разновидностей облачности с вероятностью правильной классификации 0,85. Основными этапами методики определения типа АФ являются:

1. Масштабирование данных MODIS (снимков и тематических продуктов), имеющих различное пространственное разрешение (Астафуров, Скороходов, 2017).

2. Классификация облачности по 16 разновидностям с помощью алгоритма, основанного на применении вероятностной нейронной сети, информации о текстуре спутниковых снимков и физических параметрах облаков, описание которого изложено в (Астафуров и др., 2016). Эффективность данного классификатора обеспечивается использованием технологии параллельных вычислений CUDA (Compute Unified Device Architecture) компании NVIDIA и применением облачной маски MODIS, что позволяет выполнять распознавание типов облачности на полномасштабном спутниковом снимке (8120×5416 пикселей) менее чем за 10 мин при использовании видеокарты уровня GeForce GTX 780 и выше (Скороходов и др., 2016).

3. Построение мозаики, основными элементами которой являются наиболее преобладающие типы облачности во фрагменте изображения фиксированного размера. Для этого проклассифицированный снимок сканируется скользящим окном 100×100 пикселей (25 км^2), при каждом положении которого определяется число пикселей, принадлежащих каждой из 16 возможных разновидностей облаков. Затем все пиксели выделенного фрагмента перекрашиваются в цвет наиболее повторяющегося типа облачности. Построение мозаики необходимо для устранения «зернистости» результата классификации и упрощения локализации областей, принадлежащих конкретной разновидности облаков.

4. Выделение фронтальных зон, которое осуществляется путём нахождения регионов наиболее вероятного выпадения обильных осадков на основе значений водозапаса, содержащегося в продуктах MOD06_12 и MYD06_12, пороговое значение которого в данной работе равнялось 300 г/м^2 (Колосков и др., 2012). Выделенные участки соответствуют примерным положениям линий фронтов, в районе которых необходимо анализировать поле облачности.

5. Построение линий изобар и изотерм на спутниковом снимке, что позволяет оценить тип АФ (тёплый, холодный, окклюзия) и направление его движения для дальнейшего детального анализа.

6. Сопоставление наблюдаемой на мозаике последовательности разновидностей облаков с характерным порядком для каждого типа АФ. Для этого используется дерево принятия решений, узлами которого являются пороговые классификаторы (Гонсалес, Вудс, 2005). На верхних узлах анализируются физические параметры окружающей среды перед АФ и в его тылу, а также облачность в районе условной линии разграничения воздушных масс. По мере продвижения «вглубь» дерева уточняется структура облачного поля по обе стороны фронтальной линии. Общее количество узлов дерева равняется 72. Результатом работы алгоритма является решение о соответствии наблюдаемой последовательности облаков одному из пяти типов АФ.

Результаты определения типов атмосферных фронтов

Оценка эффективности предложенной методики осуществлялась на основе тестовой выборки, состоящей из 132 наборов спутниковых данных MODIS за 2016 и 2017 гг. для рассматриваемого узла сетки, охватывающего территорию Западной Сибири и Казахстана. При этом результаты определения типа АФ сопоставлялись с синоптическими картами Росгидромета и экспертной оценкой (<http://www.kcgms.ru/unimas/>). В *табл. 2* приведены показатели эффективности предложенной методики и указаны ошибки интерпретации. Здесь N_R — количество правильно идентифицированных эпизодов наблюдения АФ каждого типа из N_T рассматриваемых. Кроме этого, в *табл. 2* приведено «мнение» алгоритма относительно ситуаций неправильно распознанных фронтальных систем. Наименее эффективно идентифицировались эпизоды наблюдения ТФ, что можно объяснить большой шириной его фронтальной зоны, не позволяющей в полной мере оценить по спутниковым данным параметры окружающей среды и облаков перед условной линией разграничения воздушных масс и за ней. Кроме этого, некоторые ФФ неверно интерпретировались как ТФ или ХФ, при смыкании которых они образовались. Анализ результатов обработки таких эпизодов показал смещение областей наиболее вероятного выпадения осадков в сторону одного из смыкающихся фронтов, а также неразвитость фронтальных систем облаков.

Таблица 2. Результаты определения типов АФ

Тип фронта	N_T	N_R	Мнение алгоритма (число эпизодов)
ТФ	39	35	ХФ 1-го рода (2), ФО по типу ТФ (2)
ХФ 1-го рода	32	29	ХФ 2-го рода (1), ФО по типу ТФ (2)
ХФ 2-го рода	28	26	ФО по типу ХФ (2)
ФО по типу ТФ	19	16	ХФ 1-го рода (2), ФО по типу ТФ (1)
ФО по типу ХФ	14	12	ХФ 2-го рода (2)

На *рис. 1* показан результат идентификации ХФ 2-го рода, облачная система которого наблюдалась на спутниковом снимке (см. *рис. 1а*) рассматриваемого в работе узла сетки от 02.05.2016 (05:45 UTC).

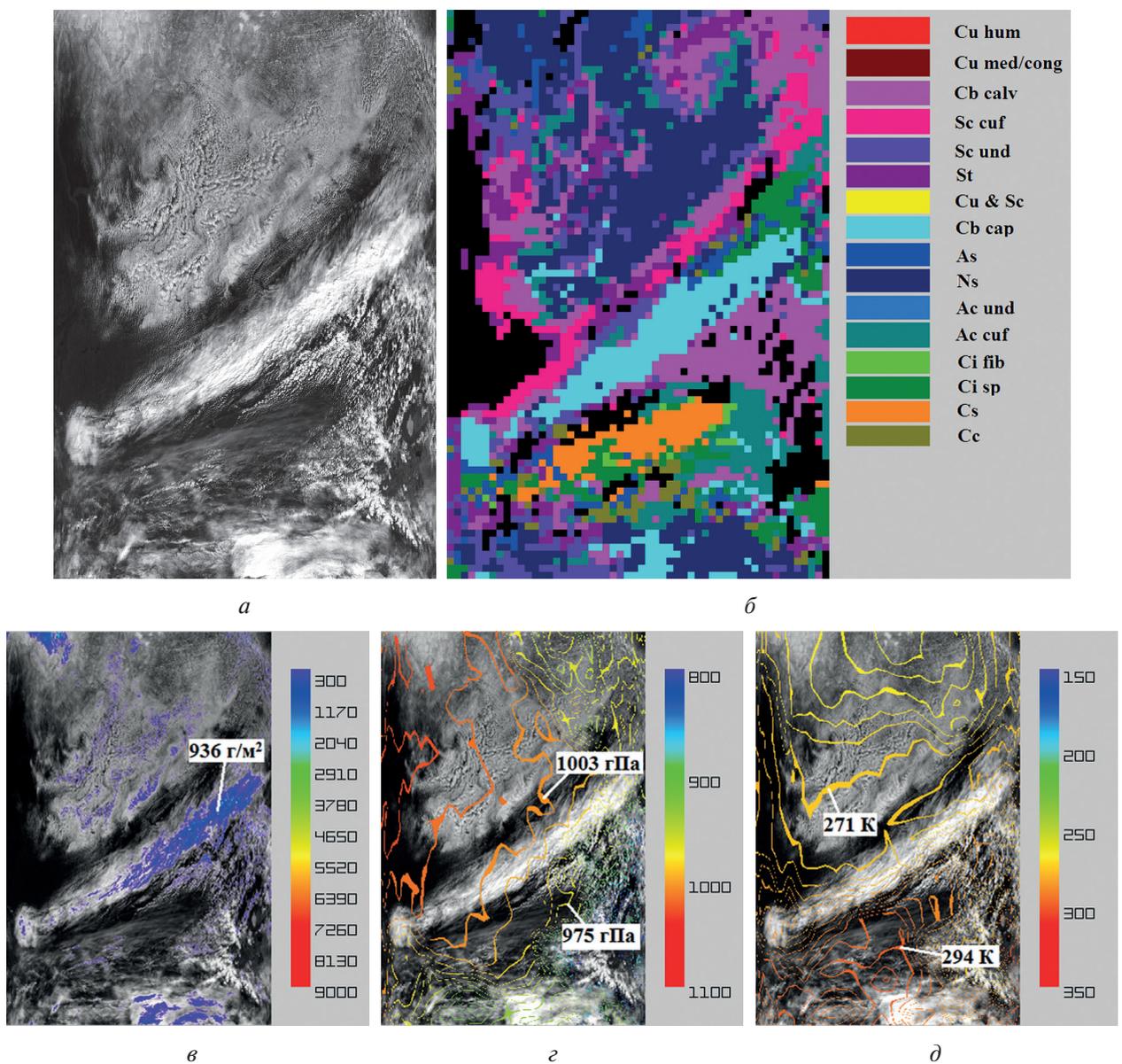


Рис. 1. Результат идентификации ХФ 2-го рода над территорией Новосибирской области на основе мозаики облачности (*б*) по спутниковому снимку MODIS от 02.05.2016 (05:45 UTC) (*а*), а также информации о водозапасае облаков (*в*), атмосферном давлении (*г*) и температуре подстилающей поверхности (*д*)

Условная линия разграничения воздушных масс пересекает территорию Новосибирской области. Результат классификации облачности, приведённый на *рис. 1б*, свидетельствует о присутствии характерных для ХФ 2-го рода разновидностей облаков над рассматриваемым регионом в необходимой последовательности. Алгоритм позволяет также распознавать под-типы облачности: *Cu* — плоские (*Cu hum*), *Sc* — волнистообразные (*Sc und*) и кучеобразные (*Sc cuf*), *Ci* — нитевидные (*Ci fib*) и плотные (*Ci sp*). В тылу фронтальной зоны наблюдается облачность *Ns*, что является довольно частым явлением при прохождении данного типа фронтов (Позднякова, 2010). Среднее значение водозапаса облаков *Cb cap* равняется 936 г/м², что обуславливает высокую вероятность выпадения осадков (см. *рис. 1в*). Атмосферное давление за линией фронта возрастает (см. *рис. 1е*), а температура — падает (см. *рис. 1д*).

Заключение

Предложенная в работе методика является одним из первых шагов на пути создания методов интеллектуального анализа глобального поля облачности на основе результатов распознавания его структуры по спутниковым данным. Результаты обработки тестовой выборки свидетельствуют о высокой вероятности правильной идентификации эпизодов наблюдения АФ (см. *табл. 2*). Эффективность методики обеспечивается использованием алгоритма распознавания 16 разновидностей облаков и применением методов параллельных вычислений на графических процессорах общего назначения (Астафуров и др., 2016; Скороходов и др., 2016). Предложенный подход позволяет работать с ситуациями, когда во фронтальной системе облачности отсутствует несколько характерных типов облаков. Основные ограничения методики — это размеры спутниковых сцен и используемый алгоритм выделения фронтальных зон путём обнаружения участков наиболее вероятного выпадения обильных осадков. Поэтому перспективными направлениями развития данной работы являются адаптация предложенного подхода определения типов АФ к данным геостационарных спутниковых систем или сшитых последовательных изображений, усовершенствование классификатора, а также применение более эффективных сигнатур фронтальных зон на основе вертикальных профилей атмосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-60019 мол_а_дк.

Литература

1. Астафуров В. Г., Скороходов А. В. Статистическая модель физических параметров облачности на основе тематических продуктов MODIS // Исследование Земли из космоса. 2017. № 5. С. 66–81.
2. Астафуров В. Г., Курьянович К. В., Скороходов А. В. Методы автоматической классификации облачности по спутниковым снимкам MODIS // Исследование Земли из космоса. 2016. № 4. С. 35–45.
3. Беспалов Д. П., Девяткин А. М., Довгалюк Ю. А., Кондратюк В. И., Кулешов Ю. В., Светлова Т. П., Суворов С. С., Тимофеев В. И. Атлас облаков. СПб.: Изд-во Д'АРТ, 2011. 248 с.
4. Волкова Е. В. Оценки параметров облачного покрова и осадков по данным радиометра МСУ-МР полярно-орбитального метеоспутника «Метеор-М» № 2 для Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 9–18.
5. Герман М. А. Космические методы исследования в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 352 с.
6. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Изд-во «Техносфера», 2005. 1072 с.
7. Дашко Н. А. Курс лекций по синоптической метеорологии. Владивосток: Изд-во ДВГУ, 2005. 523 с.
8. Колосков Б. П., Корнеев В. П., Шукин Г. Г. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2012. 342 с.
9. Позднякова В. А. Практическая авиационная метеорология: учеб. пособие. Екатеринбург: Уральский УТЦ ГА, 2010. 113 с.

10. Скороходов А. В., Аксёнов С. В., Аксёнов А. В., Лайком Д. Н. Использование различных вычислительных систем для решения задачи автоматической классификации облачности по спутниковым данным MODIS на основе вероятностной нейронной сети // Известия Томского политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 1. С. 30–39.
11. Шакина Н. П. Лекции по динамической метеорологии. М.: Изд-во ТРИАДА ЛТД, 2013. 160 с.
12. Шакина Н. П., Скриптунова А. Р., Иванова А. Р. Объективный анализ атмосферных фронтов и оценка его эффективности // Метеорология и гидрология. 2000. № 7. С. 5–16.
13. Clarke L., Renard R. L. The US Navy numerical frontal analysis scheme: further development and limited evaluation // J. Applied Meteorology and Climatology. 1966. V. 5. P. 764–777.

A method for determining types of weather fronts based on cloud classification results from MODIS satellite data

A. V. Skorokhodov¹, V. G. Astafurov^{1,2}

¹ V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk 634055, Russia
E-mail: vazime@yandex.ru

² Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk 634050, Russia
E-mail: astafurov@iao.ru

A method for determining types of weather fronts based on results of cloud classification by radiometer MODIS imagery in the visible region of the spectrum and thematic data processing is proposed. This approach is based on the fact that structures of the frontal cloud macroscale systems are heterogeneous and depend on the mesoscale processes occurring in it. Five types of weather fronts are considered: warm, cold of 1st and 2nd kind, warm and cold occlusion. The mechanisms of their formation are observed and at the same time the environmental conditions are described. The typical sequences of cloud types observed from space are given for different weather fronts. The step description of the technique for analyzing the cloud field characteristics and atmospheric conditions is presented. Cloud classification is performed by an algorithm based on the usage of a probabilistic neural network, a texture analysis and physical parameters of clouds. The results of determining the types of weather fronts over the territory of Western Siberia and Kazakhstan based on MODIS satellite data obtained during the period from 2016 till 2017 are discussed. The authors suggest that the main reason of false interpretation of observed episodes of unformed occlusion is the displacement of the fields of the most probable deposition of abundant precipitation into the transiting area of one of connecting fronts.

Keywords: weather front, cloudiness, image processing, satellite data, cloud parameters

Accepted: 11.04.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-209-216

References

1. Astafurov V. G., Skorokhodov A. V., Statisticheskaya model' fizicheskikh parametrov oblachnosti na osnove tematiceskikh produktov MODIS (Statistical model of the cloud physical parameters based on MODIS thematic data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 5, pp. 66–81.
2. Astafurov V. G., Kur'yanovich K. V., Skorokhodov A. V., Metody avtomaticheskoi klassifikatsii oblachnosti po sputnikovym snimkam MODIS (Methods for automatic cloud classification from MODIS data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 4, pp. 35–45.
3. Bespalov D. P., Devyatkin A. M., Dovgalyuk Yu. A., Kondratyuk V. I., Kuleshov Yu. V., Svetlova T. P., Suvorov S. S., Timofeev V. I., *Atlas oblakov* (Cloud Atlas), Saint Petersburg: D'ART, 2011, 248 p.
4. Volkova E. V., Otsenki parametrov oblachnogo pokrova i osadkov po dannym radiometra MSU-MR polyarno-orbital'nogo meteosputnika "Meteor-M" No. 2 dlya Evropeiskoi territorii Rossii (Detection and assessment of cloud cover and precipitation parameters using data from MSU-MR radiometer of the

- polarorbiting Meteor-M No. 2 for the European territory of Russia), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 5, pp. 9–18.
5. German M. A., *Kosmicheskie metody issledovaniya v meteorologii* (Space research methods in meteorology), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 352 p.
 6. Gonsales R., Vuds R., *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii* (Digital image processing), Moscow: Tekhnosfera, 2005, 1072 p.
 7. Dashko N. A., *Kurs lektsii po sinopticheskoj meteorologii* (Lectures on synoptic meteorology), Vladivostok: DVGU, 2005, 523 p.
 8. Koloskov B. P., Korneev V. P., Shchukin G. G., *Metody i sredstva modifikatsii oblakov, osadkov i tumanov* (Methods and tools for the modification of clouds, precipitation and fogs), Saint Petersburg: RGGMU, 2012, 342 p.
 9. Pozdnyakova V. A., *Prakticheskaya aviatsionnaya meteorologiya: uchebnoe posobie* (Practical aviation meteorology: a tutorial), Ekaterinburg: UTC GA, 2010, 113 p.
 10. Skorokhodov A. V., Aksenov S. V., Aksenov A. V., Laikom D. N., Ispol'zovanie razlichnykh vychislitel'nykh sistem dlya resheniya zadachi avtomaticheskoi klassifikatsii oblachnosti po sputnikovym dannym MODIS na osnove veroyatnostnoi neironnoi seti (Using different computing systems to solve the automatic cloud classification problem on MODIS satellite data by probabilistic neural network), *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2016, Vol. 327, No. 1, pp. 30–39.
 11. Shakina N. P., *Lektsii po dinamicheskoi meteorologii* (Lectures on dynamic meteorology), Moscow: TRIADA LTD, 2013, 160 p.
 12. Shakina N. P., Skriptunova A. R., Ivanova A. R., Ob'ektivnyi analiz atmosferykh frontov i otsenka ego effektivnosti (Objective analysis of atmospheric fronts and evaluation of its effectiveness), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2000, No. 7, pp. 5–16.
 13. Clarke L., Renard R. L., The US Navy numerical frontal analysis scheme: further development and limited evaluation, *J. Appl. Meteorol.*, 1966, Vol. 5, pp. 764–777.