Ж.В. Рыбакова

АТМОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОБЛАЧНЫХ ПОЛЯХ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Ж.В. Рыбакова

АТМОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОБЛАЧНЫХ ПОЛЯХ

Научный редактор
канд. геогр. наук Р.А. Ягудин

Томск
Издательство Томского государственного университета
2021

УДК 551.576
ББК 26.23
Р93

Рыбакова Ж.В.

Р93 Атмосферные процессы в облачных полях / науч. ред. Р.А. Ягудин. – Томск : Издательство Томского государственного университета, 2021. – 170 с.

ISBN 978-5-94621-965-5

Поля облаков позволяют увидеть атмосферные процессы разных масштабов, понять влияние потоков солнечной радиации и подстилающей поверхности на эти процессы.

Настоящая работа будет полезна как специалистам, работающим в области анализа и прогноза состояния атмосферы, так и студентам, изучающим атмосферные процессы. Кроме того, данная работа может быть интересна специалистам смежных специальностей.

УДК 551.576
ББК 26.23

Рецензент
канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник
ИМКЭС СО РАН *Е.В. Харюткина*

ISBN 978-5-94621-965-5 © Рыбакова Ж.В., 2021

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее важных свойств облаков является их неотъемлемая связь с породившим их процессом. Смело можно считать облака своеобразной «лакмусовой бумажкой» любого атмосферного процесса. Именно облачность представляет собой более тонкий указатель на характер атмосферных процессов по сравнению, как с полями любых метеорологических величин, так и с полями иных атмосферных явлений, последние из которых, к тому же, наблюдаются значительно реже, чем облака.

Другим важным свойством облаков и их полей является их «чуткость» к формирующемуся процессу – ещё только складывается атмосферный процесс, а облака и их динамика уже этот процесс обозначают. Например, циклона ещё нет, а в поле облаков он начинает прослеживаться. Фронтальная облачность образуется раньше, чем фронт формируется в термобарическом поле. Появление облаков всегда рассматривают как начало какого-либо атмосферного процесса. Более того, даже тенденция изменения облачности прослеживается на снимках ИСЗ раньше, чем изменения в поле давления обнаруживаются на синоптических картах.

Третьим важным свойством облаков является определённая их инертность, например, уже нет циклона, а облачное поле, являясь в некоторой мере полем инертным, ещё сохраняется.

Иными словами, облака появляются раньше самого оформившегося процесса в атмосфере и сохраняются некоторое время после его завершения.

Облачность связана с любыми изменениями синоптической обстановки, с адвективными изменениями температуры и влажности, с трансформацией воздушных масс, с движениями воздуха в раз-

ных направлениях и различного характера – как упорядоченными, так и неупорядоченными.

Облачность зависит от притока солнечной радиации, характера подстилающей поверхности, в частности, её однородности и протяжённости. Все эти факторы определяют временную и пространственную изменчивость облаков и их полей.

В связи с важностью учёта характеристик облаков (количества облаков, их форм, видов, разновидностей) при оценке радиационного и теплового балансов подстилающей поверхности и атмосферы, при определении лётной обстановки (видимости, обледенения и болтанки самолётов и т.д.), а также для понимания протекающего атмосферного процесса и его прогнозирования на некоторое время вперёд облака наблюдают и снизу (наземные наблюдения на метеостанциях), и сверху (наблюдения с искусственных спутников Земли).

Автором в течение нескольких лет работы в отделе анализа спутниковых данных ЗСРНИГМИ (Новосибирск) проанализирован материал спутниковых и наземных наблюдений, что позволило придти к определённым выводам.

Автор выражает глубокую благодарность Сибирскому центру ФГБУ «НИЦ «Планета» за предоставленные материалы.

1. ОСОБЕННОСТИ ОБЛАЧНЫХ ПОЛЕЙ В РАЗЛИЧНЫХ АТМОСФЕРНЫХ СИТУАЦИЯХ

1.1. Облака в циклонах

В целом циклонические образования связаны с облачной погодой, поскольку циклоны представляют собой огромные области восходящих движений, которые являются потенциально и облакообразующими, и осадкообразующими. Вместе с тем облачные поля в циклонах существенно различаются в разных его частях и, кроме того, испытывают значительные изменения в процессе динамики этого барического образования. Более того, в разных циклонах наблюдаются заметные различия в погодных условиях, в том числе, в полях облаков и связанных с ними полях осадков, что зависит от времени года и суток, от характера подстилающей поверхности и, в конечном итоге, от свойств отдельных воздушных масс, входящих в каждое барическое образование.

Воздушные же массы в разных частях циклонов различаются в термогигрометрическом отношении, и, что очень важно, в отношении термодинамическом. В самом деле, центральные, передние, южные и тыловые части циклонов различаются и по количеству облаков, и по их характеру.

Развитие циклона начинается с хорошо прослеживаемой на снимках облаков ИСЗ (искусственных спутников Земли) «стадии волны», когда на фронте поле облачности за счёт искривления у вершины волны в сторону холодного воздуха (виден изгиб полосы облаков) облачный массив расширяется. Специалисты в области анализа спутниковой информации сходятся во мнении о том, что

первоначально зарождающийся циклонический вихрь состоит из облаков слоистых форм, лишь впоследствии в нём появляются кучевообразные облака.

Через весьма непродолжительное время в поле облаков начинает прослеживаться заметная структурная ориентация – появляются выраженные два прогиба в облачной системе. У самой вершины волны прогиб направлен в сторону холодного воздуха, т.е. он имеет антициклоническую кривизну (участок будущего тёплого фронта), несколько ниже вершины волны (в образующемся холодном фронте) – в сторону воздуха тёплого (в сторону создающегося тёплого сектора) т.е. прогиб, имеет циклоническую кривизну.

Если такое волновое возмущение является достаточно активным, то оно положит начало образованию циклона.

Когда циклон молодой, то наибольшая облачность наблюдается у вершины его тёплого сектора. Возраст циклона надёжно определяется и шириной тёплого сектора, поскольку холодный фронт, который перемещается быстрее фронта тёплого, не успевает ещё сузить тёплый сектор, догоняя тёплый фронт. Известно, что холодный воздух перемещается быстрее тёплого. Дело в том, что различие в скоростях движения тёплого и холодного фронтов определяется не только разностью значений коэффициента трения тёплого и холодного воздуха, но и тем, что тёплый воздух совершает движение с вертикальной составляющей в общем движении, снижающей скорость его перемещения по горизонтали. Кроме того, холодные фронты больше, чем фронты тёплые, поддерживаются энергетически, о чём речь пойдёт ниже (см. главу 3).

В более южной части тёплого сектора поле облаков зависит от влажности воздуха: при достаточно высокой влажности развиваются облака слоистого типа, возможна морось, могут формироваться и туманы, поскольку здесь атмосфера обычно устойчива в термодинамическом отношении, но при невысокой влажности погода малооблачная или даже ясная.

Вместе с тем в летний период при значительном прогреве в дневные часы подстилающей поверхности и прилегающего к ней слоя воздуха, если он обладает значительной влажностью, устойчивость его в тёплом секторе несколько уменьшается, свидетельством чему являются конвективные облака, которые чаще всего большой мощности не имеют. Однако замечено, что в ряде случаев параллельно холодному фронту, т.е. в самой западной части тёплого сектора, прослеживаются кучево-дождевые облака, а также связанные с ними ливневые осадки и линия шквала. Понятно, что указанные атмосферные явления характеризуют степень неустойчивости воздуха в рассматриваемой части тёплого сектора. Конечно же, такие тёплые неустойчивые массы воздуха чаще формируются в летнее время и в дневные часы над материками.

Замечено также, что в холодный период слоистая облачность тёплого сектора может соединяться с облачным массивом тёплого фронта.

Таким образом, наличие облачности и её характер в тёплом секторе зависит от сезона года, времени суток, влажности воздуха.

Интересно, что в случаях весьма влажного тёплого сектора в его сторону может расширяться и облачная система холодного фронта, как бы захватывая некоторую часть предфронтального пространства. В таких случаях зона тёплого сектора на снимках ИСЗ и та же зона, но по наземным данным по своей ширине не совпадают. Указанные ситуации обычно прослеживаются в хорошо выраженных ложбинах, в которых расположены фронты, особенно при углублении этих ложбин.

По обе стороны от тёплого сектора облачные системы фронтов выражены неодинаково и в характере облаков, и во временном интервале: более короткое время «проживают» тёплые фронты, тогда как холодные фронты более долговечны. Кроме того, облачные поля последних сохраняются значительно дольше, чем прослеживаемые связанные с ними поля метеорологических величин. Со-

хранение в течение более продолжительного времени холодных фронтов по сравнению с фронтами тёплыми обязано затокам холодного воздуха в тылу циклонов, что поддерживает контрасты между воздушными массами по обе стороны холодного фронта.

Структура облачных полей любых фронтальных зон, как и изменение этой структуры в пространстве, т.е. в разных частях фронтальных зон, зависит от интенсивности вертикальных движений и их характера, от влажности и стратификации восходящего воздуха, а также от угла наклона фронтальной поверхности.

Холодные фронты в поле облачности выражены ярче, чем фронты тёплые, и на снимках облачности имеют весьма чёткую структуру. Хорошо известно, что характер облачных полей в зоне холодных фронтов существенно отличается в зависимости от скорости перемещения данных фронтов.

В медленно смещающихся холодных фронтах облачные полосы состоят преимущественно из ярусных облаков, в поле которых просматриваются вкрапления облаков кучево-дождевых. Основная система ярусных облаков медленно смещающегося холодного фронта представляет собой «зеркальное отражение» системы ярусных облаков тёплого фронта, т.е. Ns – As – Cs – Ci.

Быстро смещающиеся холодные фронты представлены, как правило, преимущественно кучево-дождевой облачностью. На быстро смещающихся холодных фронтах облачная система формируется непосредственно перед фронтом. Это связано с тем, что в данном случае быстро наступающий холодный воздух не предоставляет времени и, следовательно, возможности тёплому воздуху сдвинуться по горизонтали. Не успевающий отодвинуться тёплый воздух под натиском воздуха холодного оказывается вытесненным вверх, порождая мощные кучевообразные облака – облака кучево-дождевые, связанные с ливневыми осадками и нередко с грозами. Описанная ситуация наиболее характерна для лета, а в холодный период – для районов более низких широт или при

смещении воздушных масс из более низких широт, а также при смене характера подстилающей поверхности под перемещающимся воздухом, о чём речь пойдёт в соответствующем разделе.

Ширина облачных полос медленно смещающегося холодного фронта обычно больше ширины облачной полосы, связанной с быстро смещающимся холодным фронтом, что обусловлено особенностями формирования облаков, входящих в указанные облачные системы [15].

Безусловно, параметры облаков холодного фронта зависят от интенсивности процесса адвекции холодного воздуха. При достаточно слабой адвекции фронтальная облачность не бывает ни сплошной, ни широкой.

Понятно, что характер облачных полей холодных фронтов существенно зависит от степени развития конвективных процессов и турбулентности. При слабой конвекции в зоне медленно смещающегося холодного фронта кучево-дождевые облака на фоне ярусных облаков формируются не всегда. Фронтальные облачные поля в таких случаях развиваются за фронтами, поскольку холодная воздушная масса подтекает под тёплую воздушную массу клином, вдоль которого тёплая масса и поднимается. Вместе с тем, конвергенция воздушных потоков в сторону фронта облегчает развитие восходящих движений, наиболее выраженных в летнее время в дневные часы. В это время кучево-дождевая облачность во фронтальных зонах холодных фронтов, даже медленно смещающихся, развивается при сдвиге стратификации воздуха в сторону большей неустойчивости. В позднее же вечернее время, особенно в ночные часы кучево-дождевая облачность размывается, трансформируясь в другие формы облаков [15].

Интересно, что степень подвижности холодных фронтов может определяться по расположению их облачных систем и характеру облачного поля. Так скорость холодного фронта уменьшается, если его облачная полоса принимает меридиональное расположение

и становится почти прямолинейной в случаях глубокой ложбины, в которой лежит фронт. Тогда угол между изобарами и фронтом невелик. Если фронт располагается параллельно изобарам, то он малоподвижен. Однако, если угол между изобарами и фронтом достаточно большой, особенно, если указанный угол близок к прямому углу, то фронт перемещается быстро. Примером могут служить случаи зонального расположения изобар при меридиональном расположении фронта. Таким образом, скорость перемещения фронта зависит от значения угла этого фронта и изобарами.

Замечена также зависимость скорости перемещения фронта от его кривизны. Скорость перемещения тем больше, чем больше кривизна фронтальной облачной полосы. Кроме того, если границы облачного массива чётко не выражены или эти границы чёткость теряют, то скорость перемещения холодного фронта невелика или снижается. Если же массив облаков имеет выраженные границы за холодным фронтом, включая наличие прояснения за ним, то этот холодный фронт достаточно подвижен.

Тёплые фронты выражены многослойной облачностью ярусного характера, в которой в ряде случаев прослеживаются кучево-дождевые облака, «замаскированные» ярусной облачностью. Ярусная облачность в тёплом фронте представлена системой Ci – Cs – As – Ns. Под этой системой, строго говоря, под облаками Ns наблюдаются разорвано-дождевые облака Frnb. Они являются интересной разновидностью облаков разорвано-слоистых St fr. и обычно сопровождают облака, дающие осадки. Это связано с тем, что во влажной зоне фронтальных осадков складываются благоприятные условия формирования Frnb. Иными словами, средой обитания разорвано-дождевых облаков как раз и являются зоны фронтальных осадков. Когда-то считалось, что разорвано-дождевые облака дают осадки. Теперь известно, что эти облака лишь пронизываются осадками фронтальных облаков, расположенных выше. Что же касается разорвано-дождевых облаков, то

осадки в них сформироваться не могут по причине малой их мощности и соответствующего микрофизического строения [10, 11].

Наибольшая мощность фронтальных облаков прослеживается около центра циклона, уменьшаясь к его периферии.

Если во фронтальной зоне складываются преимущественно восходящие движения, имеющие упорядоченный характер, что наблюдается при сравнительно устойчивой стратификации, то формируются облака ярусного типа, указанные выше. Если же на фоне упорядоченных движений наблюдаются ещё и движения неупорядоченные, что бывает при потере воздухом устойчивости и при большем значении угла наклона фронта, то складываются условия для более сильных вертикальных движений в тёплом воздухе. В таких случаях в зоне фронта появляются кучево-дождевые облака.

Кучево-дождевые облака часто формируются в тёплое время года, когда стратификация воздуха сдвигается в сторону неустойчивости, при которой наблюдаются ливневые осадки и нередко развиваются грозовые процессы. Такие ситуации характерны при положительных значениях энергии неустойчивости и при достаточной влажности воздуха. Кучево-дождевые облака как раз и являются результатом реализации больших запасов энергии неустойчивости атмосферы.

В тех случаях, когда облачность тёплого фронта и слоистая облачность тёплого сектора внешне (и по приземным наблюдениям, и по снимкам ИСЗ, сделанным в видимом диапазоне длин волн) неразделимы, на помощь приходят снимки в инфракрасном диапазоне. Более низкие, тёплые слоистые облака тёплого сектора имеют серый цвет в отличие от явно более светлого, даже яркого, цвета фронтальных облаков, в систему которых входят высокие холодные облака Ci и Cs.

Облачные системы тёплых фронтов значительно сильнее, чем фронтов холодных, зависят от возраста, т.е. от стадии развития

циклонов. Кроме того, вдоль всей фронтальной облачной полосы происходит постоянное изменение её ширины. Так, если у молодого циклона облачная система прослеживается на значительном расстоянии и при большей ширине, то по мере развития этого барического образования фронтальный облачный массив сужается и укорачивается. В результате длинные облачные полосы наблюдаются нечасто, специалисты называют это явление «деградацией тёплого фронта».

Строго говоря, тёплый фронт достаточно хорошо представлен фронтальной облачной полосой только в самом начале развития циклона. Эта особенность также отличает тёплый фронт от фронта холодного. Холодные фронты сохраняются дольше фронтов тёплых, поскольку, как уже было указано выше, затоки холодного воздуха за холодным фронтом, т.е. в тылу циклона, поддерживают контрасты температуры соприкасающихся разнородных в термогигрометрическом отношении воздушных масс. В то же время тёплые фронты, перемещающиеся медленнее холодных, соответствующие контрасты температур со временем теряют, особенно в период, когда тёплый сектор заметно сужается, и, наконец, циклон становится окклюдированным.

Безусловно, характеристики облачных полей тёплых фронтов зависят от направления динамики циклонов, связанных с ними. Так в заполняющихся циклонах и высота верхней границы фронтальных облаков, и их количество меньше, чем в циклонах углубляющихся. Уровень же нижней границы облаков тёплого фронта углубляющегося циклона в целом расположен ниже, чем у циклона заполняющегося.

Следует заметить также, что облачная система тёплого фронта в холодное полугодие выражена лучше, чем в тёплое. Более того, в летнее время нередко облачная система тёплого фронта бывает расслоённой, а иногда, чаще в южных широтах, эта система бывает лишённой своей нижней части. В последнем случае тёплый

фронт проходит без выпадения осадков. В некоторых случаях на снимках облачности при прохождении тёплых фронтов система облаков не прослеживалась вовсе. Последний вариант свидетельствует о том, что воздушная масса, совершающая восходящее движение, является не только очень тёплой, но и относительно сухой. Вместе с тем, именно в летнее время, т.е. во время наиболее сильной конвекции, верхняя граница облачной системы облаков тёплого фронта, если они сформировались, в преобладающем числе случаев выше, чем в холодное время.

Чем дальше от приземной линии фронта вперёд смещается система фронтальных облаков и, следовательно, фронтальных осадков, тем более пологим в пограничном слое является тёплый фронт.

Поскольку активность атмосферных фронтов в большой мере определяет интенсивность процесса облакообразования, связанную со скоростью восходящих движений, многие параметры облачных полей изменяются в зависимости от указанной активности. Наибольшая активность атмосферных фронтов, как известно, прослеживается около центра циклона, где и формируются широкие облачные полосы, соответствующие фронтам. По удалению от центра циклона в области периферии данного образования фронтальные облачные полосы, как было указано выше, сужаются.

С удалением от центра циклона в зоне фронтов меняется и характер облачности. На некотором расстоянии от центра циклона слоисто-дождевые облака сменяются облаками слоисто-кучевыми, а высоко-слоистые – высоко-кучевыми. Ещё при некотором удалении от центра циклона облака нижнего и даже среднего ярусов не прослеживаются вовсе, а положение фронта обозначают лишь облака верхнего яруса. Облака верхнего яруса, таким образом, сохраняются при удалении от центра циклона даже на более далёких расстояниях, чем облака среднего яруса, являясь самыми инертными облаками фронтальной системы. Это связано с тем, что об-

лака верхнего яруса являются облаками кристаллическими, облачные частицы которых имеют в воздухе их содержащем упругость насыщения меньшую, чем облака иного микрофизического строения. Для их сохранения по этой причине требуется меньшее количество водяного пара, чем для сохранения других облаков [13].

Вся описанная выше картина облачного поля свидетельствует о том, что контрасты метеорологических величин между двумя воздушными массами, соприкосновение которых и взаимодействие между которыми приводит к образованию фронтальных зон, сильно уменьшаются в горизонтальном направлении при движении вдоль фронтальной зоны в направлении от центра циклона. Что касается изменения контрастов между воздушными массами в вертикальном направлении, то различия между ними обычно почти утрачиваются к верхней границе тропосферы.

По сути дела ведь облака высоко-кучевые, как и облака слоисто-кучевые, фронтальными облаками не являются, а трансформация в них облаков фронтальных свидетельствует об ослаблении интенсивности фронтальных процессов при удалении от центра циклона.

Система облаков активных холодных фронтов значительно ярче выражена и в количестве, и в ширине облачных полос. Малоактивные холодные фронты выражены в полях облачности весьма скромно – малым количеством облаков над сушей и узкими облачными полосами над водными поверхностями, причём эти полосы, как правило, сплошными не бывают. Что касается тёплых фронтов, то, как указано выше, сплошные облачные полосы наблюдаются только в начальных стадиях развития циклона.

В облачных системах как тёплых, так и медленно смещающихся холодных фронтов облака Ns – As могут составлять единую облачную систему с облаками Cs, а могут быть разделимыми с ними безоблачным слоем, что зависит от влажности воздуха и его температуры.

В системах облаков тёплого фронта их верхняя часть (Ci – Cs) чаще всего бывает самостоятельным слоем. Верхняя граница перистых облаков обычно прослеживается вблизи тропопаузы и совпадает с высотой уровня максимальных скоростей, что имеет место на оси струйного течения.

В ложбинах, т.е. в областях с наибольшей циклонической кривизной на периферии циклона, точнее вдоль осей ложбин, часто прослеживаются расположенные в них атмосферные фронты. В этих областях низкого давления, сходимости приземных потоков воздуха и его восходящих движений в более высоких слоях характер облаков определяется типом фронта, который в каждой данной ложбине расположен. Линией наименьшего атмосферного давления в данной области вытянутых изобар в направлении от центра циклона к его периферии является ось ложбины. По этой причине в направлении к этой оси наблюдается сходимость приземного ветра, что и приводит к восходящим движениям воздуха, следовательно, к наиболее частому расположению атмосферных фронтов и формированию фронтальных облаков и осадков. Конечно же, выраженность этих фронтов в полях облаков зависит и от направления развития ложбины, т.е. от того, углубляется она или заполняется.

Замечено также, что облака дольше сохраняются на фронтальной полосе того фронта, который лежит в хорошо выраженной ложбине. Это связано с более сильными восходящими движениями в таких ложбинах. Особенно ярко указанная связь прослеживается в случаях кучево-дождевых облаков, что связано с природой их образования [15].

Следует отметить хорошо известный факт большей мощности системы облаков вблизи приземной линии фронтов. С удалением от неё вертикальная протяжённость фронтальной облачной системы уменьшается. Указанный факт имеет место, как для фронтальных облаков ярусного характера Ns – As (облака Cs – Ci располо-

жены на некотором горизонтальном удалении от системы Ns – As), так и для кучевообразных облаков (Cb). В первом случае это связано с тем, что верхняя граница системы ярусных фронтальных облаков имеет примерно горизонтальное положение относительно подстилающей поверхности, следовательно, вертикальная протяжённость облаков увеличивается с понижением их нижней границы. Именно такая ситуация наблюдается вблизи приземной линии фронта. Во втором случае наибольшая интенсивность облакообразования связана с вытеснением тёплого воздуха вверх, что тоже наблюдается у приземной линии фронта.

Высота верхнего уровня фронтальных облаков зависит от ориентации этих фронтов. Так на ориентированных в меридиональном направлении тёплых и медленно перемещающихся холодных фронтах при небольших углах этих фронтов с изобарами верхняя граница системы фронтальных облаков не превышает 12 км. Если тёплые фронты ориентированы примерно с запада на восток при значении примерно прямого угла с изобарами, то они являются фронтами несколько более подвижными, и верхняя граница их облачной системы нередко превышает 12 км. Наиболее низкая верхняя граница облаков соответствует медленно смещающимся холодным фронтам, ориентированным с запада на восток, при той же ориентации изобар, составляя значения менее 10 км, а порой – и 5–8 км.

Когда холодный фронт догоняет тёплый фронт, т.е. происходит окклюдирование (occlusion – преграда, закупорка, смыкание – лат.) циклона, в облачных полях происходят заметные изменения. Окклюзия – это своеобразная «морщинка на лице циклона». Действительно, с уменьшением температурных контрастов (тёплый воздух, не успевая отодвигаться, вытесняется холодным воздухом холодного фронта вверх, оставляя на границах соприкосновения воздушных масс только холодный воздух с разными температурными характеристиками) происходит уменьшение скорости перемещения циклона, ослабляются конвективные процессы, поскольк-