

О классификации типов облачности пороговым методом по спутниковым ИК-данным

Е. В. Волкова

*Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»
Москва, 123242, Россия
E-mail: quantocosa@bk.ru*

Влияние облачности на погоду и климат велико, так как она участвует в формировании радиационного, теплового и водного баланса системы «Земля – атмосфера». С каждым конкретным типом и видом облаков связаны определённые метеорологические процессы и метеоявления, в том числе опасные. Поэтому информация об облачных классах (их типах, видах и разновидностях) важна как для оперативного мониторинга погоды, так и при изучении климата. В статье рассмотрен принятый Всемирной метеорологической организацией подход к классификации облаков и приведён обзор основных существующих на данный момент методик классификаций облачности по спутниковым данным в видимом и инфракрасном диапазонах спектра. Подробно рассмотрено пошаговое построение алгоритмов в разработанной автором пороговой методике попиксельной классификации облачности по спутниковой информации о радиационной температуре в разных спектральных каналах, приведено подробное описание выделяемых методикой облачных классов, отмечены возможные источники ошибок и возникающие сложности при облачном анализе. Предложенные автором алгоритмы действительны для приборов AVHRR (*англ.* Advanced Very-High-Resolution Radiometer) космического аппарата (КА) серии NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration), SEVIRI (*англ.* Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) КА серии Meteosat, МСУ-МР (многозональное сканирующее устройство малого разрешения) КА серии «Метеор-М», МСУ-ГС-ВЭ (МСУ для геостационарных спутников при съёмке с высокоэллиптической орбиты) КА серии «Арктика-М» и аналогичных им.

Ключевые слова: типы облачности, классификация облачности по спутниковым данным, облачный анализ, пороговые методики, AVHRR/NOAA, SEVIRI/Meteosat, МСУ-МР/«Метеор-М», МСУ-ГС-ВЭ/«Арктика-М»

Одобрена к печати: 05.12.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-271-286

Введение

Облака — это системы взвешенных в атмосфере (не у самой земной поверхности) продуктов водяного пара: капель воды и кристаллов льда (Хромов, Мамонтова, 1974). Облачный покров выступает важной составной частью системы «Земля – атмосфера», так как регулирует радиационный, тепловой, водный, аэрозольный и другой обмен в ней. Разные облака в зависимости от высоты их положения в атмосфере, водности и толщины облачного слоя, фазового состояния воды в облачных частицах (*faza*), концентрации и размера частиц и прочих параметров по-разному участвуют в этих процессах (Матвеев, 1965). Подавляющее количество облачности сосредоточено в нижних слоях атмосферы (в тропосфере), однако существуют ещё и изредка наблюдаемые стратосферные облака.

Ниже в работе описан принятый Всемирной метеорологической организацией (ВМО, *англ.* World Meteorological Organization — WMO) подход к классификации облаков и представлен обзор различных методов классификации облачности по спутниковым данным в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах спектра. Пошагово рассмотрена разработанная автором методика пороговой попиксельной классификации облаков по спутниковой информации о радиационной температуре, приведено подробное описание выделяемых методикой облачных классов, отмечены возможные источники ошибок и возникающие сложности при облачном анализе.

О классификации облаков

Основные формы и виды облаков

На протяжении веков к облакам в связи с их часто необычным видом (в зависимости от формы вызывающим разные эмоции от восторга до страха) и большим влиянием на человеческую жизнедеятельность (от положительного до разрушительного из-за связанных с ними метеоявлений) приковано большое внимание разных людей. Не так давно даже было создано Международное общество любителей облаков (*англ.* The society for people who love the sky, <https://cloudappreciationsociety.org/>), включающее в себя не только специалистов-нефологов. Изучением влияния облаков на погоду и климат занимались ещё в глубокой древности. Предпринимались попытки группировки облаков. Первая научная классификация облачности была предложена в Англии метеорологом-любителем Л. Говардом (*англ.* L. Howard) в начале XIX в., а первая международная классификация облаков (которая легла в основу современной) была разработана и принята (выпущен Атлас облаков) в конце XIX в. и с тех пор подвергалась многократным дополнениям и уточнениям (Беспалов и др., 2011; Облака..., 1989).

По стандарту ВМО тропосферные облака классифицируются в соответствии с латинской системой, в которой за основу приняты высота их положения, внешний вид и генезис. Так, в зависимости от высоты верхней и нижней границ выделяют 10 основных форм (родов) облаков. Большая часть родов подразделяется на виды по особенностям их формы и внутренней структуры (например, слоистообразные, башенкообразные и др.). При этом виды и роды взаимно исключаются, т. е. облако может быть отнесено только к одному роду и виду. Виды облаков делятся на разновидности — по особенностям макроскопических элементов облаков, а также по большей или меньшей степени их прозрачности в целом (например, волнистые, просвечивающие и др.). Разновидности при этом взаимно не исключаются, т. е. одно и то же облако может быть отнесено к двум или нескольким разновидностям или ни к одной из них. Также к названию облаков могут добавляться их дополнительные особенности (например, наковальня, вымя, полосы падения и др.) и определения, указывающие на происхождение (например, генезис, мутация и т. п.) (Хромов, Мамонтова, 1974).

В настоящий момент насчитывается около 100 разновидностей и комбинаций облаков, и этот список постоянно дополняется (<https://public.wmo.int>). Например, совсем недавно в него вошли особенные облака, представляющие собой след от выхлопа летательного аппарата (*лат.* homogenitis). В последнее время большое внимание в мире уделяется шероховатым облакам (*лат.* asperitas) из-за их необычного вида, и в ВМО поступает много предложений о добавлении в список новых разновидностей для них (например, облака Судного дня).

Положение облаков в тропосфере характеризуется их ярусностью. Разные роды облаков могут встречаться только в одном ярусе (например, перистые (Ci) — в верхнем, а слоистые (St) — в нижнем) или в нескольких ярусах одновременно: например, высокослоистые облака (As) часто проникают и в верхний ярус, хотя в большинстве случаев расположены в среднем, а вершины кучево-дождевых облаков (Cb), имеющих основание в нижнем ярусе, могут проникать не только в средний, но и в верхний ярус и даже пробивать тропопаузу. В зависимости от температурных условий у подстилающей поверхности и в нижних слоях тропосферы (которые обычно зависят от сезона и времени суток, так как преимущественно связаны с инсоляцией) высота положения ярусов и облаков заметно меняется, т. е. испытывает сезонный, суточный и зональный (зависящий от географической широты (φ)) ход. Обычно чем выше температура воздуха (T_a), тем сильнее конвективные процессы в атмосфере и, следовательно, больше высота верхней границы облачности над уровнем моря ($H_{\text{ВГО}}$), но не обязательно над поверхностью земли, так как на неё влияет и рельеф местности (H_{ref}). Высота нижней границы облачности ($H_{\text{НГО}}$) для некоторых форм облаков находится в прямой зависимости от температурного режима в атмосфере. На неё сильно влияют микрофизические характеристики облака, а также влажность воздуха в подоблачном слое. Принято считать, что основание облаков верхнего яруса (Ci, Cc (перисто-кучевые) и Cs (перисто-слоистые)) в полярных широ-

тах находится на высотах 3–8 км, в умеренных — 6–13 км, а в тропических — 6–18 км; у облаков среднего яруса (Ac (высококучевые) и As) — на высотах 2–4, 2–7 и 2–8 км соответственно; у облаков нижнего яруса (Sc (слоисто-кучевые), Ns (слоисто-дождевые), St, Cu (кучевые) и Cb) независимо от ϕ — от земной поверхности до 2 км (Хромов, Петросянц, 2001). В книге (Претор-Пинней, 2015), несмотря на немного шутиливую форму представления материала, дано достаточно подробное и глубокое описание разных форм, видов и разновидностей облачности, включая очень редкие и необычные, а подробную подборку снимков разных видов и комбинаций облачности можно посмотреть, например, в атласе (Беспалов и др., 2011).

Все облака находятся в процессе непрерывной эволюции, поэтому их внешний вид невероятно разнообразен. Из-за этого каждое название разновидности облака принимает во внимание лишь несколько его самых типичных признаков, наиболее характерных для состояния облака и часто повторяющихся в процессе его эволюции. Даже самые подробные классификации учитывают лишь относительно небольшое число существующих форм облаков, поэтому атласы облаков непрерывно дополняются. В атласе (Беспалов и др., 2011) приведена таблица изменения основных форм облаков в процессе эволюции, но если учитывать виды и разновидности облаков, то эта таблица увеличится в десятки раз.

Помимо основного стандарта ВМО (<https://public.wmo.int>) существует большое количество его модификаций, а также других независимых классификаций. Так, из-за того, что вершины Cu и особенно Cb могут попадать в средний и верхний ярусы, эти формы облаков часто принято относить к самостоятельному роду — «облака большого вертикального развития». Во многих (преимущественно зарубежных) классификациях $H_{\text{НГО}}$ учитывается в меньшей степени, и из-за этого Ns попадают в средний ярус, так как их $H_{\text{ВГО}}$ обычно совпадает с $H_{\text{ВГО}}$ у Ac и As (см., например, (Претор-Пинней, 2015; <https://isccp.giss.nasa.gov>)), а в справочнике (Атмосфера, 1991) Ns рассматривают как отдельную группу облаков, поскольку они наиболее часто связаны с фронтальной и циклонической деятельностью. В России принята классификация ВМО, хотя отдельные исследователи придерживаются разбиения на ярусы и классы из ISCCP (*англ.* International Satellite Cloud Climatology Project, Международный проект спутниковой климатологии, <https://isccp.giss.nasa.gov>) или Met Office (Метеорологическая служба Великобритании, <https://metoffice.gov.uk>).

В независимых от ВМО классификациях за основу могут быть взяты другие характеристики облаков, например условия их образования (конвективные (Cu, Cb), волнистые (Cc, Ac, Sc), восходящего скольжения (Ci, Cs, As, Ns) и турбулентного перемешивания (St)) (Беспалов и др., 2011) или $H_{\text{ВГО}}$ и температура верхней границы облачности ($T_{\text{ВГО}}$), а также фаза (высокие или низкие тёплые либо холодные жидко-капельные, кристаллические или смешанные) (например, (Heidinger et al., 2019)).

Кроме основных форм, видов и разновидностей облаков часто встречаются их сочетания (комбинации). Если облака при этом относятся к разным ярусам, облачность называется многослойной. Так, фронтальные облачные системы независимо от ϕ всегда многослойны. В зависимости от типа фронта отмечается более-менее устойчивый набор комбинаций видов и разновидностей облаков (Зверев, 1977; Облака..., 1989).

Каждому классу (роду и виду) облаков присущ свой перечень метеоявлений (осадки определённой интенсивности и типа, опасные явления погоды (ОЯП) и т.д.), поэтому по облакам можно не только анализировать текущую погоду, но также прогнозировать её изменение в краткосрочной перспективе. Облака и сочетания облаков позволяют достаточно надёжно судить о характере процесса облакообразования и об изменениях погоды, связанных с ними (Беспалов и др., 2011; Зверев, 1977; Руководство..., 1986).

Классификация облачности по спутниковым данным

Уверенную оценку масштаба облачной системы и связанных с ней процессов, особенно для целей прогнозирования, можно получить только на основе анализа синоптических карт достаточно обширных территорий. Наземные наблюдения на метеостанциях за облаками пред-

полагают оценку общего количества облаков (в баллах) и количества облаков нижнего яруса, а также регистрируют форму облаков (36 видов, сочетаний и условий) и $H_{\text{НГО}}$ нижнего или среднего (при отсутствии нижнего) яруса (10 градаций) (Код..., 2012). Метеорологические радиолокаторы способны регистрировать $H_{\text{ВГО}}$ относительно оптически плотной облачности на расстоянии до 200 км (Брылев, 2002). Однако наземные наблюдения за облаками распределены по территории земного шара крайне неравномерно. Поэтому для мониторинга облачности в синоптическом масштабе удобно использовать спутниковые наблюдения.

Глобальные и региональные карты облачных классов, полученные по данным наблюдений в видимом и ИК-диапазоне спектра с полярно-орбитальных (п/о) космических аппаратов (КА), имеют достаточно высокое пространственное разрешение (обычно не более 1–2 км даже на краях полосы обзора), однако довольно низкое и нерегулярное временное. Их неудобно использовать для оперативного мониторинга эволюции облачности и развития синоптических процессов, а также для краткосрочного прогнозирования погоды, однако они вполне пригодны для климатических обобщений сезонно-широтных закономерностей распределения количества облачности и облаков различных форм (Астафуров, Скороходов, 2021). С геостационарных (г/с) КА аналогичная информация поступает каждые 10–30 мин, однако пространственное разрешение заметно ниже (обычно 1–4 км в надире и быстро ухудшается к краям зоны видимости — до 10 км и более), а кроме того с них не видны приполярные регионы (выше 65–70° широты). Запущенный в 2021 г. российский высокоэллиптический (в/э) КА «Арктика-М» позволяет наблюдать за территорией России и Арктикой с интервалом 15 мин и пространственным разрешением 1–4 км в надире (Асмус и др., 2021). По серии последовательных снимков с г/с и в/э КА удобно отслеживать динамику облачных систем и направление их перемещения.

В настоящее время существует большое количество методик для детектирования облачной маски и классификации облаков по типам на основе данных спутниковых измерений в видимом (альбедо (A)) и ИК-диапазоне (радиационная температура (T_p)) спектра. Все методики можно условно разделить на три группы: пороговые, статистические и машинного обучения (Волкова и др., 2021), которые, в свою очередь, подразделяются на спектральные и текстурные подходы (при первых анализируются значения спектральных каналов и их разности, при вторых для группы пикселей рассчитываются текстурные признаки, например градиенты). Однако существует и большое количество комбинаций этих методов и подходов (см. обзоры в работах (Dim, Takamura, 2013; Jiang et al., 2022; Jin et al., 2016)). В качестве основных предикторов обычно используются значения A и/или T_p в разных спектральных каналах аппаратуры п/о и г/с КА. Например, пороговая методика (Heidinger et al., 2019) классифицирует типы облачности только по T_p ; метод классификации облачности по данным измерений только A в одном канале в дневное время описан в исследовании (Астафуров и др., 2016), а в ночное время — в работе (Скороходов, 2020); в пороговой методике (Косторная и др., 2017) помимо T_p используются и характеристики облачности, полученные на предыдущих этапах классификации; пороговые с элементами статистических методики, используемые Европейской организацией спутниковой метеорологии EUMETSAT (*англ.* European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites) (Sedlar, Karlsson, 2011; Stengel et al., 2015), опираются одновременно на T_p и A (последнее — косвенно через расчёт COT (*англ.* Cloud Optical Thickness — оптическая толщина облачного слоя)). Использование A в классификациях не всегда удобно, так как делает зависимой точность получаемой информации от времени суток.

Как упоминалось выше, многие методики опираются на «стандарт» ISCCP (<https://isccp.giss.nasa.gov>) и выделяют 9 облачных классов (Ci, Cs, Cb, Ac, As, Ns, Cu, Sc, St) в зависимости от $T_{\text{ВГО}}$ и COT пороговым (Sedlar, Karlsson, 2011) или порогово-статистическим (Stengel et al., 2015) методом, градиентно-кластерной методикой (Dim, Takamura, 2013) или пороговой с элементами машинного обучения (Jiang et al., 2022). Некоторым методикам ближе стандарты ВМО. Так, в работе (Косторная и др., 2017) пороговым методом облачность классифицируется на 10 классов, а в публикации (Астафуров и др., 2016) — нейро-сетевым на 25 стандартных разновидностей. Некоторые исследователи используют свои собственные подходы

к классификации, в качестве приоритетных выбирая $T_{\text{ВГО}}$, $H_{\text{ВГО}}$ и $f_{\text{аза}}$: в работе (Heidinger et al., 2019) выделяется пороговым методом 8 классов; в отчёте (Kerdraon, Le Glaue, 2019) — порогово-статистическим тоже 8 классов, но немного других; в публикации (Jin et al., 2016) методом машинного обучения — 4 класса, а в (Purbantoro et al., 2018) — 3–9 классов (в зависимости от варианта методики) только по T_p в двух спектральных каналах методом скользящего окна.

Независимо от основных принципов, на которые опираются разные классификации, чаще всего выделяются следующие классы облаков (могут подразделяться на разное количество классов): 1) C_i или «оптически тонкие»; 2) «мощные C_b », или «большого вертикального развития», или «высокие очень плотные»; 3) C_u , S_c , или «низкие водяные», или «низкие тёплые»; 4) A_s и/или A_s , или «плотные смешанные», или «плотные холодные». При этом многослойная облачность может выделяться в отдельный класс или входить в любой из четырёх упомянутых выше.

В подавляющем большинстве случаев классы облачности, выделяемые разными методиками, трудно сопоставимы между собой, даже если их названия соответствуют классификации ВМО, из-за того что авторы методик причисляют к ним свой набор видов и разновидностей облаков. Действительно, на практике провести границы между облачными классами бывает очень трудно, так как в разных ситуациях облачность разных видов может иметь близкие значения $H_{\text{ВГО}}$, COT , $f_{\text{аза}}$ и других макро- и микрофизических характеристик. Поэтому облачный класс в методике часто содержит облачность разных видов и разновидностей ВМО, но имеющую некоторые общие характеристики (и у разных авторов этот набор характеристик для разных облачных классов свой). Точность таких классификаций в значительной степени зависит от точности восстановления предикторов и адекватности описания облачных классов (включая подбор образцов) разработчиками. Если классификация облачности на типы предшествует определению $H_{\text{ВГО}}$, то здесь типичны одинаковые ошибки: тонкие C_i принимаются за разорванную облачность и наоборот, а низкая и очень низкая облачность в случае с температурной инверсией или низкая облачность, перекрытая C_i , могут детектироваться как облачность среднего яруса (Волкова, Успенский, 2015).

Естественно, что все эти спутниковые классификации сильно отличаются от стандарта, принятого для наземных метеонаблюдений за типом облачности (Код..., 2012), и это сильно затрудняет достоверную валидацию результатов спутниковой классификации наземными оценками. Кроме того, не следует забывать, что наземные наблюдения «видят» облачность снизу, а со спутников наблюдается ВГО, поэтому несовпадения могут быть очень большими, например в случаях со сплошной облачностью, так как она может оказаться многослойной и относиться к совершенно разным классам по спутниковым и наземным оценкам.

Пороговые методики

В последнее время принято считать, что спектральные пороговые методики исчерпали свои возможности для совершенствования (увеличения количества разделяемых классов и повышения точности классификации, а кроме того, требуют большого опыта и знаний у разработчиков при создании алгоритмов) и будущее только за методиками машинного обучения. На самом деле это не совсем так. У пороговых методик ещё существует достаточно большой, не до конца реализованный потенциал, особенно если использовать в качестве предикторов, помимо спектральных, макро- и микрофизические характеристики облаков (подробнее см. ниже).

Пороговый метод давно и широко применяется на практике, так как представляется самым простым при создании алгоритмов классификации. Значения порогов задаются в виде констант для небольших по площади территорий и промежутков времени с однородными условиями, а для больших промежутков времени и территорий — в виде формул, которые подбираются преимущественно статистическим методом на основе контрольных выборок и учитывают климатические особенности, а также сезонные, суточные и зональные изменения

характеристик у разных классов облаков. Для расчёта пороговых значений часто используется дополнительная информация: данные о вертикальном распределении температуры и влажности в атмосфере и атмосферном давлении на уровне моря (поля численного прогноза или анализа); карты рельефа, отражательных свойств и типа подстилающей поверхности; результаты модельных расчётов и др. В процессе классификации значения предикторных характеристик сравниваются с пороговыми и принимается решение о причислении пикселя к соответствующему классу объектов. Решающее правило может состоять как из одного условия, так и из целой серии условий. Пиксель может причисляться к новому классу как при выполнении полного набора условий, так и части из них — в этом случае пикселю дополнительно присваивается значение вероятности принадлежности к данному классу.

Важные достоинства пороговых методик следующие: относительная простота алгоритмов, включающих в себя построение наборов из решающих правил, высокая скорость обработки спутниковых данных и относительно невысокие требования к вычислительным ресурсам. При этом точность и качество классификации определяются точностью дополнительной информации, адекватностью контрольной выборки, набора предикторных характеристик и подбора пороговых решений, а также качеством нефанализа (дешифрирования и классификации облачности) для контрольной выборки.

Одним из недостатков большинства пороговых (а равно с ними и других) методик стала их «региональность»: они хорошо работают только в тех районах, для которых были созданы (или очень близких к ним по метеорологическим и другим условиям).

Классификация облаков с помощью Комплексной пороговой методики

В Научно-исследовательском центре космической гидрометеорологии «Планета» (НИЦ «Планета») автором разработана Комплексная пороговая методика (КПМ) попиксельного порогового дешифрирования и классификации облачности по данным измерений T_p разными спутниковыми приборами: AVHRR (*англ.* Advanced Very-High-Resolution Radiometer) п/о КА серии NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration), SEVIRI (*англ.* Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) г/с КА серии Meteosat, МСУ-МР (многозональное сканирующее устройство малого разрешения) п/о КА серии «Метеор-М» и МСУ-ГС в/э КА серии «Арктика-М». Помимо упомянутых спутниковых приборов методика достаточно легко может быть приспособлена к данным наблюдений аналогичных им устройств, так как использует общие принципы классификации. Ниже подробно рассмотрен блок КПМ, используемый для разделения облачных пикселей на типы облачности, а также его вариации в связи с различным набором и диапазоном спектральных каналов у разных спутниковых приборов и дополнительной информацией, имеющейся в распоряжении разработчика алгоритма.

Комплексная пороговая методика создавалась для нужд оперативного мониторинга облачности и краткосрочного прогнозирования, в том числе осадков и опасных явлений погоды (ОЯП). Поэтому она выделяет 13 классов облачности, включая 4 класса многослойной и 4 класса Сб. Диагностика дополнительного количества классов признана избыточной, так как уже имеющиеся хорошо справляются с поставленной задачей по детектированию зон осадков и ОЯП, а использование слишком большого списка классов усложняет синоптику быстрый облачный анализ и диагноз синоптической ситуации. Выделяемые КПМ облачные классы соответствует стандарту ВМО, однако включают в себя не только виды облаков из названия класса, но и очень похожие на них по макро- и микрофизическим характеристикам другие виды и разновидности (описание характеристик классов облаков может немного варьироваться в зависимости от вида спутниковой информации):

1. **Ci, Cs (перистообразные).** Ci, Cs, Cc, высокие As. $H_{\text{ВГО}} > 5,5\text{--}6$ км (200–500 гПа); $H_{\text{НГО}} > 4,5\text{--}5$ км. Облачность однослойная. Толщина облачного слоя (dH) — от нескольких сотен метров до 1–2 км. Облака однородны по микроструктуре, кристаллические или смешанные (реже) с преобладанием кристаллической фракции. $\text{COD} \leq 5$

- (англ. Cloud Optical Depth — оптическая плотность облачного слоя); $COT < 5$; $R_{эф} < 5$ мкм (эффективный радиус). $W_{max} < 0,1$ г/м³ (максимальная водность облачного слоя) и практически постоянная для всего облачного слоя; водозапас $SW < 0,02$ кг/м². Осадки не выпадают. Без обледенения.
2. **As (высокослоистые).** As, Ac und., низкие Ci, Cs и Cc и высокие St. $H_{ВГО}$ от 1–2 до 5–6 км (350–900 гПа); $H_{НГО} > 1–2$ км; dH от сотен метров до 1–2 км. Облачность преимущественно однослойная, однородная по микроструктуре, преимущественно смешанная или кристаллическая (реже). $COD < 10–15$; $COT < 10–15$; $R_{эф} < 5–10$ мкм. $W_{max} < 0,15$ г/м³ (максимум посередине облачного слоя или не выражен); $SW < 0,1$ кг/м². Осадки обычно не выпадают, но зимой изредка возможен очень слабый снег ($I \leq 0,5$ мм/ч). Преимущественно без обледенения, изредка слабое обледенение.
 3. **St (слоистообразные).** St (в том числе туман), низкие As, Ac, Cu hum., Sc und., Cu fr. Над поверхностью земли $H_{ВГО} \leq 1–2$ км (более 800–850 гПа); $H_{НГО} \leq 0,5$ км; dH от сотен метров до 1–2 км. Облачность преимущественно однослойная, однородная по микроструктуре, смешанная (в холодный период года) или жидко-капельная (летом). $COD \leq 30$; $COT < 40–50$; $R_{эф} < 15$ мкм. $W_{max} < 0,3–0,4$ г/м³ (максимум слабо выражен, посередине облачного слоя или чуть ниже); $SW < 0,5$ кг/м². Вероятность выпадения осадков мала, особенно летом; возможны морось, слабый дождь или снег ($I \leq 1$ мм/ч). Обледенение возможно в холодное время года и только слабое.
 4. **Ac (высококучевые).** Ac, некрупные Cu hum., Sc und., As und., низкие Cc, в холодное время года St und. $H_{ВГО}$ от 1–2 до 5–6 км (500–900 гПа); $H_{НГО} = 1–4$ км; $dH \leq 1–2$ км. По фазе неоднородны: смешанные в верхней части облака, а в нижней — капельные или смешанные, но могут быть и целиком капельными (только летом), смешанными или кристаллическими (зимой). $COD = 5–15$; $COT < 10$; $R_{эф} < 10$ мкм. $W_{max} < 0,2$ г/м³ (максимум посередине облачного слоя или чуть выше); $SW < 0,1$ кг/м². Осадки не выпадают или очень слабый снег зимой ($I \leq 0,5$ мм/ч). Преимущественно без обледенения, слабое обледенение.
 5. **Cu, Sc (кучевообразные).** Cu hum., Cu med., небольшие Cu cong., Sc suf., Ac suf., в холодный период года St und. $H_{ВГО}$ от 1–2 до 5 км (500–900 гПа); $H_{НГО} \leq 1,5–2$ км; dH от нескольких сотен метров до 3–5 км. $COD = 10–35$; $COT < 20–70$. Могут быть как целиком капельными (только летом) или смешанными, так и смешанными или кристаллическими в верхней части и капельными или смешанными — в нижней. $R_{эф} = 5–22,5$ мкм. $W_{max} = 0,1–0,5$ г/м³ (обычно 1–2 максимума). Если толщина облака не превышает 3 км, то, как правило, только один максимум в верхней его половине (в тёплое время года) или в средней части облачного слоя (в холодный период) (Облака..., 1989). $SW \leq 1$ кг/м². Вероятность выпадения осадков невелика, особенно летом; морось, слабый дождь или слабый/умеренный снег ($I \leq 1–3$ мм/ч). Возможно слабое обледенение, преимущественно в верхней части облака. Без гроз и града в облаках.
 6. **Ns, Cb (слоисто-дождевые).** Ns, St fr., Frnb, Cu fr., Cb med., Cu cong. и небольшие Cb в стадии распада. $H_{ВГО} = 2,5–6$ км (500–750 гПа); $H_{НГО} < 1$ км; $dH = 1,5–5$ км. Преимущественно смешанные и редко кристаллические (зимой) или жидко-капельные (летом), верхняя половина всегда более «твёрдая», чем нижняя. $COD = 15–40$; $COT < 100$; $R_{эф} = 10–25$ мкм. $W_{max} = 0,3–0,7$ г/м³ (1–2 максимума внутри облачного слоя); $SW < 1,5–2$ кг/м². Осадки почти всегда: слабый/умеренный дождь или слабый/умеренный снег ($I \leq 3–5$ мм/ч). Обледенение практически всегда, слабое или умеренное. Без гроз и града в облаках.
 7. **Cb calv (кучево-дождевые лысые).** Cu cong. и Cb calv. в стадии роста и всегда без прерывистых. В облаке преобладают восходящие движения. $H_{ВГО}$ от 3–4 до 6–9 км (300–700 гПа); $H_{НГО} < 1$ км; $dH = 3–8$ км. $COD = 25–45$; $COT = 25–180$; $R_{эф} = 12,5–27,5$ мкм. В нижней и средней частях капельные (в тёплый период года) или смешанные (в холодное время), а в верхней — смешанные, редко кристаллические. $W_{max} = 0,4–1$ г/м³ (более одного максимума); $SW < 5$ кг/м². Осадки практически всегда:

слабый/умеренный дождь или умеренный/сильный снег, возможна снежная крупа ($I < 5-10$ мм/ч). Летом изредка возможны грозы и град в облаках (выпадение очень маловероятно и только в виде слабого града). Обледенение всегда, преобладает умеренное, но может быть слабым или сильным.

8. **Свсар (мощные кучево-дождевые с покровом перистых).** Св сар. большого вертикального развития в стадии роста, близкой к максимальному развитию. В облаке преобладают восходящие движения. В нижней части капельные (летом) или смешанные, в средней — смешанные или кристаллические, в верхней — кристаллические. $H_{\text{ВГО}} > 6-7$ км (менее 400 гПа) и может достигать тропопаузы и пробивать её; $H_{\text{НГО}} \leq 0,5$ км; $dH > 6$ км. $\text{COD} \geq 45$; $\text{COT} \geq 100$; $R_{\text{эф}} \geq 25$ мкм. $W_{\text{max}} \geq 1$ г/м³ (до нескольких в холодный период года и до нескольких десятков — в тёплый; более одного максимума); SW от 3–5 кг/м² до нескольких десятков. Осадки всегда: умеренный/сильный дождь или сильный снег (ливневые), возможна снежная крупа ($I > 5-10$ мм/ч). В тёплый период года значения I , W_{max} , SW , COD , COT , dH , $H_{\text{ВГО}}$ и $R_{\text{эф}}$ существенно больше, чем в холодный. Высокая вероятность гроз и града в облаках (в тёплый период года до ~100 % случаев), летом высокая вероятность выпадения града на землю (обычно слабого, но может быть (только летом) умеренным и изредка сильным). Обледенение всегда и сильное.
9. **Сbinc (кучево-дождевые с наковальней).** Сb inc. или Сb сар. арг. в стадии максимального развития (зрелые) или начала распада. В облаке начинают преобладать нисходящие движения. $H_{\text{ВГО}} \geq 7-8$ км (менее 350–400 гПа) и может достигать тропопаузы и даже пробивать её; $H_{\text{НГО}} \leq 0,5$ км; $dH > 7$ км. В нижней части капельные (летом) или смешанные, в средней и верхней — только кристаллические. $\text{COD} \geq 50$; $\text{COT} \geq 150-200$; $R_{\text{эф}} \geq 27,5$ мкм. $W_{\text{max}} \geq 2-3$ г/м³ (несколько максимумов); $\text{SW} > 15$ кг/м². Осадки всегда: сильный ливневой дождь или снег, возможна снежная крупа ($I > 10$ мм/ч). В тёплый период года значения I , W_{max} , SW , COD , COT , dH , $H_{\text{ВГО}}$ и $R_{\text{эф}}$ существенно больше, чем в холодный. Практически всегда грозы (летом сильные, в холодный период года преимущественно слабые) и всегда град в облаках, возможно выпадение града на землю любой интенсивности. Обледенение всегда и сильное.
10. **Сb+Сi (многослойная, верхняя над нижней).** Преимущественно двух- или (реже) трёх-слойная облачность: Сi, Сs над Сb, Сu cong. и/или Ns. $H_{\text{ВГО}} \geq 5-6$ км (менее 500 гПа); $H_{\text{НГО}} \leq 1,5$ км; $dH > 5$ км; $dH_{cl} > 2$ км (толщина облачного слоя без безоблачных прослоек). Верхний слой всегда кристаллический или смешанный с преобладанием кристаллической фазы, а нижний слой капельный (в тёплый период года) или смешанный. $\text{COD} > 20-25$; $\text{COT} > 30-40$; $R_{\text{эф}} > 15$ мкм. $W_{\text{max}} > 0,3$ г/м³ (максимум в самом нижнем слое, но может быть и несколько максимумов); $\text{SW} \geq 0,5$ кг/м². Осадки почти всегда: слабый, умеренный или сильный дождь или умеренный/сильный снег, возможна снежная крупа ($I > 1$ мм/ч). В тёплый период года значения I , W_{max} , SW , COD , COT , dH , $H_{\text{ВГО}}$ и $R_{\text{эф}}$ заметно больше, чем в холодный. Грозы редки и только летом, слабые. Град в облаках нечасто, выпадение маловероятно и только слабой интенсивности. Обледенение практически всегда, преобладает умеренное или сильное.
11. **Сs+As+Ns (многослойная, верхняя над нижней и/или средней).** Двух- или трёх-слойная облачность: Ns, Sc, Cu, St перекрыты очень мощным слоем Сi/Сs (реже), либо между ними присутствует слой As (чаще), либо мощный (несколько километров) слой St, Ns или As перекрыт Сi/Сs, т.е. облачность преимущественно слоистообразная по всей толще. $H_{\text{ВГО}} \geq 5-6$ км (менее 500 гПа); $H_{\text{НГО}} < 4-5$ км; $dH > 2-3$ км; $dH_{cl} > 1-2$ км. В верхнем слое облачность всегда кристаллическая или смешанная с преобладанием кристаллической, в нижнем — капельная (в тёплый период года), смешанная или кристаллическая. $\text{COD} = 10-45$; COT от 5–10 до 100 и более; $R_{\text{эф}} = 5-25$ мкм. $W_{\text{max}} = 0,2-1$ г/м³ (максимум в нижнем слое); $\text{SW} < 3-5$ кг/м². Вероятность выпадения осадков в тёплый период года менее 50 %, зимой — 90–95 %, $I < 5-10$ мм/ч, тип осадков любой, кроме ливневых. Без грозы и града в облаках. Обледенение почти всегда, слабое или умеренное.

- 12. Ac,As+Ci (многослойная, верхняя над средней).** Ci и Cs над Ac, Cu hum., тонкими Sc или As либо (реже) высокие As над Ac или мелкими Cu, изредка оптически плотные однослойные Ci, Cs или высокие As. $H_{\text{ВГО}} > 5-6$ км (менее 500 гПа); $H_{\text{НГО}}$ от 1–2 до 5–7 км в зависимости от типа нижележащей облачности; dH от 1–2 до 10 км и более; $dH_{cl} < 2-3$ км. Облака кристаллические или смешанные с преобладанием кристаллической фазы в верхнем слое и кристаллические, смешанные или капельные — в нижнем. $COD \leq 20$, $COT < 25-30$, $R_{\text{эф}} \leq 15$ мкм. $W_{\text{max}} \leq 0,3$ г/м³ (максимум в нижнем слое); $SW \leq 0,3$ кг/м². Осадки не выпадают летом, а в холодный период — изредка в виде мороси или слабого снега ($I \leq 1$ мм/ч). Возможно слабое обледенение в нижнем слое.
- 13. Cu,Ns,Cb+As (многослойная, средняя над нижней).** Ns, St, Sc, Cu, Cu cong., небольшие Cb перекрыты As или (реже) Sc из Ac, либо однослойные достаточно плотные и мощные As, St или Ac, либо Ns с неровным верхним краем. $H_{\text{ВГО}} = 2-7$ км (400–800 гПа); $H_{\text{НГО}} < 3-4$ км (в зависимости от облачности нижнего яруса); $dH = 1-6$ км; $dH_{cl} < 4$ км. В верхнем слое облака смешанные или кристаллические, в нижнем — смешанные или капельные. $COD = 10-45$; COT от 5–10 до 100–150; $R_{\text{эф}} = 5-27,5$ мкм. $W_{\text{max}} = 0,1-1$ г/м³ (максимум в нижнем слое); $SW \leq 3-5$ кг/м². Высокая вероятность осадков, особенно зимой: морось и слабый/умеренный дождь или слабый/умеренный, редко сильный снег, возможна снежная крупа ($I \leq 5-7,5$ мм/ч). Без грозы и града в облаках. Обледенение практически всегда, слабое или умеренное.

В холодный период года и в высоких широтах ВГО и НГО практически у всех облаков ниже, а ВГО более «твёрдая». Для некоторых облачных классов это справедливо и для ночных условий.

На рис. 1 приведена схема алгоритма классификации типов облаков в КПМ.

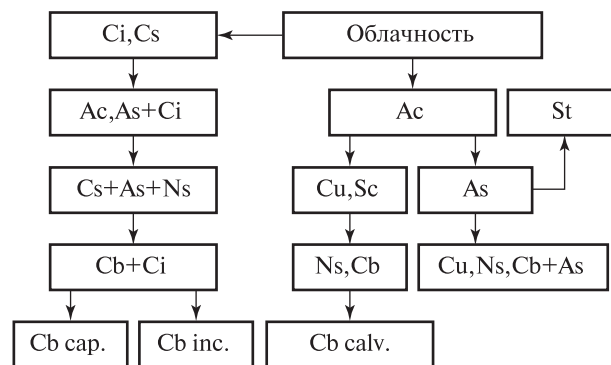


Рис. 1. Алгоритм классификации типов облачности в КПМ

На первом этапе вся облачность разделяется на два класса: содержащая перистые облака (Ci, Cs) и без них (Ac). Для этого используется информация о $H_{\text{ВГО}}$ и фаза (одновременное условие). Чтобы быть причисленной к классу Ci, Cs, облачность должна быть высокой ($H_{\text{ВГО}}$ не ниже 5–5,5 км от уровня моря) и на ВГО кристаллической или смешанной с преобладанием кристаллической (последнее важно, поскольку Ci могут быть оптически очень тонкими и сквозь них будут просвечивать нижележащие более тёплая облачность и подстилающая поверхность). Информация о фазе может быть получена на предыдущем этапе классификации или может быть добавлен алгоритм: $T_{\text{ВГО}}$ облака не выше 250–255 К или ниже T_a на уровне 500–600 гПа (подбирается в зависимости от региона и сезона и задаётся динамическим пороговым решением (ДПР)). Значения $H_{\text{ВГО}}$ также должны задаваться ДПР в зависимости от ϕ (обратно пропорциональны), параметра datd (например, $\text{datd} = 0,1 + |183 - |183 - (\text{day} - 10)|| / 180$, day — номер календарного дня от начала года) или температуры воздуха, приведённой к уровню

моря ($T_{a\text{ур.м}}$) (прямо пропорциональны datd и $T_{a\text{ур.м}}$). Для многоканальной аппаратуры г/с и в/э КА можно вводить дополнительные предикторы, чувствительные к Ci : например, для SEVIRI/Meteosat разность каналов ($T_{120} - T_{87}$) (указаны длины волн, умноженные на 10) должна быть отрицательной. Можно попробовать использовать и разность ($T_{39} - T_{110}$), которая должна быть положительной, однако пороговое значение для неё имеет суточный ход, так как зависит от освещённости, и в ДПР необходимо добавлять высоту солнца (h_o).

Остальные «перистосодержащие» классы облачности последовательно отделяются от класса Ci , Cs как имеющие более высокие значения W_{max} , SW , COD или COT (при отсутствии этой информации можно использовать значения CWP (*англ.* Cloud Water Path) как аналог водозапаса). Во многих методиках, однако, значения этих параметров рассчитываются по формулам, прямо или косвенно использующим значения A , т.е. только в светлое время суток. В этом случае для круглосуточной работы алгоритма можно порекомендовать такие предикторы, как $dT_{\text{ВГО}} = T_{\text{ВГО (измер)}} - T_{\text{ВГО (кор)}}$, $dH_{\text{ВГО}} = H_{\text{ВГО (измер)}} - H_{\text{ВГО (кор)}}$, которые показывают, насколько изменились значения $T_{\text{ВГО}}$ и $H_{\text{ВГО}}$ после коррекции (на микрофизику верхней части облака, поглощение в атмосфере и др.) по отношению к измеренным значениям T_{110} и посчитанным по ним $H_{\text{ВГО}}$ или dH_{cl} . Все три предложенных предиктора косвенно учитывают микрофизические условия в облаке. Значения W_{max} , SW , COD , COT и CWP последовательно нарастают в порядке: Ci , $\text{Cs} - \text{As}$, $\text{As} + \text{Ci} - \text{Cs} + \text{As} + \text{Ns} - \text{Cb} + \text{Ci}$. В зависимости от используемого предиктора (из предложенных выше достаточно одного) и региона пороговое решение может задаваться константой или ДПР (прямо пропорциональны datd или $T_{a\text{ур.м}}$ либо обратно — ϕ). При разделении классов $\text{Cs} + \text{As} + \text{Ns}$ и $\text{Cb} + \text{Ci}$ дополнительно полезно использовать предиктор ($T_{110} - T_{120}$): у $\text{Cb} + \text{Ci}$ его значения ниже и прямо пропорциональны datd и $T_{a\text{ур.м}}$ и обратно — ϕ . Затем от класса $\text{Cb} + \text{Ci}$ отделяются два класса Cbcalv и Cbinc как имеющие очень большие значения W_{max} , SW , dH_{cl} , CWP , COD , COT или маленькие $dT_{\text{ВГО}}$, $dH_{\text{ВГО}}$ (достаточно 1–2 предикторов) и 100%-но ледяные на ВГО (одновременность двух условий). Также (при наличии) к ним можно добавить разность каналов поглощения водяного пара ($T_{73} - T_{62}$) (SEVIRI/Meteosat) или ($T_{80} - T_{64}$) (МСУ-ГС-ВЭ/«Арктика-М») и разность с «озоновым» каналом ($T_{87} - T_{97}$) (так как эти два класса практически всегда сопровождаются грозами) — очень маленькие значения, зависящие прямо от datd или $T_{a\text{ур.м}}$ или обратно от ϕ . Между собой эти классы разделяются так: класс Cbinc имеет более высокие значения $H_{\text{ВГО}}$ и ($T_{110} - T_{120}$) и низкие $T_{\text{ВГО}}$ (ниже 220–210 К или T_a на 250–300 гПа), зависящие прямо от datd и $T_{a\text{ур.м}}$ и обратно от ϕ .

От класса As отделяются слоистообразные облака (As и St) как имеющие более высокие значения ($T_{110} - T_{120}$) (ДПР прямо пропорционально datd или $T_{a\text{ур.м}}$ либо обратно — ϕ); класс St при этом имеет меньшую $H_{\text{ВГО}}$ над поверхностью земли (не более 1–2 км, ДПР обратно пропорционально datd и $T_{a\text{ур.м}}$ и прямо — ϕ), чем As . Затем от As отделяется класс многослойной облачности Cu , Ns , $\text{Cb} + \text{As}$ как имеющий более высокие значения W_{max} , SW , dH_{cl} , CWP , COD , COT и маленькие $dT_{\text{ВГО}}$, $dH_{\text{ВГО}}$ (достаточно одного предиктора, порог — константа или ДПР).

Значения W_{max} , SW , dH_{cl} , CWP , COD , COT , $H_{\text{ВГО}}$ увеличиваются, а $T_{\text{ВГО}}$, $dT_{\text{ВГО}}$, $dH_{\text{ВГО}}$ и ($T_{110} - T_{120}$) уменьшаются в порядке: $\text{As} - \text{Cu}$, $\text{Sc} - \text{Ns}$, $\text{Cb} - \text{Cbcalv}$ (достаточно 2–3 предикторов). ДПР прямо пропорциональны datd и $T_{a\text{ур.м}}$ и обратно — ϕ . Для класса Cbcalv (при наличии) можно добавить предикторы ($T_{73} - T_{62}$), или ($T_{80} - T_{64}$), и/или ($T_{87} - T_{97}$), и/или ($T_{110} - T_{80}$), пороговые значения которых прямо пропорциональны datd и $T_{a\text{ур.м}}$ и обратно — ϕ и меньше, чем у Ns , Cb .

Следует заметить, что параметр datd применим только в высоких широтах, где выражена сезонная смена температурного режима в приземных слоях. Параметр $T_{a\text{ур.м}}$ получают из данных прогноза температуры воздуха в нижних слоях атмосферы: по разности двух нижних слоёв (например, 1000 и 925 гПа) рассчитывается вертикальный градиент и с его помощью корректируется $T_{a\text{призем}}$ (температура воздуха у поверхности земли). Параметр ϕ хорошо работает для зонально-вытянутых территорий ($d\phi > 15\text{--}20^\circ$).

Формула ДПР в большинстве случаев имеет достаточно простой вид: $\text{ДПР} = X + (a_1 + a_2 \cdot \text{par})$, где X — минимально возможное значение предиктора (см. выше описание

классов облачности); par — параметр, который в наибольшей степени влияет на пороговое значение ($datd$, $T_{a\text{ ур.м.}}$, ϕ или h_o); a_1 и a_2 — коэффициенты, которые находятся статистическим методом или как линейное приближение по нескольким точкам при рассмотрении наиболее крайних случаев (день — ночь, лето — зима, север — юг и т. п.). Для некоторых предикторов (например, $(T_{39} - T_{110})$) в формуле для ДПР возможно несколько членов с par : отдельно для температурного режима ($datd$, $T_{a\text{ ур.м.}}$ или ϕ) и h_o .

Разные варианты КПМ для различных спутниковых приборов используют разные комбинации предложенных выше предикторов (табл. 1). На рис. 2 приведён пример карты классификации типов облачности КПМ (описание классов см. выше).

Таблица 1. Предикторные характеристики для расчёта пороговых значений в зависимости от спутниковой аппаратуры

Прибор/КА	Основные предикторы	Вспомогательные предикторы
AVHRR/NOAA	T_{110} , $(T_{110} - T_{120})$, $W_{\max}$, $f_{\text{aза}}$, $H_{\text{ВГО}}$, $T_{\text{ВГО}}$	$T_{a\text{ ур.м.}}$, $datd$, H_{ref} , $T_{a\ 600}$, $T_{a\ 400}$, $T_{a\ 300}$
SEVIRI/Meteosat	$(T_{110} - T_{120})$, $(T_{120} - T_{87})$, $(T_{87} - T_{97})$, $(T_{73} - T_{62})$, $W_{\max}$, $H_{\text{ВГО}}$, dH_{cl} , $f_{\text{aза}}$	$T_{a\text{ ур.м.}}$, H_{ref} , ϕ
МСУ-МР/«Метеор-М»	T_{110} , $(T_{110} - T_{120})$, $(T_{39} - T_{110})$, $W_{\max}$, $H_{\text{ВГО}}$, $T_{\text{ВГО}}$, $f_{\text{aза}}$	$T_{a\text{ ур.м.}}$, H_{ref} , ϕ , $T_{a\ 700}$, $T_{a\ 500}$, $T_{a\ 400}$, $T_{a\ 300}$, $datd$, h_o
МСУ-ГС-ВЭ/«Арктика-М»	$(T_{110} - T_{120})$, $(T_{80} - T_{64})$, $(T_{110} - T_{80})$, $(T_{39} - T_{110})$, $H_{\text{ВГО}}$, dH_{cl} , $f_{\text{aза}}$	$T_{a\text{ ур.м.}}$, H_{ref} , h_o

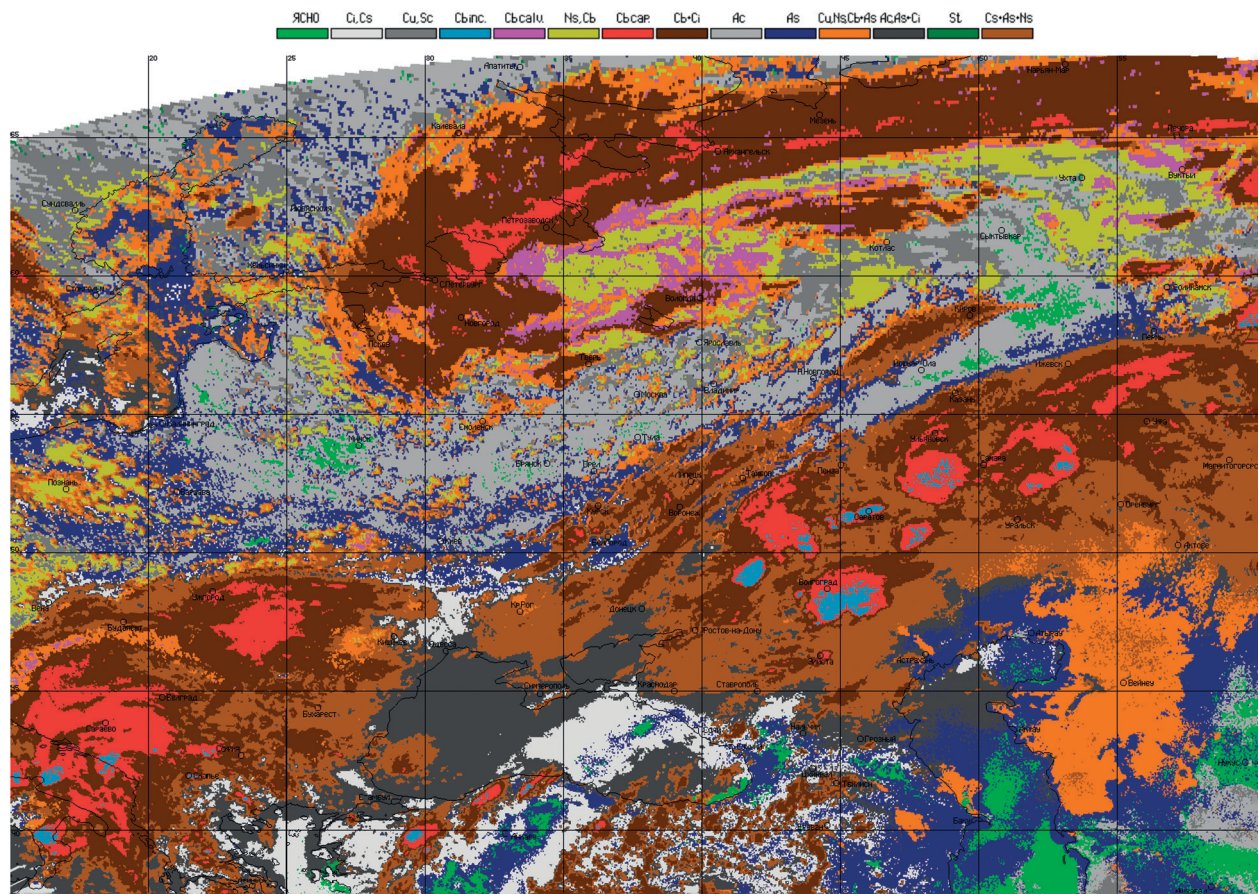


Рис. 2. Облачный анализ: 1 сентября 2022 г., 15:00 UTC (англ. Coordinated Universal Time, всемирное координированное время); SEVIRI/Meteosat-9, равномерная цилиндрическая проекция, регион 42–68° с. ш., 15–60° в. д., линии сетки — через 5°

Визуальный анализ классифицированных спутниковых изображений облачности по спутниковым данным (на соответствие выделяемых классов синоптической ситуации и возможность сочетания определённых классов облачности друг с другом в реальных условиях) показывает хорошее качество выходных продуктов для всех упомянутых выше спутниковых приборов. Ошибки не превышают 10–15 % от всех облачных пикселей и возникают на краях облачных образований, над водоёмами и в горах, т. е. связаны с проблемой частично заполненных облачностью пикселей и переходом одних форм облаков в другие. Действительно, на краях облачных массивов, независимо от их размеров, значения предикторных характеристик облачного класса «смешиваются» со значениями как подстилающей поверхности, так и соседних облачных образований другого типа и из-за этого ошибочно детектируются. Аналогично для полупрозрачной однослойной облачности: просвечивает поверхность земли и меняет её свойства.

Второй источник ошибок состоит в сложности определения классов облачности в составе многослойной. Даже неплотная полупрозрачная облачность может подавлять характеристики расположенной под ней относительно тонкой облачности (например, C_i над A_s) или облаков с небольшими линейными размерами (например, C_i над A_c) — в обоих случаях может ошибочно получиться класс однослойных C_i или A_s . Если ниже расположенная облачность просвечивает сквозь тонкую облачность верхнего или среднего яруса, её H_{BTO} может немного понизиться.

В табл. 2 представлены наиболее типичные ошибки классификации. Видно, что ошибочно принимаемые друг за друга классы облачности (или, скорее, неточное проведение границы между этими классами) оказываются очень близкими по H_{BTO} (C_i, C_s и A_s), COD (Cu, Sc и Ns, Cb или C_i, C_s и $A_c, A_s + C_i$), dH (Ns, Cb и $Cbcalv$), dH и COD слоя C_s или A_s ($Cb + C_i$ и $C_s + A_s + Ns$ или $Cu, Ns, Cb + A_s$ и Ns, Cb) и др. Класс $Cu, Ns, Cb + A_s$ — самый разнообразный по своим характеристикам, поэтому легко взаимозаменяется с другими классами. Действительно, его W_{max} и COD могут меняться от очень маленьких значений (и тогда его легко спутать с A_s или A_c) до очень больших (как у Cu, Sc ; Ns, Cb или $Cbcalv$). Также трудно провести границу по H_{BTO} : например, где облака среднего яруса становятся облаками верхнего яруса и тогда $Cu, Ns, Cb + A_s$ пересекаются с $Cb + C_i$ и $C_s + A_s + Ns$ в зависимости от dH и COD слоя A_s и/или C_i ; или где начинается нижний ярус, например St или Cu, Sc . По этим же причинам не всегда чётко проводится граница между $Cb + C_i$, $Cbcap$ и $Cbinc$, а также $Cu, Ns, Cb + A_s$, $Cb + C_i$ и $C_s + A_s + Ns$. Классы A_c , A_s и Cu, Sc могут ошибочно детектироваться как St , и наоборот. Сложно точно сказать, где переходят друг в друга классы A_s и A_c ; A_s и $Cu, Ns, Cb + A_s$; A_c и Cu, Sc ; Cu, Sc и Ns, Cb ; Ns, Cb и $Cu, Ns, Cb + A_s$; $Cu, Ns, Cb + A_s$ и $Cbcalv$; Ns, Cb и $Cbcalv$. Однако ошибка проведения границы между всеми этими классами облачности, как правило, не превышает 1–2 пикселей.

Таблица 2. Наиболее типичные ошибки при детектировании типа облачности

Детектированный класс	Реальный класс
C_i, C_s	$A_s; A_c, A_s + C_i$
A_s	$C_i, C_s; Cu, Ns, Cb + A_s; A_c, A_s + C_i; A_c$
A_c	$Cu, Sc; Cu, Ns, Cb + A_s; A_c, A_s + C_i; C_i, C_s; A_s$
Cu, Sc	$A_c; Ns, Cb; Cu, Ns, Cb + A_s$
Ns, Cb	$Cu, Sc; Cu, Ns, Cb + A_s; Cbcalv$
$Cbcalv$	$Ns, Cb; Cu, Ns, Cb + A_s; Cb + C_i; Cbcap$
$A_c, A_s + C_i$	$C_i, C_s; A_s; A_c; Cu, Ns, Cb + A_s$
$Cu, Ns, Cb + A_s$	$A_s; A_c; Cu, Sc; Ns, Cb; Cbcalv; C_s + A_s + Ns; Cb + C_i$
$C_s + A_s + Ns$	$Cbinc; Cu, Ns, Cb + A_s; Cb + C_i$
$Cb + C_i$	$Cbcalv; C_s + A_s + Ns; Cu, Ns, Cb + A_s; Cbcap; Cbinc$
St	$A_s; A_c; Cu, Sc; Cu, Ns, Cb + A_s$
$Cbinc$	$Cbcap; Cb + C_i; C_s + A_s + Ns$
$Cbcap$	$Cbinc; Cb + C_i; Cbcalv$

Анализ результатов авторской валидации выходных продуктов всех вариантов КПМ показывает, что грубых ошибок, когда облака с малыми значениями COD классифицируются как с большими или наоборот (например, As или As ошибочно принимаются за Ns, Cb, Cbcalv или Cbcalv либо наоборот, а Ci, Cs — за Cb+Ci или Cbinc), а также когда облачность нижнего яруса классифицируется как более высокая (например, вместо Cu, Sc детектируется Cb+Ci или вместо St — Cbcalv или Ci, Cs и наоборот), отмечено не было.

В ряде случаев ошибки могут возникать над водоёмами, которые в зависимости от времени года и суток могут оказаться теплее или холоднее суши. В результате неплотная облачность над ними может ошибочно немного подняться или опуститься. При этом класс As превращается в St или Ci, Cs, а As или Cu, Sc — в St или Cu, Ns, Cb+As, или наоборот. При просвечивании более тёплых, чем суша, водоёмов облако кажется более низким и оптически тонким, а в случае с более холодными, чем суша, водоёмами, COD и dH облака увеличиваются. Если водоёмы имеют более высокие значения ($T_{110} - T_{120}$), чем суша, при просвечивании их сквозь облачность к реальной облачной ситуации могут ошибочно добавляться As. В результате появляется похожий класс облачности, но +As. Например, вместо Cu, Sc — Cu, Ns, Cb+As, вместо As — As или As, As+Ci, вместо Cb+Ci относительно небольшой водности — Cs+As+Ns. Над водоёмами «ложная» облачность обычно причисляется к классам As, St, As, Cu, Sc или As, As+Ci. В целом такие ошибки облачного анализа визуально легко распознаются, так как повторяют контуры водоёмов (береговой линии).

Ошибки облачного анализа возможны и в горных регионах, когда $H_{\text{НГО}}$ определяется относительно поверхности земли, а $H_{\text{ВГО}}$ — относительно уровня моря. Тогда облачность ложно понижается и облака верхнего яруса превращаются в похожие облака среднего яруса (например, классы, содержащие Ci, — в классы с As).

Пиксели, ложно классифицированные КПМ как облачные, обычно причисляются к классам облачности с малыми значениями COD, W_{max} и dH , расположенной на нижних и средних уровнях в атмосфере, например к As, St, As или (реже) Cu, Sc. Эта облачность всегда без осадков и ОЯП (без грозы, града в облаках и обледенения).

Из-за проблем сопоставления спутниковых и наземных наблюдений за облачностью независимые достоверные количественные оценки точности рассматриваемой технологии существуют только для данных SEVIRI/Meteosat (Волкова, Кухарский, 2020): при сравнении с наземными наблюдениями успешность методики для севера европейской территории России составляет 80–85 % в зависимости от сезона и времени суток, колебания оценок точности для отдельных сроков спутниковых наблюдений относительно средних значений незначимы. Все остальные варианты КПМ настраивались по этим картам: совпадение облачного анализа в зависимости от синоптической обстановки не менее 90–95 % с учётом некоторых различий в описании облачных классов в разных вариантах КПМ.

Заключение

Данная статья — результат многолетнего общения автора как с разработчиками различных технологий классификации спутниковой информации, так и с пользователями их выходной продукции по облачным классам. Большое количество существующих в мире классификаций вызвано разными целями дальнейшего использования продукции, а также умением и возможностями разработчиков распознать облачные пиксели и сгруппировать их по классам. Описанные в работе основные принципы пороговой классификации 13 типов облачности, используемые автором в разных вариантах КПМ, применимы к информации о T_p , полученной спутниковыми приборами AVHRR/NOAA, SEVIRI/Meteosat, МСУ-МР/«Метеор-М», МСУ-ГС-ВЭ/«Арктика-М», однако могут быть легко перенесены на информацию другой, близкой к ним по техническим характеристикам аппаратуры. Методика использует минимальный набор доступной широкому кругу пользователей информации, как спутниковой, так и дополнительной, и может быть быстро адаптирована к любому по размеру и местоположению региону. Благодаря особому построению решающих правил она достаточно надёжно

защищена от грубых ошибок. Высокая точность получаемых спутниковых продуктов по облачному анализу косвенно подтверждается востребованностью карт облачного анализа оперативными синоптиками. Так, решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета от 06.11.2020 технология для данных SEVIRI/Meteosat рекомендована к внедрению в оперативную работу НИЦ «Планета», а выходная продукция — в работу оперативных синоптиков в качестве консультативного метода. Предложенные в статье подходы к классификации могут оказаться полезными на начальных этапах при создании не только аналогичных пороговых методик, но и технологий, основанных на методах машинного обучения.

Литература

1. Асмус В. В., Милехин О. Е., Крамарева Л. С., Хайлов М. Н., Шишаков А. Е., Шумаков И. А. Первая в мире высокоэллиптическая гидрометеорологическая космическая система «Арктика-М» // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 11–26. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-12-11-26.
2. Астафуров В. Г., Скороходов А. В. Использование результатов классификации облачности по спутниковым данным для решения задач климатологии и метеорологии // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 57–70. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-57-70.
3. Астафуров В. Г., Курьянович К. В., Скороходов А. В. Методы автоматической классификации облачности по спутниковым снимкам MODIS // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 3. С. 1–11.
4. Атмосфера: справ. / ред. Седунов Ю. С., Авдюшин С. И., Борисенков Е. П., Волковицкий О. А., Петро Н. Н., Рейтенбах Р. Г., Смирнов В. И., Черников А. А. Л.: Гидрометиздат, 1991. 510 с.
5. Беспалов Д. П., Девяткин А. М., Довгало Ю. А., Кондратьев В. И., Кулешов Ю. В., Светлова Т. П., Суворов С. С., Тимофеев В. И. Атлас облаков. СПб.: РИФ «Д'Арт», 2011. 248 с.
6. Брылев Г. Б. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети. СПб.: Гидрометеоздат, 2002. 332 с.
7. Волкова Е. В., Кухарский А. В. Автоматизированная технология диагноза параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды для Европейской территории России по данным радиометра SEVIRI с геостационарных метеоспутников серии Meteosat MSG // Гидрометеорол. исслед. и прогнозы. 2020. № 4(378). С. 43–62. DOI: 10.37162/2618-9631-2020-4-43-62.
8. Волкова Е. В., Успенский А. Б. Оценки параметров облачного покрова и осадков по данным сканирующих радиометров полярно-орбитальных и геостационарных метеоспутников // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 5. С. 30–43.
9. Волкова Е. В., Андреев А. И., Косторная А. А. Мониторинг характеристик облачного покрова и осадков по данным измерений с полярно-орбитальных и геостационарных спутников // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 45–56. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-12-45-56.
10. Зверев А. С. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометиздат, 1977. 712 с.
11. Код для оперативной передачи данных приземных метеорологических наблюдений с сети станций Росгидромета (КН-01 SYNOP). СПб.: Гидрометеоздат, 2012. 78 с.
12. Косторная А. А., Сапрыкин Е. И., Захватов М. Г., Токарева Ю. В. Метод дешифрирования облачного покрова по спутниковым данным // Метеорология и гидрология. 2017. № 12. С. 16–24.
13. Матвеев Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометиздат, 1965. 874 с.
14. Облака и облачная атмосфера: справ. / под ред. И. П. Мазина, А. Х. Хргиана. Л.: Гидрометиздат, 1989. 647 с.
15. Претор-Пинней Г. Занимательное облаковедение: Учебник любителя облаков: пер. с англ. О. Дементьевской, М. Фаликман / ред. И. Копылова. М.: Livebook, 2015. 384 с.
16. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 1. Л.: Гидрометиздат, 1986. 703 с.
17. Скороходов А. В. Классификация облачности в ночное время суток по спутниковым данным VIIRS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 240–251. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-240-251.
18. Хромов С. П., Мамонтова Л. И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометиздат, 1974. 568 с.
19. Хромов С. П., Петросяни М. А. Метеорология и климатология. М.: Изд-во МГУ, 2001. 526 с.
20. Dim J. R., Takamura T. Alternative approach for satellite cloud classification: edge gradient application // Advances in Meteorology, 2013. Art. ID 584816. <https://www.hindawi.com/journals/amete/2013/584816>.
21. Heidinger A., Walther A., Botambekov D., Straka III W., Wanzong S., Li Y. The clouds from AVHRR extended (CLAVR-x). User's guide. Ver. 6.0.4. Aug. 2019. 64 p.
22. Jiang Yu., Cheng W., Gao F., Zhang S., Wang S., Liu C., Liu J. A cloud classification method based on convolutional neural network for FY-4A satellites // Remote Sensing. 2022. V. 14(10). Art. No. 2314. <https://doi.org/10.3390/rs14102314>.

23. Jin W., Gong F., Zeng X., Fu R. Classification of clouds in satellite imagery using adaptive fuzzy sparse representation // *Sensors*. 2016. V. 16(12). Art. No. 2153. <https://doi.org/10.3390/s16122153>.
24. Kerdraon G., Le Glaue H. EUMETSAT NWC SAF Report to Nowcasting and very short range forecasting. Scientific and validation report for the cloud product processors of the NWC/GEO/NWC/CDOP3/GEO-CMS/SCI/VR/Cloud. Iss. 1. Rev. 1. Apr. 10, 2019. 51 p.
25. Purbantoro B., Aminuddin J., Manago N., Toyoshima K., Lagrosas N., Sumantyo J. T. S., Kuze H. Comparison of cloud type classification with split-window algorithm based on different infrared band combinations of Himawari-8 satellite // *Remote Sensing*. 2018. V. 11(24). Art. No. 2944. <https://doi.org/10.3390/rs11242944>.
26. Sedlar J., Karlsson K. G. Algorithm Theoretical Baseline Document. Joint Cloud property Histogram products AVHRR/SEVIRI. CM-SAF Products CM-11, CM-12. Iss. 1.1. / EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring. Sept. 27, 2011. SAF/CM/SMHI/PDC/CTY. 18 p.
27. Stengel M., Karlsson K. G., Meirink J. F. Clouds. Product User Manual. Ver. 1.8. / EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring. Feb. 22, 2015. SAF/CM/DWD/PUM/CLOUDS. 99 p.

On cloud type classification by a threshold method based on satellite IR data

E. V. Volkova

*State Research Centre for Space Hydrometeorology “Planeta”, Moscow 123242, Russia
E-mail: quantocosa@bk.ru*

Clouds have a great influence on the weather and the climate through forming radiation, heating and water exchange between the Earth and the atmosphere. Each cloud type is connected to a certain set of meteorological processes and events including dangerous ones. That is why any information about cloud classes (their types, forms and shapes) is very important for both operational weather monitoring and studying the climate. The cloud classification adopted by the World Meteorological Organization is discussed below, so is a review of the main satellite cloud classifications based on satellite measurements of albedo and brightness temperatures. The author step-by-step introduces algorithms of a threshold pixel-by-pixel cloud classification technology utilizing only brightness temperatures in different spectral channels, gives a detailed description of classified cloud classes, mentions possible sources of errors and difficulties when cloud analyzing. The algorithms, offered by the author, can be applied to AVHRR/NOAA, SEVIRI/Meteosat, MSU-MR/Meteor-M, MSU-GS-VE/Arktika-M infrared data and similar satellite information.

Keywords: cloud types, satellite cloud classification, cloud analysis, threshold methods, AVHRR/NOAA, SEVIRI/Meteosat, MSU-MR/Meteor-M, MSU-GS-VE/Arktika-M

Accepted: 05.12.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-271-286

References

1. Asmus V. V., Milekhin O. E., Kramareva L. S., Khailov M. N., Shirshakov A. E., Shumakov I. A., The first in the world high elliptic hydrometeorological satellite system “Arktika-M”, *Meteorologia i gidrologiya*, 2021, No. 12, pp. 11–26 (in Russian), DOI: 10.52002/0130-2906-2021-12-11-26.
2. Astafurov V. G., Skorokhodov A. V., Using results of satellite cloud classification for solving climatologic and meteorological problems, *Meteorologia i gidrologiya*, 2021, No. 12, pp. 57–70 (in Russian), DOI: 10.52002/0130-2906-2021-57-70.
3. Astafurov V. G., Kur’yanovich K. V., Skorokhodov A. V., Methods of automatic cloud classification based on MODIS data, *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 3, pp. 1–11 (in Russian).
4. *Atmosfera* (Atmosphere), Sedunov Yu. S., Avdiushin S. I., Borisenkov E. P., Volkovitsky O. A., Petrov N. N., Reitenbakh R. G., Smirnov V. I., Chernikov A. A. (eds.), Leningrad: Gidrometizdat, 1991, 510 p. (in Russian).

5. 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* (Atlas of clouds), Saint Petersburg: RIF D'Art, 2011, 248 p. (in Russian).
6. Brylev G. B., *Meteorologicheskie avtomatizirovannye radiolokatsionnye seti* (Meteorological automatic radio-location net), Saint Petersburg: Gidrometizdat, 2002, 332 p. (in Russian).
7. Volkova E. V., Kukharsky A. V., The automated technology for retrieving cloud cover properties, precipitation and weather hazards based on SEVIRI/Meteosat (MSG) data for the European part of Russia, *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 2020, No. 4(378), pp. 43–62 (in Russian), DOI: 10.37162/2618-9631-2020-4-43-62.
8. Volkova E. V., Uspenskii A. B., Estimation of cloud cover parameters and precipitation utilizing polar-orbiting and geostationary satellite data, *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 5, pp. 30–43 (in Russian).
9. Volkova E. V., Andreev A. I., Kostornaya A. A., Cloud cover and precipitation monitoring based on data from polar orbiting and geostationary satellites, *Meteorologia i gidrologiya*, 2021, No. 12, pp. 45–56 (in Russian), DOI: 10.52002/0130-2906-2021-12-45-56.
10. Zverev A. S., *Sinopticheskaya meteorologiya* (Synoptic meteorology), Leningrad: Gidrometizdat, 1977, 712 p. (in Russian).
11. *Kod dlya operativnoi peredachi dannykh prizemnykh meteorologicheskikh nablyudenii s seti stantsii Rosgidrometa (KN-01 SYNOP)* (KN-01 SYNOP. The codes for operations sending data from the Roshydromet net of meteorological ground-based stations), Saint Petersburg: Gidrometizdat, 2012, 78 p. (in Russian).
12. Kostornaya A. A., Saprykin E. I., Zakhvatov M. G., Tokareva Yu. V., A method of cloud detection from satellite data, *Meteorology and hydrology*, 2017, No. 12, pp. 16–24 (in Russian).
13. Matveev L. T., *Osnovy obshchei meteorologii. Fizika atmosfery* (The foundations of meteorology. Physics of the atmosphere), Leningrad: Gidrometizdat, 1965, 874 p. (in Russian).
14. *Oblaka i oblachnaya atmosfera* (Clouds and cloud atmosphere), Mazin I. P., Khrgian A. H. (eds.), Leningrad: Gidrometizdat, 1989, 647 p. (in Russian).
15. Pretor-Pinney G., *The Cloudspotter's Guide*, Moscow: Livebook, 2015, 384 p. (in Russian).
16. *Rukovodstvo po kratkosrochnym prognozam pogody* (Manual guide book for very short range forecasting), Part 1, Leningrad: Gidrometizdat, 1986, 703 p. (in Russian).
17. Skorokhodov A. V., The cloud classification at night based on VIIRS data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17. No. 3, pp. 240–251 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-240-251.
18. Khromov S. P., Mamontova L. I., *Meteorologicheskii slovar'* (Meteorological dictionary), Leningrad: Gidrometizdat, 1974, 568 p. (in Russian).
19. Khromov S. P., Petrosyants M. A., *Meteorologiya i klimatologiya* (Meteorology and climatology), Moscow: Moscow University Publ., 2001, 526 p. (in Russian).
20. Dim J. R., Takamura T., Alternative approach for satellite cloud classification: edge gradient application, *Advances in Meteorology*, 2013, Art. ID 584816, <https://www.hindawi.com/journals/amete/2013/584816>.
21. Heidinger A., Walther A., Botambekov D., Straka III W., Wanzong S., Li Y., *The Clouds from AVHRR Extended (CLAVR-x), User's guide, Ver. 6.0.4*, Aug. 2019, 64 p.
22. Jiang Yu., Cheng W., Gao F., Zhang S., Wang S., Liu C., Liu J., A cloud classification method based on convolutional neural network for FY-4A satellites, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14(10), Art. No. 2314, <https://doi.org/10.3390/rs14102314>.
23. Jin W., Gong F., Zeng X., Fu R., Classification of clouds in satellite imagery using adaptive fuzzy sparse representation, *Sensors*, 2016, Vol. 16(12), Art. No. 2153, <https://doi.org/10.3390/s16122153>.
24. Kerdraon G., Le Glaue H., *EUMETSAT NWC SAF Report to Nowcasting and very short range forecasting, Scientific and validation report for the cloud product processors of the NWC/GEO/NWC/CDOP3/GEO-CMS/SCI/VR/Cloud, Issue 1, Rev. 1*, Apr. 10, 2019, 51 p.
25. Purbantoro B., Aminuddin J., Manago N., Toyoshima K., Lagrosas N., Sumantyo J. T. S., Kuze H., Comparison of cloud type classification with split-window algorithm based on different infrared band combinations of Himawari-8 satellite, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 11(24), Art. No. 2944, <https://doi.org/10.3390/rs11242944>.
26. Sedlar J., Karlsson K. G., *Algorithm Theoretical Baseline Document, Joint Cloud property Histogram products AVHRR/SEVIRI, CM-SAF Products CM-11, CM-12, Issue 1.1*, EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring, Sept. 27, 2011, SAF/CM/SMHI/PDC/CTY, 18 p.
27. Stengel M., Karlsson K. G., Meirink J. F., *Clouds, Product User Manual, Ver. 1.8*, EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring, Feb. 22, 2015, SAF/CM/DWD/PUM/CLOUDS, 99 p.