

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра метеорологии и климатологии

Г.Ф. ИВАНОВА

**АНАЛИЗ БАРИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ
И АТМОСФЕРНЫХ ФРОНТОВ**

Учебное пособие по дисциплинам

«Основы синоптической метеорологии»,

«Специальные методы анализа и прогноза погоды»

для бакалавров, обучающихся по направлению 05.03.05

«Прикладная гидрометеорология»

Саратов
2017

Содержание

Введение.....	3
1. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ АНАЛИЗА И СОСТАВЛЕНИЯ ОБЗОРА СИНОПТИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ.....	5
1.1. Порядок анализа приземных карт погоды	5
1.2. Методические указания по порядку составления обзора синоптического положения в срок наблюдения.....	5
1.3. Методические рекомендации к составлению анализа развития атмосферных процессов за предыдущие сутки и прогноза на сутки вперед.....	7
2. ЦИКЛОНЫ И АНТИЦИКЛОНЫ.....	9
2.1. Определения и терминология.....	9
2.2. Классификация циклонов.....	10
2.3. Классификация антициклонов.....	11
2.4. Теоретические основы циклогенеза и антициклогенеза.....	12
2.5. Условия возникновения и эволюции фронтальных циклонов.....	21
2.6. Стадии развития фронтальных циклонов.....	24
2.7. Условия возникновения и эволюции фронтальных антициклонов.....	29
2.8. Стадии развития фронтальных антициклонов.....	30
3. ПРОГНОЗ ЭВОЛЮЦИИ ЦИКЛОНОВ И АНТИЦИКЛОНОВ.....	34
3.1. Общие сведения об эволюции циклонов и антициклонов.....	34
3.2. Горизонтальный перенос вихря скорости.....	36
3.3. Градиент геопотенциала на карте ОТ 500/1000	37
3.4. Эмпирические правила эволюции барических образований.....	38
3.4.1. Правила эволюции барических образований по барическим тенденциям.....	38
3.4.2. Правила эволюции барических образований по изаллогипсам карты АТ 700 гПа.....	40
3.5. Пространственная структура барических образований.....	41
3.6. Адвекция температуры	41
3.7. Стратификация атмосферы.....	42
3.8. Фронтальная структура циклонов.....	43
3.9. Регенерация циклонов и антициклонов.....	43
4. АТМОСФЕРНЫЕ ФРОНТЫ.....	47
4.1. Определения и основные понятия об атмосферных фронтах.....	47
4.2. Классификации атмосферных фронтов.....	48
4.3. Особенности полей метеорологических величин в области фронта.....	50
4.4. Особенности полей облачности и осадков с теплым фронтом.....	53
4.5. Отклонения от классической схемы теплого фронта.....	55
4.6. Признаки прохождения теплого фронта.....	55
4.7. Особенности полей облачности и осадков.....	56
4.8. Фронты окклюзии	58
4.9. Особенности полей облачности и осадков с фронтами окклюзии ...	59
Литература.....	60

Введение

Под синоптическим положением понимается совокупность атмосферных процессов в данный момент времени, отображенных на картах погоды.

Прогноз синоптического положения сводится к прогнозу перемещения и эволюции воздушных масс, атмосферных фронтов, циклонических и антициклонических образований на определенный промежуток времени. Синоптическое положение отображается на приземных картах погоды и картах барической топографии. Поэтому завершением прогноза синоптического положения является построение прогностической карты, на которой отражается будущее положение барического поля, будущее состояние и положение фронтов. Поскольку каждой воздушной массе или фронту соответствует определенный тип погоды, то без правильного прогноза состояния барического поля, состояния воздушной массы, смещения фронтов невозможно составить правильный прогноз погоды. Таким образом, прогноз синоптического положения является основой прогноза погоды.

Способы прогноза синоптического положения условно разделяют на следующие группы:

- 1) численные методы, основанные на решении уравнений гидродинамики и термодинамики применительно к задаче прогноза погоды или на использовании методов математической статистики и теории вероятностей;
- 2) приемы формальной и физической экстраполяции, не требующие применения сложной вычислительной техники;
- 3) качественно-физические заключения синоптика об ожидаемом течении атмосферных процессов.

Перечисленные способы имеют общую синоптическую основу, и с этой точки зрения являются синоптическими способами прогноза. Все эти способы опираются на знание определенных закономерностей атмосферных процессов и обобщают опыт прогностической работы. Часть из них получила теоретическое обоснование и выдержала статистическую проверку. Однако ни один из способов не может решить все задачи прогноза синоптического положения и поэтому в оперативной работе совместно используются все способы, т. е. прогноз синоптического положения является комплексным прогнозом. При этом прогноз синоптического положения осуществляется по следующей схеме:

- 1) численными методами с помощью электронных вычислительных машин предвычисляются поля приземного давления и геопотенциальных высот различных изобарических поверхностей и составляются прогностические (будущие) карты погоды. Предвычисляются также температура воздуха, вертикальные скорости ветра, облачность и осадки;
- 2) в полученные карты вносятся поправки и дополнения на основе всей имеющейся информации, включая данные метеорологических спутников.

Большое внимание уделяется прогнозу положения центров циклонов и антициклонов и атмосферных фронтов. Поскольку численными методами атмосферные фронты не предсказываются, то на основе качественно-физических заключений указывается ожидаемое положение линий фронтов. Чтобы правильно предусмотреть дальнейшее развитие синоптических процессов, синоптик наряду с общими заключениями, основанными на понимании физической сущности атмосферных процессов и личном опыте прогностической работы, использует приемы физической и формальной экстраполяции.

В своих качественно-физических заключениях синоптик использует следующие принципы и практические приемы прогноза синоптического положения:

- 1) знание общих физических закономерностей развития атмосферных процессов, проверенных практикой и получивших выражение в виде термодинамических и динамических зависимостей;
- 2) представление о возможной изменчивости метеорологических величин во времени и пространстве;
- 3) знание возможных средних значений и крайних пределов метеорологических величин на основе климатических данных;
- 4) представление о точности измерений и случайных ошибках в измерении метеорологических величин;
- 5) знание оптимальных условий использования той или иной прогностической методики;
- 6) сохранение последовательности в анализе атмосферных процессов;
- 7) сопоставление с развитием подобных (аналогичных) атмосферных процессов в прошлом;
- 8) учет местных особенностей.

Только при соблюдении всех этих положений можно сделать правильное заключение о последующем развитии атмосферных процессов, то есть составить правильный прогноз синоптического положения. На этих же принципах основывается и прогноз погоды.

1. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ АНАЛИЗА И СОСТАВЛЕНИЯ ОБЗОРА СИНОПТИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Порядок анализа приземных карт погоды

Приступая к анализу текущей синоптической карты и ознакомившись с синоптическим процессом по предыдущим картам, полезно сначала определить основные особенности синоптического положения, а затем производить полный анализ с карандашом в руке.

Так как погода, в конечном счете, определяется физическими свойствами воздушных масс, стадией развития барических образований и интенсивностью атмосферных фронтов, то анализ следует начинать именно с анализа эволюции барических образований и погодных условий в них. Приземная синоптическая карта анализируется в следующем порядке:

- а) выделяются районы, занятые устойчивыми и неустойчивыми массами воздуха и определяется их геострофический тип;
- б) выделяются зоны обложных осадков;
- в) проводятся изолинии барических тенденций (изаллобары);
- г) предварительно намечается положение атмосферных фронтов;
- д) проводятся изобары;
- е) уточняется положение фронтов и определяется тип фронта;
- ж) окончательно оформляется синоптическая карта. Уточняются границы зон осадков в соответствии с положением фронта и снимками облачности, дорисовываются и надписываются изобары, обозначаются названия воздушных масс и барических центров.

Указанный порядок анализа синоптической карты помогает более уверенно проводить на карте атмосферные фронты.

1.2. Методические указания по порядку составления обзора синоптического положения в срок наблюдения

При составлении обзора синоптического положения необходимо дать описание барических, термических полей и атмосферных фронтов над Европейской территорией, над Центральными и северными районами Атлантического океана, над западными районами Азиатского континента за утренний срок текущих суток. При описании синоптических условий надо придерживаться следующей последовательности:

1. Тип, положение и интенсивность Планетарной Высотной Фронтальной зоны (ПВФЗ) и Струйного течения (СТ):

- а) число, месяц, год;
- б) тип ПВФЗ, расположение по территории Евразии (на карте АТ-500 гПа) и ее интенсивность (максимальная скорость ветра и градиент геопотенциала в гп. дам/1000 км) на оси ПВФЗ и над приземным центром барического образования;

в) тип, расположение СТ по территории Евразии и относительно приземного центра барического образования, максимальная скорость на оси СТ.

2. Географическое положение, горизонтальные размеры и глубина барических образований:

- а) географическое положение барических образований на приземной карте погоды, либо характер барического поля над данным физико-географическим районом;
- б) давление в центре барических образований;
- в) форма замкнутых изобар (эллиптическая, круговая), наличие нескольких центров (одноцентровое, многоцентровое, циклоническая серия);
- г) горизонтальные размеры барических образований (диаметр в км) или занимаемая площадь (барическое образование распространяется от ...до...).

3. Характеристика барических образований по условиям их образования и типам фронтальных систем:

- а) связь барического образования с фронтальными системами;
- б) для антициклона: его тип – фронтальный (промежуточный, заключительный), нефронтальный (местный, термический), в какой воздушной массе сформирован (в арктической, умеренной, тропической - континентальной или морской);
- в) для циклона: дать тип фронта (арктический, полярный) и характер фронта (основной, вторичный), географическое положение и протяженность атмосферного фронта;
- г) какие воздушные массы фронт разделяет (арктическую и умеренных широт и т. д.), ширина теплого сектора, наличие фронта окклюзии);
- д) оценить интенсивность фронта по величине контраста температуры (разность температуры по обе стороны от фронта на расстоянии 500 км), поворот ветра в зоне фронта у поверхности земли.
- е) скорость и направление перемещения фронта и барических образований.

4. Характер погоды в различных частях барического образования:

- а) для циклона: в передней части, в теплом секторе, в тыловой части;
- б) для антициклона: в восточной, южной, западной, северной, центральных частях;
- в) для каждой указанной области барического образования описать условия погоды (облачность, осадки, видимость, явления, направление и скорость ветра, температура воздуха).

5. Интенсивность и положение изаллобарических очагов и нулевой изаллобары на приземной карте:

- а) характер и величина барических тенденций в различных частях барических образований, положение нулевой изаллобары.

6. Вертикальная структура барических образований;

- а) барическое образование - низкое, среднее, высокое, верхнее;
- б) до каких высот прослеживается: число замкнутых изогипс на изобарических поверхностях, наклон пространственной оси, величины геопотенциала в центрах барических систем на разных уровнях;
- в) географическое положение барических центров на картах АТ и их отдаленность от соответствующих приземных центров;
- г) характеристика очагов суточных изаллогипс на АТ-700, АТ-500 гПа (их положение и интенсивность).

7. Характер адвекции температуры на картах АТ-850, АТ-700, АТ-500 гПа и у поверхности земли, возможность регенерации барических образований:

- а) построить карту термобарического поля (ТБ). ТБ карту строят путем наложения на изогипсы карты АТ-700 гПа изогипс (изотерм) карты OT_{1000}^{500} .
- б) по карте термобарического поля определить угол адвекции по взаимному расположению изогипс и изотерм в различных частях барического образования (в передней, тыловой частях и в центре);
- в) построить траектории частиц воздуха на 12 и 24 часа: «откуда придет воздушная частица через 12 и 24 часа» на картах АТ-850, АТ-700, АТ-500 гПа. При этом откладываются траектории переноса против потока;
- г) определить характер адвекции температуры для пункта прогноза вдоль траектории переноса воздушных частиц.

8. Оценить стадию развития барического образования и его эволюцию.

9. Сравнивая приземные карты и карты БТ двух последовательных суток надо описать, какие изменения произошли за сутки, руководствуясь следующими методическими рекомендациями.

1.3. Методические рекомендации к составлению анализа развития атмосферных процессов за предыдущие сутки и прогноза на сутки вперед

Составлению прогноза погоды по пункту и по району обязательно предшествует прогноз развития синоптических процессов (прогноз синоптического положения), который составляется на основе анализа развития атмосферных процессов за прошедшие сутки.

При анализе описывается фактическое смещение и фактическая эволюция барических образований, с указанием правил, в соответствии с которыми определялось смещение барических образований, а также причин обострения и размывания фронтов. Указать изменение стадий развития барических образований и их вертикальной структуры, а также образование новых барических центров.

Связующим звеном в развитии процессов над Евроазиатской территорией является Высотная Фронтальная Зона (ВФЗ), под которой развиваются циклоны (серии циклонов) и антициклоны (промежуточные и

заключительные). Следовательно, начать анализ надо с барического образования, находящегося впереди по потоку, и переходить к следующему за ним.

При наличии двух ВФЗ можно вначале рассмотреть процессы, развивающиеся под одной ВФЗ и затем - под другой, обратив внимание на взаимодействие (сближение и слияние их в том или ином районе при меридиональных или широтных перестройках высотного термобарического поля).

Высокие холодные циклоны и высокие теплые антициклоны, ввиду отсутствия над ними ВФЗ можно рассматривать отдельно, как составляющие высотного деформационного поля (ВДП).

В анализе указать, по какой периферии циклона (антициклона), на какие географические районы, в какой толще атмосферы в предшествующие сутки осуществлялся вынос тепла и заток холода. На это хорошо указывают фактическое смещение за сутки теплых и холодных фронтов, а также очаги изаллогипс (очаги потепления и похолодания) на карте OT_{1000}^{500} .

В случае значительных перемещений в предшествующие сутки теплых и холодных воздушных масс необходимо обратить внимание на изменения высотного барического поля, на изменения направленности и скорости высотных потоков (на карте АТ-500 гПа) над конкретными географическими районами. При прогнозировании нужно рассчитать будущее положение барических образований, фронтов на срок прогноза с учетом возможной перестройки ведущего потока с использованием прогностических высотных карт или же путем качественного учета их эволюции.

В прогнозе нужно указать, какой синоптический процесс или синоптическая ситуация будет определять погоду в ближайшие сутки: например, гребень высокого давления, антициклон или его периферия, теплый сектор циклона, прохождение теплого или холодного фронта.

Текст прогноза, должен вытекать из ожидаемой над этим районом синоптической обстановки. Последовательность и терминология метеорологических параметров, включаемых в суточный прогноз погоды, представлены в приложении.

2. ЦИКЛОНЫ И АНТИЦИКЛОНЫ

2.1. Определения и терминология

Понятия «циклон» и «антициклон», как синоптические объекты, являются более широкими, чем «депрессия» и «барический максимум». Циклон и антициклон — это не только область соответственно пониженного и повышенного давления с замкнутыми изобарами (изогипсами). Это прежде всего атмосферные вихри с особой циркуляцией, специфической структурой полей метеорологических величин, определенными комплексами погодных условий, относительно медленно меняющимися на протяжении существования этих объектов. Поэтому прогноз их перемещения и эволюции является одним из важнейших этапов синоптического способа краткосрочного прогноза погоды.

Циклоны и антициклоны обычно имеют одну точку с экстремальным значением давления. Такие барические образования называются **одноцентровыми**. Иногда циклон или антициклон может иметь несколько точек с относительно низким (высоким) давлением. Такие барические образования называют **многоцентровыми** (двухцентровыми, трехцентровыми). С высотой повторяемость многоцентровых барических систем существенно уменьшается, так что на картах АТ они имеют более простую структуру, чем на приземной карте погоды.

Два циклона с примерно одинаковой глубиной, объединенные общими изобарами, называются **сопряженными**. Если же один из них имеет меньшие размеры и давление в центре выше по сравнению с другим, то такой циклон называется **вторичным или частным**, а сопряженный с ним циклон — **основным**.

В тех случаях, когда в гребне антициклона возникает небольшой антициклон с давлением в центре меньшим, чем у основного антициклона, его называют **вторичным антициклоном или отрогом**.

При характеристике отдельных циклонов и антициклонов пользуются понятием **горизонтальной оси симметрии**. При круговых изобарах (изогипсах) горизонтальная ось симметрии представляет собой диаметр изобары (изогипсы). При эллиптических изобарах (изогипсах) выделяют малую и большую горизонтальные оси. Пространственная ось циклона или антициклона наклонена к горизонту под малым углом и может быть криволинейной. В связи с существенным различием в вертикальном и горизонтальном масштабах циклонов и антициклонов определить точно угол наклона высотной оси трудно. Поскольку положение центра барического образования на синоптической карте можно определить с точностью до 50 км, то уже при угле около 6° приходится считать положение высотной оси близким к вертикали.

Циклоны и антициклоны бывают приземными, когда замкнутые центры наблюдаются только у земли, средними, когда соответствующие им

центры также появляются до АТ-700 и 500 гПа и высокими, когда центры появляются и на АТ-300гПа.

2.2. Классификация циклонов

Определение: Циклоном называется замкнутая область низкого давления с вихревым вращением воздуха против часовой стрелки в северном полушарии.

Воздушные течения в циклоне у земли сходятся в центре и образуют восходящие потоки. При поднятии воздуха вверх он охлаждается, водяной пар конденсируется, и образуются облака. Поэтому в циклоне, особенно в его центре, преобладает облачная погода, и выпадают осадки.

Обычно циклоны существуют несколько суток. Вначале он движется со скоростью 30-45 км/час, затем его движение замедляется, и он становится малоподвижным и постепенно заполняется и исчезает.

В зависимости от района зарождения циклоны делятся на внетропические и тропические. В зависимости от причин зарождения циклоны делятся на фронтальные и нефронтальные.

Фронтальные циклоны, обуславливающие погоду над территорией Европы, Западной Сибири, Казахстана и Средней Азии можно разделить на 3 типа: западные (или атлантические), южные и ныряющие.

Западные циклоны (или атлантические) зарождаются на арктическом или полярном фронтах на севере и в центре Атлантического океана. Траектории западных циклонов образуют 3 хорошо выраженные ветви: 1-ая – северная ветвь проходит по северным морям и северным районам Евразийского континента; 2-ая - средняя проходит севернее 60° с.ш.; 3-ья ветвь проходит южнее 60° с.ш.

Южные циклоны развиваются на полярном фронте над районами южных морей и югом Европы. Чаще всего южные циклоны зарождаются над Средиземным и Черным морями, но иногда они могут развиваться в районах Каспийского и Аральского морей.

Траектории смещения южных циклонов также образуют 3 хорошо выраженные ветви:

- 1) северная – циклоны выходят с Черного моря и движутся почти меридианально (на север) с небольшой восточной составляющей.
- 2) средняя - циклоны смещаются на Среднее Поволжье и Средний Урал.
- 3) южная – циклоны смещаются на восток через Среднюю Азию, Казахстан и юг Западной Сибири.

Ныряющими называются циклоны, смещающиеся с севера или северо-запада на юг или юго-восток. Ныряющие циклоны над ЕТР наблюдаются в тех случаях, когда над Западной Европой располагается антициклон, а над северо-востоком ЕТР и северо-западом Западной Сибири – глубокий циклон.

Несколько циклонов, последовательно возникающих на одном и том же главном (полярном или арктическом) фронте, с промежуточными между

ними антициклонами и гребнями называются **серией (семейство) циклонов** (рис. 2.1). Серия циклонов связана с повторяющимся волнообразованием на главном фронте.

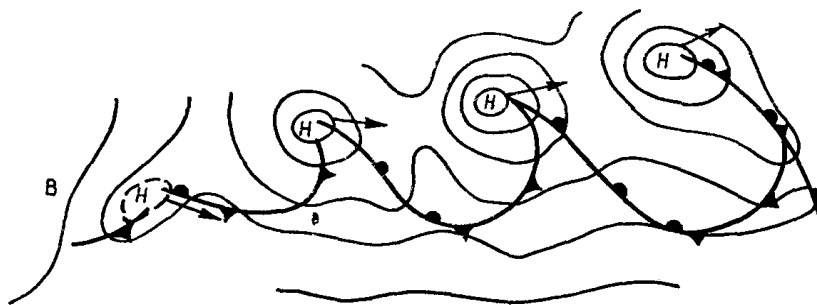


Рис. 2.1. Схема циклонической серии на приземной карте

К нефронтальным циклонам относятся **тропические циклоны и термические депрессии**. Тропические циклоны это ураганы (тайфуны) и слабые циклонические образования экваториальной зоны.

Тропические циклоны, в отличие от внетропических, представляют из себя небольшие по размерам области низкого давления, в которых наблюдаются очень большие барические градиенты, сильные ветры и интенсивные ливневые осадки.

Термическая депрессия. Среднеазиатская термическая депрессия тесно связана с более мощной депрессией, развивающейся в Передней Азии (Ирак, Иран, Афганистан и Западный Пакистан). В период наибольшего развития и углубления переднеазиатская депрессия своей северной частью захватывает Среднюю Азию, а иногда и юг Казахстана. Основной причиной возникновения термической депрессии является нагревание воздушной массы над обширными пустынями Передней и Средней Азии и общий летний отток воздуха с Азиатского материка на океан в верхних слоях.

2.3. Классификация антициклонов

Определение: Антициклон это замкнутая область повышенного давления с циркуляцией воздушных потоков по часовой стрелке в северном полушарии.

Ветры в антициклоне дуют от центра антициклона на периферию, образуя вихревые воздушные течения по часовой стрелке в северном полушарии.

В антициклоне наблюдаются нисходящие воздушные течения. При опускании холодный воздух нагревается и становится более сухим. В связи с этим погода в антициклоне бывает часто безоблачная, сухая, летом жаркая, зимой холодная. За счет нисходящих течений в антициклоне формируются инверсии температуры, и образуются инверсионные слоистые облака.

Антициклоны смещаются со скоростью 30-50 км/час, но бывают и малоподвижные, которые иногда неделями остаются на одном и том же месте.

Горизонтальные размеры антициклона больше, чем циклона. Диаметр крайней внешней изобары от 1000 до 6000 км, в среднем около 2000 км.

Интенсивность антициклона (давление в центре) может быть различной. Максимальное давление в центре антициклона 1070-1080 гПа.

Барические градиенты в центре антициклона небольшие, а к периферии они возрастают. Поэтому в центре антициклона ветры слабые, а на периферии сильные.

В зависимости от географического района, особенностей возникновения и развития различают:

- внутропические антициклоны – фронтальные (промежуточные и заключительные) и нефронтальные (местные, термические);
- субтропические антициклоны (располагаются в субтропических широтах 30-35° обоих полушарий).

Промежуточные антициклоны это антициклоны между соседними циклонами одного семейства. Они представляют собой барические гребни, вытянутые от одной или двух антициклональных систем. В этих гребнях редко образуются замкнутые антициклонические изобары. Промежуточные антициклоны обычно низкие, холодные и быстро движущиеся.

Заключительные антициклоны являются основным типом фронтальных антициклонов. Они образуются за холодным фронтом последнего циклона семейства. Развитие заключительного антициклона обрывает процесс циклогенеза на данной ветви основного фронта.

2.4. Теоретические основы циклогенеза и антициклогенеза

Проблема образования циклонов и антициклонов и их развития представляет собой одну из важнейших проблем синоптической метеорологии. **Процесс образования и углубления (усиления) циклонов (антициклонов) называется циклогенезом (антициклогенезом).** Циклогенез и антициклогенез взаимосвязаны.

С гидродинамической точки зрения циклоны и антициклоны представляют собой вихри большого масштаба, в которых воздух совершает вращательное движение.

Для процессов синоптического масштаба достаточно ограничиться рассмотрением вертикальной составляющей движения в горизонтальной плоскости вокруг оси z . Вихрь вектора скорости с вертикальной осью вращения определяется формулой:

$$\Omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (2.1)$$

где u и v - горизонтальные составляющие скорости перемещения воздуха. Величина Ω_z численно равна удвоенной угловой скорости вращения частицы. В дальнейшем изложении вертикальную составляющую вихря скорости для краткости будем называть просто «вихрь скорости» и обозначим через Ω .

Подставим в (2.1) составляющие скорости геострофического ветра:

$$u_g = -\frac{1}{\rho l} \frac{\partial p}{\partial y} \quad v_g = \frac{1}{\rho l} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.2)$$

Получим связь вихря скорости с лапласианами давления

$$\Omega = \frac{1}{\rho l} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) = \frac{1}{\rho l} \nabla^2 p \quad (2.2)$$

Где $\nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}$ — лапласиан от давления.

Аналогично, используя поле изогипс для карт абсолютной топографии, можно записать

$$u_g = -\frac{9.8}{l} \frac{\partial H}{\partial y}; \quad v_g = \frac{9.8}{l} \frac{\partial H}{\partial x};$$

$$\Omega = \frac{9.8}{l} \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) = \frac{9.8}{l} \nabla^2 H. \quad (2.3)$$

Величина и знак лапласиана зависят от нескольких факторов: кривизны изобар (изогипс), градиента давления (геопотенциала) и характера его изменения в сторону низкого и высокого давления. Практически лапласиан вычисляется по разностям давления (геопотенциала) на четырех взаимно перпендикулярных отрезках. Расстояние каждой из четырех крайних точек до центральной точки, для которой вычисляют лапласиан от геопотенциала, обычно соответствует 550 км или 5° меридиана. В таком случае лапласиан вычисляют по формуле (2.4):

$$\nabla^2 H = (H_1 + H_2 + H_3 + H_4 - 4H_0) / (\delta s)^2, \quad (2.4)$$

где H_1, H_2, H_3, H_4, H_0 — значения геопотенциалов в точках 1, 2, 3, 4 и 0; δs - расстояние между соседними точками, называемое шагом сетки. Поскольку в центре циклона $\nabla^2 H > 0$ (или $\nabla^2 P > 0$), а в центре антициклона

$\nabla^2 H < 0$ (или $\nabla^2 P < 0$), то циклону соответствует положительное значение вихря Ω , а антициклону — отрицательное. Вихрь скорости является одной из важнейших характеристик атмосферных процессов, так как с его изменениями тесно связаны изменения барического поля во времени.

Первоочередной задачей синоптика является определение на основе анализа оперативных синоптических материалов районов наиболее вероятного новообразования циклонов, т. е. районов локального циклогенеза. В этих районах должны выполняться все условия индивидуального циклогенеза, т.е. в перемещающейся воздушной массе и дополнительно условия локального изменения вихря скорости.

Запишем уравнение локального изменения вертикальной составляющей вихря скорости в следующем виде:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} = -\frac{l}{T} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) - v \frac{\partial l}{\partial y} - \left(u \frac{\partial \Omega}{\partial x} + v \frac{\partial \Omega}{\partial y} \right) - (\Omega + l) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - w \frac{\partial \Omega}{\partial z}. \quad (2.5)$$

При записи уравнения (2.5) не принимались во внимание второстепенные члены, учитывающие неравномерное распределение в пространстве вертикальной составляющей скорости движения воздушной массы и влияние турбулентного трения. Уравнение (2.5) показывает, что изменение вертикальной составляющей вихря в какой-либо точке может произойти под влиянием следующих основных факторов:

- 1) геострофической адвекции тепла или холода, т.е. бароклинный эффект — первое слагаемое в правой части уравнения (2.5);
- 2) меридионального движения воздушной массы (второе слагаемое);
- 3) горизонтального переноса вихря из других областей (третье слагаемое);
- 4) горизонтальной дивергенции скорости ветра (четвертое слагаемое);
- 5) перенос вихря по вертикали (пятое слагаемое).

Рассмотрим влияние каждого из этих факторов на изменение вихря.

Первый член описывает влияние термической адвекции на изменение вихря. Выражение, стоящее в скобках, равно адвективному изменению температуры при геострофическом движении с обратным знаком:

$$\left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = - \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{adv.g}. \quad (2.6)$$

Отсюда следует, что при адвекции холода $\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{adv.g} < 0$ и $\left(\frac{\partial \Omega}{\partial t} \right)_{adv.g} > 0$. Это означает, что под влиянием адвекции холода возникает или усиливается циклонический (положительный) вихрь, и ослабевает имеющийся антициклонический (отрицательный) вихрь.

При адвекции тепла $\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{adv.g} > 0$ первый член отрицателен и $\left(\frac{\partial \Omega}{\partial t} \right)_{adv.g} < 0$. Следовательно, под влиянием одного этого члена при адвекции

тепла возникает и усиливается антициклонический (отрицательный) вихрь и ослабевает имеющийся циклонический (положительный) вихрь.

Сравнение карт повторяемости циклонов и антициклонов с картой изменения температуры показывает, что адвекция холода или тепла играет существенную роль в вихреобразовании в атмосфере. Так, максимальная повторяемость циклонов наблюдается над Атлантическим океаном вблизи восточного побережья северной Америки в районе Исландии и над Тихим океаном юго-восточнее Камчатки. Эти области наибольшей повторяемости циклонов смещены по сравнению с областями интенсивной адвекции холода на северо-восток, что является ярким подтверждением того, что циклоны, как правило, возникают в областях наиболее сильной адвекции холода. В самом деле, на ежедневных картах погоды фиксируются уже оформившиеся циклоны. Так как циклоны обычно смещаются в северо-восточном направлении, то место возникновения циклона (циклогенеза) находится несколько юго-западнее области наибольшей повторяемости циклонов.

Наибольшая повторяемость антициклонов зимой наблюдается над материками. Области максимумов повторяемости антициклонов над Азией и Северной Америкой в основном совпадают с областями наибольшей адвекции тепла, будучи несколько смещены относительно последних в юго-западном направлении.

Второй член $-(v \frac{\partial l}{\partial y})$ правой части уравнения (2.5) отражает влияние эффекта меридионального переноса воздушной массы на локальное изменение вихря скорости. С увеличением широты l возрастает, а с уменьшением широты l убывает. Следовательно, в воздушной массе, движущейся к северу $(v \frac{\partial l}{\partial y}) > 0$, а $(\frac{\partial \Omega}{\partial t})_{мер.} < 0$, и под влиянием только этого фактора при прочих равных условиях возникает или усиливается антициклонический вихрь, а при движении к югу — возникает или усиливается циклонический вихрь.

Так как на восточных побережьях Евразии и Северной Америки зимой в нижних слоях атмосферы преобладает северо-западный ветер ($v < 0$), то это приводит к образованию над океанами, вблизи материков циклонического вихря. Эффект меридионального переноса $(v \frac{\partial l}{\partial y})$ действует вблизи восточных побережий материков в ту же сторону, что и адвекция холода в этих районах.

Из практики анализа ежедневных карт погоды хорошо известно, что циклоны чаще всего возникают на холодных фронтах. В то же время практически не встречаются случаи возникновения циклонов на теплых фронтах. Этот опытный факт хорошо согласуется с анализом двух первых факторов (адвекции и меридионального переноса). Действительно, на холодном фронте наблюдается адвекция холода, связанная, как правило, с северным переносом воздушной массы ($v < 0$). Следовательно, и адвекция

холода и меридиональный перенос в этом случае способствуют возникновению и последующему усилению циклонического вихря.

Третье слагаемое уравнения (3.5) представляет вклад переноса уже существующих очагов завихренности. Этот член больше всех других слагаемых и называется вихревой составляющей уравнения тенденции вихря скорости, т. е.

$$\left(\frac{\partial \Omega}{\partial t}\right)_{вихр.} = -\left(u \frac{\partial \Omega}{\partial x} + v \frac{\partial \Omega}{\partial y}\right) \quad (2.7)$$

Влиянием вихревой составляющей (2.7) объясняется перемещение существующих циклонов и антициклонов. По порядку величины это слагаемое больше адвективного. Поэтому, как только вихрь под влиянием адвекции тепла или холода возник, перенос вихря начинает играть главную роль. В передней части (по направлению движения воздушной массы) циклона производная $\frac{\partial \Omega}{\partial x} < 0$ (ось x направлена по потоку). Из (2.7) следует,

что в этой части циклона $\left(\frac{\partial \Omega}{\partial t}\right)_{вихр.} > 0$, т. е. циклонический вихрь

усиливается. В тыловой части циклона производная $\frac{\partial \Omega}{\partial x} > 0$; тогда

$\left(\frac{\partial \Omega}{\partial t}\right)_{вихр.} < 0$, т. е. циклонический вихрь ослабевает. Следовательно,

изменение вихря во времени в передней и тыловых частях циклона приводит к перемещению циклона в направлении общего потока. Аналогичное заключение можно сделать и в отношении движения антициклона. Обычно наблюдаемое падение давления в передней части циклона и рост его в тыловой части, прежде всего, связаны с переносом положительного и отрицательного вихря, т. е. поле скорости является источником атмосферных вихрей и определяет их перемещение (адвекцию вихря и связанную с ней адвекцию давления).

Четвертое слагаемое в (2.5) учитывает влияние дивергенции горизонтальной скорости ветра на изменение вихря и называется дивергентной составляющей уравнения тенденции вихря, т. е.

$$\left(\frac{\partial \Omega}{\partial t}\right)_{див.} = -(\Omega + \ell) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) \quad (2.8)$$

В отличие от относительного вихря скорости Ω , множитель $(\Omega + \ell)$ называется абсолютным вихрем скорости, в котором учтено не только вращение частиц воздуха относительно поверхности земли, но и вращение Земли вокруг своей оси. Оценка порядка величин показывает, что $\ell > \Omega$. В связи с этим дивергентное слагаемое можно записать следующим способом:

$$\left(\frac{\partial \Omega}{\partial t}\right)_{div.} = -\ell \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) = \ell D, \quad (2.9)$$

где $D = \text{div} V = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$ представляет собой дивергенцию вектора

скорости. Под дивергенцией вектора скорости понимают такое явление, при котором распределение ветра в пространстве обуславливает отток или приток воздуха в данной точке пространства. При расходимости вектора скорости, когда $D > 0$, происходит отток воздуха от данной точки. При сходимости линий тока дивергенция скорости ветра может быть как положительной, так и отрицательной. Дивергенция скорости ветра складывается из дивергенции величины (модуля) скорости и дивергенции направления. При сходимости линий тока дивергенция модуля скорости положительная (величина скорости возрастает в направлении потока), а дивергенция направления отрицательная. При расходимости линий тока справедливо обратное заключение.

Формула (2.9) показывает, что положительная дивергенция скорости ветра ($D > 0$) связана с возникновением и усилением антициклонических вихрей $\left(\frac{\partial \Omega}{\partial t}\right)_{div.} < 0$, а отрицательная дивергенция (конвергенция, $D < 0$) связана с возникновением и усилением циклонических вихрей $\left(\frac{\partial \Omega}{\partial t}\right)_{div.} > 0$.

Исследования показали, что в большинстве случаев знак дивергенции скорости ветра совпадает со знаком дивергенции модуля. Таким образом, при сходимости линий тока (изогипс) дивергенция скорости ветра в большинстве случаев положительна ($D > 0$), а при расходимости отрицательна ($D < 0$).

Согласно (2.9) это означает, что при сходимости изогипс в большинстве случаев усиливается антициклонический вихрь (давление растет), а при расходимости — циклонический вихрь (давление падает). Поскольку дивергенция геострофического ветра равна нулю, то одним из главных факторов, влияющих на изменение давления (а значит на возникновение и эволюцию барических образований), является отклонение ветра от градиентного. Когда направление и скорость ветра не соответствуют градиентному, происходит увеличение или уменьшение массы воздуха, а, следовательно, и давления. В районах, где градиент давления вдоль воздушных течений уменьшается (увеличивается), наблюдается расходимость (сходимость) воздушных течений. Отклонение ветра от градиентного тем значительнее, чем больше кривизна потоков движущегося воздуха.

В силу зависимости знака и величины дивергенции скорости ветра от структуры и характера длинных волн в атмосфере действие этого фактора значительно менее устойчиво во времени по сравнению с влиянием трех

предыдущих и при оценке степени влияния его на изменение вихря скорости встречаются затруднения.

Вклад рассмотренных четырех факторов уравнения (2.5) в локальное изменение вихря скорости особенно велик в районах с большими горизонтальными градиентами температуры, давления и большими скоростями ветра, т. е. в области ВФЗ.

Поскольку фронтальные разделы находятся в системе ВФЗ и струйных течений, то в их области горизонтальные градиенты давления с высотой возрастают, поэтому замкнутая циклоническая циркуляция в области фронта возникает в первую очередь у поверхности Земли, а затем распространяется на более высокие слои атмосферы. Этому распространению способствует перенос циклонического вихря по вертикали, который описывается пятым членом уравнения (2.5), носящий название конвективного члена.

Согласно (2.2):

$$\Omega = \frac{9,8}{l} \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) = \frac{9,8}{l} \nabla^2 H$$

Дифференцируя это уравнение по времени, получим

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} = \frac{9,8}{l} \nabla^2 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.10)$$

Выражение (2.10) можно подставить в (2.5) и решить его относительно $\frac{\partial H}{\partial t}$. В таком решении и заключается задача численных методов прогноза локальных изменений высот изобарических поверхностей, т. е. прогноза барического поля.

В ряде исследований была установлена связь между локальным изменением геопотенциала и вихря скорости:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\ell m \frac{\partial \Omega}{\partial t}, \quad (2.11)$$

где m — некоторый положительный коэффициент. Знаки $\frac{\partial H}{\partial t}$ и $\frac{\partial \Omega}{\partial t}$ противоположные, что вытекает из следующих соображений. При положительной адвекции вихря скорости, например, в связи с приближением циклона $(\frac{\partial \Omega}{\partial t})_{вихр.} > 0$. Однако с приближением циклона связано падение давления и понижение высот изобарических поверхностей. Следовательно, при $(\frac{\partial \Omega}{\partial t}) > 0$ имеем $\frac{\partial H}{\partial t} < 0$.

Аналогично при $(\frac{\partial \Omega}{\partial t}) < 0$ имеем $\frac{\partial H}{\partial t} > 0$.

Для более наглядного качественно-физического толкования преобразуем (2.7) и представим вихревой вклад в изменение давления в натуральных координатах. Заменяя в (2.7)

$$u_g = -\frac{9.8}{l} \frac{\partial H}{\partial y} \quad v_g = \frac{9.8}{l} \frac{\partial H}{\partial x}$$

получим:

$$\left(\frac{\partial \Omega}{\partial t}\right)_{вихр.} = -\left(\frac{g}{l}\right)^2 \left(\frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \nabla^2 H - \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 H\right). \quad (2.12)$$

Формула (2.12), если ее записать в натуральной системе координат (s , n) с учетом (2.11) может быть использована для качественного анализа и прогноза $\left(\frac{\partial H}{\partial t}\right)_{вихр.}$ на основе рассмотрения геометрической структуры изогипс. Если s и n ориентированы так, чтобы ось s совпадала с касательной к изогипсе, а ось n была направлена по нормали к ней (за положительное принимается направление нормали в сторону высоких значений H , то справедливы следующие равенства:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\partial H}{\partial s} = H_s = 0; \quad \frac{\partial H}{\partial y} = -\frac{\partial H}{\partial n} = -H_n;$$

$$\frac{\partial \nabla^2 H}{\partial x} = \frac{\partial \nabla^2 H}{\partial s}; \quad \frac{\partial \nabla^2 H}{\partial y} = -\frac{\partial \nabla^2 H}{\partial n}.$$

Запишем (2.12) в натуральных координатах, используя соответствующие равенства, приведенные выше:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial t}\right)_{вихр.} = \frac{m}{l} \frac{\partial H}{\partial n} \frac{\partial \nabla^2 H}{\partial s}. \quad (2.13)$$

Выражение (2.13) показывает, что знак изменения геопотенциала $\left(\frac{\partial H}{\partial t}\right)_{вихр.}$ определяется знаком изменения лапласиана абсолютного геопотенциала в направлении потока, т. е. стоит в однозначном соответствии со знаком $\frac{\partial \nabla^2 H}{\partial s}$.

При уменьшении величины $\nabla^2 H$ в направлении изогипс $\frac{\partial \nabla^2 H}{\partial s} < 0$ и $(\frac{\partial H}{\partial t})_{вихр.} < 0$, а при ее увеличении $\frac{\partial \nabla^2 H}{\partial s} > 0$ и $(\frac{\partial H}{\partial t})_{вихр.} > 0$.

Абсолютные значения $(\frac{\partial H}{\partial t})_{вихр.}$ тем больше, чем гуще изогипсы и чем быстрее изменяется величина $\nabla^2 H$ в направлении изогипс.

Представим величину $\frac{\partial \nabla^2 H}{\partial s} < 0$ в развернутом виде, воспользовавшись соотношениями дифференциальной геометрии. Получим

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = k \frac{\partial H}{\partial n} = k H_n; \quad \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = -\frac{\partial^2 H}{\partial n^2} = H_{nn};$$

$$\nabla^2 H = k \frac{\partial H}{\partial n} + \frac{\partial^2 H}{\partial n^2},$$

где k — кривизна изогипсы; $k > 0$, если изогипсы в данном районе искривлены циклонически; $k < 0$, если изогипсы искривлены антициклонически.

Подставляя в (2.13) приведенные выше соотношения, получим формулу В. А. Бугаева:

$$(\frac{\partial H}{\partial t})_{вихр.} = \frac{m}{\ell} H_n (k H_{ns} + H_n k_s + H_{snn}) \quad (2.14).$$

Формула (2.14) является формулой вихревой составляющей уравнения тенденции вихря скорости в натуральных координатах. Поскольку $H_n > 0$, знак $(\frac{\partial H}{\partial t})_{вихр.}$ определяется знаком суммы слагаемых в скобках.

При циклонической кривизне изогипс $k > 0$, при антициклонической кривизне $k < 0$. В системе сходящихся изогипс $H_{ns} < 0$, в системе расходящихся изогипс $H_{ns} > 0$.

При увеличении циклонической кривизны в направлении потока $k_s > 0$, а при уменьшении циклонической кривизны $k_s < 0$. При увеличении антициклонической кривизны в направлении потока $k_s < 0$, а при уменьшении антициклонической кривизны $k_s > 0$.

Третье слагаемое $H_{snn} = \frac{\partial H_{nn}}{\partial s} = \frac{\partial H_{ns}}{\partial n}$ характеризует изменение величины H_{nn} вдоль потока, или, что то же самое, изменение сходимости (расходимости) изогипс, т. е. H_{ns} вдоль нормали. Величина H_{snn} обычно значительно меньше двух других слагаемых и ею пренебрегают. Знак

$(\frac{\partial H}{\partial T})_{вихр.}$ оценивают по знаку слагаемых kH_{ns} и $H_n k_s$. Если их знаки противоположны, то чаще всего преобладающее значение имеет изменение кривизны по потоку, т. е. член $H_n k_s$.

На рис. 2.2 показаны типовые формы изогипс высотных ложбин и гребней и указаны знаки первого (I) и второго (II) слагаемых формулы (2.14). Оценка знака полезна для диагноза и прогноза изменений барического поля в рассматриваемом районе. При этом используются карты АТ-700 или АТ-500 гПа.

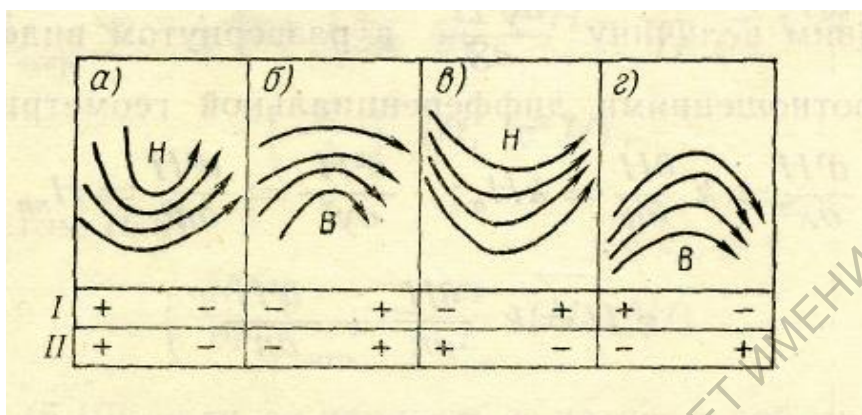


Рис. 2.2. Изменение геопотенциала при типовых формах изогипс высотных ложбин (а, в) и гребней (б, з)

2.5. Условия возникновения и эволюции фронтальных циклонов

Наиболее часто циклоны и антициклоны возникают в зоне основных атмосферных фронтов. Циклоны образуются главным образом на холодных малоподвижных и стационарных фронтах либо у точек окклюзии старых циклонов, реже на теплых фронтах (рис. 2.3).

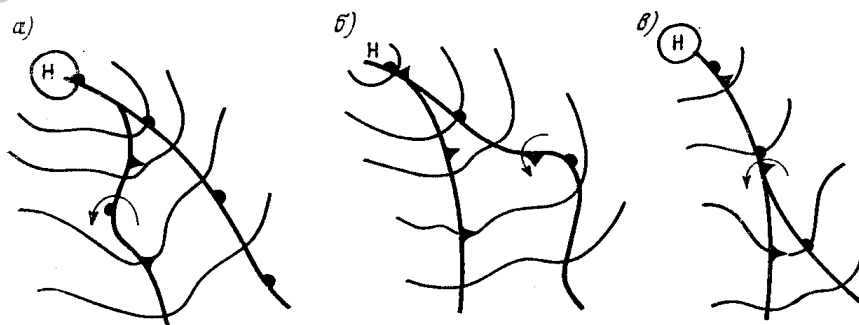


Рис. 2.3. Схемы возникновения фронтальных циклонов
а) на холодном фронте; б) на теплом фронте;
в) у точки окклюзии

Характерным признаком возможного образования циклона служит появление на фронте волны, амплитуда которой со временем увеличивается. Если амплитуда волны не увеличивается, циклон заканчивает свое существование на волновой стадии.

Фронтальные волны разделяются на устойчивые и неустойчивые волны. К **устойчивым волнам** относятся такие, амплитуда которых со временем не возрастает, и они постепенно затухают. К **неустойчивым волнам** относятся такие, амплитуда которых со временем возрастает. Критерием устойчивости является длина волны. В интервале длин волн 800—2800 км фронтальная волна неустойчива и развивается в циклон. В образовании таких волн большую роль играют как разрыв плотности и скорости ветра на фронте, так и отклоняющая сила вращения Земли.

Неустойчивость волны зависит от следующих причин:

- увеличения контраста температуры и скорости ветра в высотной фронтальной зоне;
- положение волнового возмущения у земли по отношению к высотному барическому полю;
- наличие неустойчивой и влажно-неустойчивой стратификации воздуха.

При этих условиях область падения давления захватывает как центральную часть волны, так и ее тыловую часть.

Образование фронтальных волн на малоподвижных фронтах происходит достаточно часто, так как при противоположно направленных воздушных потоках по обе стороны фронта местные изменения воздушных потоков приводят к деформации линии фронта и к образованию волны на нем. Однако такие волны сравнительно редко развиваются в глубокие циклоны, так как термобарическое поле не всегда имеет строение, способствующее понижению давления в зоне возникшей волны.

Для развития волны в циклонический вихрь должны быть благоприятные условия. При прогнозе возникновения циклона необходимо принимать во внимание следующие положения:

1. Непосредственными признаками зарождения нового циклона на фронте служат деформация линии фронта и образование вблизи данного участка фронта зоны разреженных изобар, особенно при их циклонической кривизне.

2. Оформлению нового циклона у поверхности земли способствуют малоградиентные барические поля у поверхности Земли в области волнового возмущения, когда здесь наблюдаются отрицательные барические тенденции, захватывающие центральную часть волнового возмущения. В поле ветра оформляется замкнутая циркуляция против часовой стрелки. На станциях отмечается увеличение облачности, и начинают выпадать осадки. Поскольку для холодного фронта характерен зафронтальный рост давления, то появление зафронтального падения давления следует всякий раз рассматривать как один из признаков возникновения нового циклона.

3. Термобарическое поле тропосферы должно способствовать понижению давления у поверхности Земли в зоне возникшей волны. Условия для падения давления создаются в передней части высотной барической ложбины в области расходящихся изогипс при уменьшении циклонической кривизны по потоку (рис. 2.4, заштрихованная зона), где градиент геопотенциала достаточно велик.

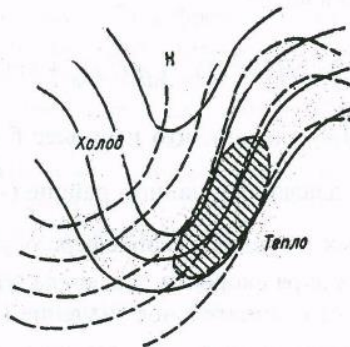


Рис. 2.4. Схема термобарического поля тропосферы, наиболее благоприятного для циклогенеза
линии сплошные – изогипсы; пунктирные – изотермы

4. Наличие высотной фронтальной зоны (ВФЗ) с большими горизонтальными градиентами геопотенциала (H_n) и температуры (T_v), а также наличие струйного течения способствуют циклогенезу. Циклоны возникают преимущественно под дельтой ВФЗ при больших контрастах температуры и больших скоростях ветра. Практически циклоны возникают лишь при наличии струйного течения в верхней тропосфере, справа от оси этого течения.

5. Циклоны у точки окклюзии возникают сравнительно часто, но редко развиваются в глубокие циклоны, поскольку у точки окклюзии значения градиента геопотенциала (H_n) и температуры (T_v) редко достигают больших значений, и не всегда структура термобарического поля благоприятна значительному падению давления у поверхности Земли. Признаком возможного образования циклона у точки окклюзии служит смещение области падения давления на периферию существующего циклона, в область с относительно малыми барическими градиентами у поверхности Земли.

6. Одним из условий возможного возникновения циклона и эволюции термобарического поля является наличие адвекции холода в тылу возмущения, превышающей адвекцию тепла в передней части, т. е. такое распределение адвекции, при котором обостряется гребень тепла.

7. Новый циклон часто возникает на том участке малоподвижного фронта, к которому приближается область падения давления, выявляющаяся на карте 12-часовых изаллобар.

8. Циклоны часто зарождаются вблизи линии нулевых значений 12-часовых изаллогипс АТ-700, т. е. в пограничной зоне между высотной областью падения и роста давления.

2.6. Стадии развития фронтальных циклонов

Период развития **фронтального циклона** может быть разделен на ряд стадий. Переход из одной стадии в другую происходит постепенно, между ними нет четко выраженных границ. Несмотря на некоторую условность определения границ, выделение стадий развития циклона имеет определенное познавательное и прогностическое значение, так как отражает основные закономерности преобразований термобарического поля тропосферы и связанные с ними ожидаемые изменения погоды. Вместе с тем следует иметь в виду, что возникший циклон не обязательно проходит все стадии развития. Он может заполниться сразу же после появления признаков его образования, а может пройти все стадии развития. Определение тенденции в развитии возникшего циклонического возмущения представляет одну из самых сложных задач, которая в прогностическом плане очень часто стоит перед синоптиком.

Полный цикл развития фронтального циклона включает в себя следующие четыре стадии:

- 1) **стадия возникновения или начальная стадия** - от начала появления признаков возникновения замкнутой циклонической циркуляции до появления первой замкнутой изобары, кратной 5 гПа;
- 2) **стадия углубления циклона или стадия молодого циклона** - от момента появления первой замкнутой изобары на приземной синоптической карте до момента прекращения интенсивного углубления (до момента начала окклюдирования);
- 3) **стадия максимального развития, стадия окклюдированного циклона** - давление в центре циклона изменяется незначительно и характеризуется самым низким значением;
- 4) **стадия заполнения** - от момента интенсивного роста давления в центре циклона до исчезновения замкнутой циклонической циркуляции.

Рассмотрим особенности термобарического поля на разных стадиях развития фронтального циклона. Термобарическое поле строится путем наложения изогипс (изотерм) карты OT_{1000}^{500} на изогипсы карты АТ-700 гПа.

1-ая стадия – стадия возникновения или начальная стадия (волновой циклон). На приземной карте в начальной стадии развития фронтального циклона на линии фронта возникает волнообразный изгиб, при котором фронт в передней части возникающего циклонического возмущения принимает характер теплого фронта, а в тыловой части – характер холодного фронта. Центр приземного циклона на схеме (рис.2.5) находится в точке сближения теплого и холодного фронтов. Давление вблизи вершины волны падает. Над ней в средней тропосфере находится зона сгущения изогипс на картах АТ-700 и АТ-500 гПа. На всех картах барической топографии и даже на АТ-850 гПа отсутствуют замкнутые изогипсы. Высотное барическое и термическое поле на картах АТ-700 гПа и OT_{1000}^{500} имеют слабый волновой изгиб (рис.2.5).

Впереди приземного центра находится слабо выраженный барический гребень в нижней тропосфере, а в тыловой части расположена слабая барическая ложбина. Термическое поле имеет аналогичную картину, но отстает от барического поля (рис. 2.5).

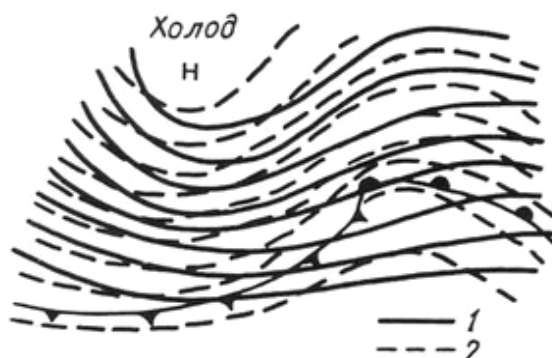


Рис. 2.5. Термобарическое поле циклона в начальной стадии развития
1 – изогипсы; 2 – изотермы

В тыловой части волны, за холодным фронтом появляется ложбина холода, а в передней - гребень тепла. В тыловой части волнового возмущения наблюдается адвекция холода, а в передней части — адвекция тепла. Линия нулевой адвекции проходит вблизи вершины волны. В соответствии с таким распределением адвекции термический фактор обуславливает падение давления перед теплым фронтом и рост давления за холодным фронтом. Поскольку вершина волны находится под дельтой ВФЗ, то адвекция положительного вихря скорости создает благоприятные условия для усиления циклонической циркуляции и понижения давления в районе волны. Падение давления, вызванное переносом вихря, распространяется на большую часть волны, при этом нулевая изаллобара проходит далеко от центра циклона. ВФЗ со временем деформируется все больше и больше. Адвекция тепла приводит к усилению высотного гребня, а адвекция холода — к углублению высотной ложбины. Следовательно, амплитуда высотной ложбины постепенно увеличивается, волна становится неустойчивой, давление падает, и наступает вторая стадия развития циклона. Начальная стадия развития циклона весьма скоротечна и продолжается обычно менее полусуток.

2-ая стадия - молодой (развивающийся) циклон, стадия углубления циклона. При дальнейшем усилении замкнутой циклонической циркуляции циклон из волновой стадии развития может перейти в стадию молодого циклона. В этом случае продолжается дальнейшая деформация приземной линии фронта, в результате чего возникает отчетливо заметный **теплый сектор**, где находится теплый воздух (рис. 2.6). **Теплый сектор** это область, заключенная между теплым и холодным фронтами.

Эта стадия характеризуется дальнейшим развитием волнообразного возмущения фронта, усиливающимся понижением давления и

распространением циклонической циркуляции по высоте. Продолжающаяся адвекция тепла и смежная с ней адвекция холода приводят к такому смещению теплого и холодного участка фронта, что фронтальная волна все более развивается и образует у земли теплый сектор с теплым воздухом внутри него.

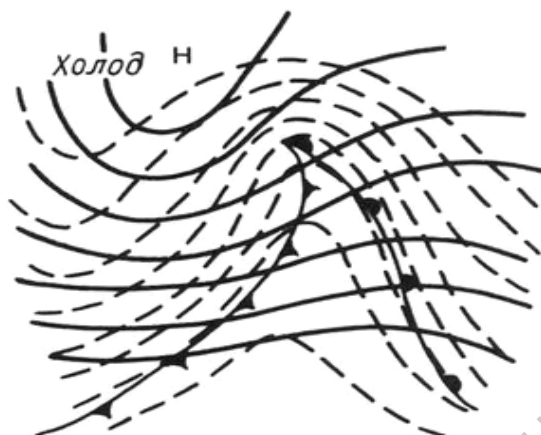


Рис 2.6. Термобарическое поле молодого циклона

Центр циклона продолжает находиться под дельтой ВФЗ, где наблюдается расходимость изогипс (рис. 2.6). Высотное барическое поле сильно возмущено. Циклон в этой стадии развития становится обычно средним барическим образованием. Циклонический вихрь заметно распространился вверх, и часто на поверхности 700 гПа уже обнаруживается самостоятельный центр низкого давления, который смещен по отношению к приземному центру в сторону холодного воздуха.

Число замкнутых изобар на приземной карте погоды увеличивается. На станциях отмечаются большие отрицательные барические тенденции. Барический гребень над центром и передней частью циклона и ложбина над тыловой частью циклона, а также соответствующие им термические гребень и ложбина выражены лучше, чем в первой стадии. Они становятся более четко выраженными и глубокими. Зона сгущения изогипс на карте от 500/1000 несколько смещена относительно приземного центра в его холодную часть. Взаимное положение изогипс и изотерм сохраняется. Изотермы отстают от изогипс. Сохраняется также характер адвекции. Причем, адвекция холода в тылу циклона становится сильнее, чем адвекция тепла в его передней части, и захватывает большую площадь, чем в стадии волны. Такая структура барического поля обеспечивает падение давления в передней и центральной частях молодого циклона и рост давления в его тыловой части. Время существования молодого циклона от 1,5 до 2-х суток.

3-я стадия - стадия максимального развития (стадия окклюдированного циклона). Стадия максимального развития циклона характеризуется тем, что у поверхности земли давление в центре циклона самое низкое из всех стадий, и начинается окклюдирование циклона. Теплый и холодный фронты начинают смыкаться. При этом теплый сектор заметно сужается. Давление в центре циклона достигает наибольшей

глубины, т.е. становится самым низким. У поверхности земли циклон очерчивается большим числом замкнутых изобар. Циклон становится высоким: замкнутые изогипсы имеются на АТ -850, 700 гПа и появляются на АТ-500 гПа а иногда и выше. Высотный центр может быть еще смещен относительно приземного в сторону холодного воздуха (рис. 2.7).

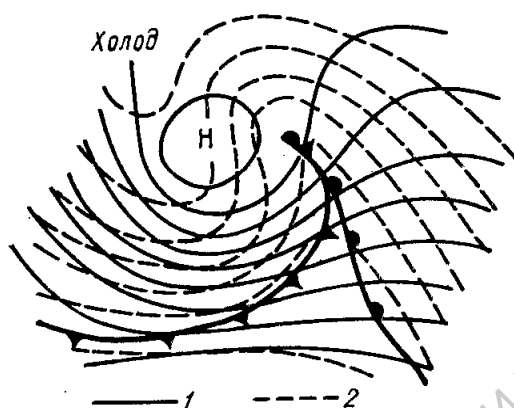


Рис. 2.7. Термобарическое поле циклона в стадии максимального развития

Поскольку изогипсы на высоте принимают круговую форму, перенос вихря какого-либо заметного влияния на изменение давления в центре циклона не оказывают. Гребень тепла на карте OT_{1000}^{500} становится узким, и смещается в переднюю часть циклона, а тыловая ложбина холода располагается близко к центру циклона. Линия нулевой адвекции сдвинута от центра циклона к его передней части. Зона адвекции тепла и адвективного падения давления все более отходит от центра циклона, а адвекция холода, распространяясь на большую часть циклона, способствует повышению давления не только в тылу, но и в центре циклона. Область значительного падения давления будет располагаться у точки окклюзии. ВФЗ с большими градиентами температуры и давления смещена на периферию циклона в сторону теплого воздуха. Высотный центр циклона приближается к приземному, и область холода на карте OT_{1000}^{500} занимает значительную часть высотного и приземного циклона. Высотная ось циклона заметно выпрямляется. В центре циклона давление практически не меняется. Адвекция холода распространяется на большую часть циклона, но одновременно ослабевает. Циклон у поверхности земли прекращает развитие. Однако в верхней части тропосферы, где перенос вихря и понижение температуры вызывает падение давления, понижение изобарических поверхностей над приземным циклоном еще продолжается и циклоническая циркуляция усиливается. Время существования окклюдированного циклона 3-4 суток.

4 стадия – циклон в стадии заполнения. Адвекция холода, наблюдавшаяся в течение первых трех стадий, и восходящие движения

воздуха привели к тому, что центр области тропосферного холода почти совместился с центром низкого давления (рис. 2.8). Циклонический вихрь выражен до больших высот АТ-300, 200 гПа и часто распространяется на нижнюю часть стратосферы.



Рис. 2.8. Термобарическое поле циклона в стадии заполнения

Заполнение циклона начинается у поверхности Земли. Это выражается в росте давления. Холодные воздушные массы заполняют уже всю центральную часть циклона, поэтому высотные центры на картах АТ и приземный центр циклона совпадают. Изогипсы карт АТ и OT_{1000}^{500} располагаются почти параллельно друг другу. Адвекция температуры практически равна нулю. Очаг холода на карте OT_{1000}^{500} располагается над высотным и приземным центрами циклона. Циклон представляет собой высокое холодное барическое образование с почти вертикальной пространственной осью без фронтальных разделов. Зона наибольших контрастов температур, являющаяся энергетическим источником, поддерживающим существование циклона, переместилась на его периферию, где образовалась новая ВФЗ. Вследствие прекращения падения в центральной части циклона все более начинает сказываться приземная конвергенция трения, вызывающая рост давления и заполнение циклона, с последующей его полной ликвидацией. В четвертой стадии развития изаллобарическое поле характеризуется преобладанием роста давления в центральной и тыловой частях циклона. Слабое падение давления может быть перед фронтом окклюзии и, особенно перед точкой окклюзии, где еще сохраняется некоторая адвекция тепла на высоте. Заполнение циклона приводит к размыванию фронтов. Сплошная зона обложных осадков распадается на отдельные очаги, условия погоды постепенно выравниваются во всех частях циклонического вихря, пока циклон не исчезает как самостоятельное барическое образование у поверхности земли. При совмещении высотного и приземного центров циклон становится малоподвижным и при активном росте давления быстро заполняется и исчезает. Время существования окклюдированного циклона 3-4 суток.

2.7. Условия возникновения и эволюции фронтальных антициклонов

Внетропические термические (местные) антициклоны, так же как и термические циклоны, возникают в условиях неравномерного по площади теплообмена воздуха с подстилающей поверхностью. Это нефронтальные антициклоны. Летом над сушей такие антициклоны образуются в сравнительно тонком слое при охлаждении воздуха только в ночные часы. Они имеют небольшие размеры и днем, как правило, разрушаются при прогреве приземного слоя. Зимой над сушей термические антициклоны в условиях интенсивного эффективного излучения подстилающей поверхности могут существовать длительное время, зачастую превращаясь в хорошо развитые по вертикали барические образования.

Антициклоны, образование и эволюция которых связаны с высотными фронтальными зонами, называют **фронтальными**, хотя непосредственно с атмосферными фронтами у поверхности Земли они не связаны. Фронты через центральные части антициклонов не проходят, поскольку, в связи с дивергенцией трения в пограничном слое существовать, а тем более возникать там не могут. Фронты могут проходить по перифериям антициклонов, причем там, где изобары имеют ложбинообразную конфигурацию. Атмосферный фронт, пересекая барический гребень, меняет свой тип.

Замкнутая антициклоническая циркуляция в процессе антициклогенеза возникает в первую очередь у поверхности Земли, а затем распространяется в более высокие слои тропосферы. При этом основной вклад в рост давления у Земли вносит часть атмосферы, находящаяся выше 5 км (75%). Разрушение антициклона связано в основном (на 70%) с уменьшением массы столба атмосферы над центральной частью антициклона в слое Земля — 5 км.

Многие положения, касающиеся возникновения и развития циклонов с определенными видоизменениями, относятся и к антициклонам. Поэтому приведем лишь немногие дополнительные сведения, отражающие специфику развития антициклонов.

1. Антициклоны возникают преимущественно в холодной воздушной массе в тылу заключительного циклона. Непосредственным признаком формирования нового антициклона часто служит расширение и усиление барического гребня у земной поверхности с появлением замкнутой области относительного роста давления, распространяющейся по обе стороны от оси гребня. Иногда такая область роста возникает в малоградиентном барическом поле, и тогда происходит быстрое оформление нового антициклона без предварительного развития барического гребня.

2. Наиболее благоприятные условия возникновения антициклонов у поверхности Земли создаются в области барического гребня, развивающегося за линией холодного фронта под входом ВФЗ на карте АТ-700 гПа, если высотное барическое поле способствует формированию отрицательного вихря скорости (рис.2.9).

3. Развитие возникшего антициклона протекает обычно медленнее, чем развитие циклона. В частности, антициклон, достигший стадии максимального развития и ставший малоподвижным, может длительное время существовать без особых изменений.

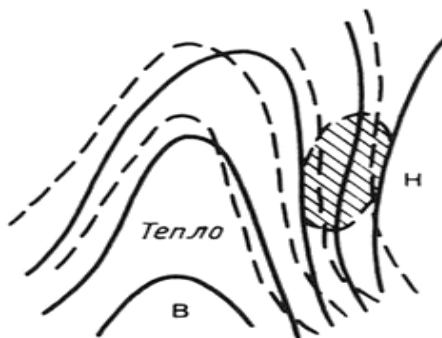


Рис. 2.9. Схема термобарического поля тропосферы, наиболее благоприятного для возникновения антициклона: линии сплошные – изогипсы; пунктирные – изотермы

4. Наибольшей интенсивности достигают антициклоны, сформированные в нижней половине тропосферы из весьма холодной воздушной массы, а в верхней - из теплой воздушной массы. Охлаждение воздушной массы в приземном слое, и повышение ее устойчивости способствует антициклогенезу.

2.8. Стадии развития фронтальных антициклонов

Возникновение и развитие антициклонов тесно связано с развитием циклонов. Практически это единый процесс. Поэтому такие антициклоны называются фронтальными.

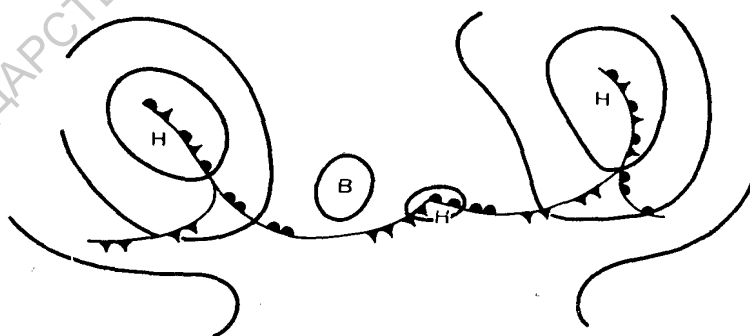


Рис. 2.10. Схема зарождения заключительного антициклона

В процессе своего развития антициклон проходит четыре стадии: **1-ая стадия - начальная (возникновения), 2-ая стадия - молодого антициклона, 3-ья стадия - максимального развития и 4-ая стадия - стадия разрушения.**

В начальной стадии у поверхности земли антициклон возникает не на фронте, как циклон, а позади холодного фронта, как заключительный антициклон (рис.2.10).

Заключительный антициклон развивается при своеобразном строении ТБ поля тропосферы, когда имеются два малоподвижных центральных циклонов, между которыми возникает на холодном фронте небольшой циклон (рис.2.10). В тылу этого циклона и зарождается заключительный антициклон.

В начальной стадии приземный антициклон имеет вид отрога, возникшего в тылу циклона, часто на северной периферии теплого ранее развивающегося антициклона. В центральной части в поле ветра можно заметить замкнутую антициклоническую циркуляцию. Он является низким холодным барическим образованием.

С высотой антициклон затухает, а на АТ-700 ему соответствует лишь волнообразная форма изогипс, а на карте OT_{1000}^{500} - волнообразная форма изотерм. При этом волнообразные высотные гребни термического и барического полей располагаются позади приземного гребня. Термическое поле отстает от барического поля.

В центре и в передней части вновь возникшего антициклона наблюдается адвекция холода, а в тыловой адвекция тепла. Впереди приземного гребня располагается высотная барическая ложбина, которая будет углубляться, за счет адвекции холода. И этот же процесс у поверхности земли приводит к росту давления. Рост давления у земли обусловлен также и переносом отрицательного вихря скорости, так как в направлении потока уменьшается антициклоническая кривизна, которая заменяется циклонической кривизной. Это способствует продолжению процесса антициклогенеза.

В результате всех этих факторов антициклон переходит во 2-ую стадию развития - **стадии молодого антициклона (рис. 2.11).**

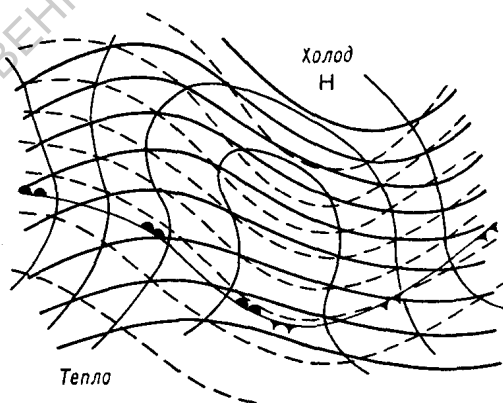


Рис. 2.11. Схема термобарического поля молодого антициклона

Возникший за холодным фронтом антициклон первоначально является низким и холодным барическим образованием. На высотах фронтальная зона, характеризующаяся большими горизонтальными градиентами температуры, проходит непосредственно над вновь возникшим антициклоном. С высотой антициклон быстро исчезает и на уровне 700 гПа ему соответствует барический и термический гребень, причем последний

несколько отстает от барического гребня. В соответствии с этим в передней части антициклона наблюдается адвекция холода, а в тыловой — адвекция тепла. Интенсивная адвекция холода способствует росту давления у земли. В этом же направлении здесь действуют также вихревой и дивергентный факторы (вдоль течения увеличивается циклоническая кривизна при сходимости изогипс).

Условия для роста давления создаются не только в тылу циклона, но и над центральной частью приземного гребня или антициклона. Рост давления, вызванный переносом вихря, распространяется почти на все пространство, занятое антициклоническим возмущением у поверхности земли. В противоположность циклону нисходящее движение воздуха и адвекция тепла в тылу антициклона вызывают общее повышение температуры в нем и рост абсолютного геопотенциала изобарических поверхностей. В результате всех этих факторов антициклон переходит в 3-ю стадию развития.

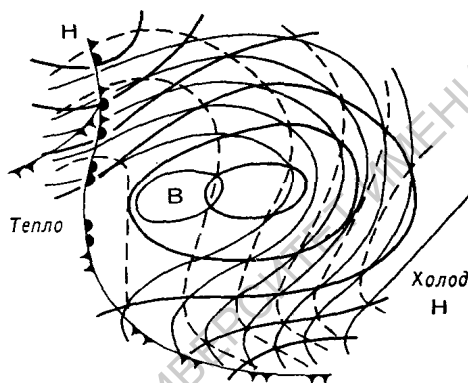


Рис. 2.12. Схема термобарического поля антициклона в стадии максимального развития

Третья стадия — стадия максимального развития антициклона. Термобарическое поле в период максимального развития представлено на рис. 2.12. На этой стадии антициклон у поверхности земли очерчивается несколькими замкнутыми изобарами. В нижних слоях тропосферы антициклон по-прежнему развивается в холодном воздухе. Интенсивная адвекция холода у земли в передней части антициклона способствует термическому росту давления. Сходимость изогипс и увеличение циклонической кривизны изогипс по потоку обуславливают также рост давления за счет дивергентного и вихревого факторов.

В тылу антициклона наблюдается адвекция тепла и термическое падение давления. Области роста и падения давления, обусловленные переносом вихря, приблизились к центру приземного антициклона. В последующем развитии антициклон становится все более высоким и теплым. При этом совместное действие термического и вихревого факторов вызывает рост давления в передней части антициклона и падение давления в его тылу. При таком распределении изаллобарических очагов антициклон еще является подвижным. Высотный центр антициклона в этой стадии значительно смещен относительно приземного положения к западу или северо-западу.

Над центром антициклона рост давления под влиянием вихревого фактора небольшой (так как градиенты давления на высотах здесь заметно уменьшились) и редко превышает падение давления, обусловленного термическим фактором. Приземная дивергенция ветра в слое трения способствует падению давления. Нисходящие движения становятся значительными и обуславливают заметное повышение температуры над антициклоном. Поэтому тыловой гребень тепла располагается ближе к центру антициклона, а ложбина холода становится более узкой и оттесняется вперед от центра антициклона. Таким образом, усиление антициклона прекращается, и создаются условия для его последующего ослабления.

Четвертая стадия — разрушающийся, старый антициклон (рис. 2.13).

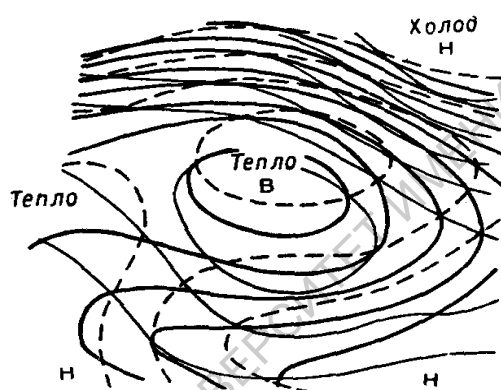


Рис. 2.13. Схема термобарического поля антициклона в стадии разрушения

На этой стадии давление у поверхности земли по сравнению с третьей стадией заметно понизилось. На высотах антициклон теперь выражен более четко и характеризуется несколькими замкнутыми изогипсами. Центры антициклона внизу и вверху почти совмещаются. В центральной части антициклона происходит дальнейшее адиабатическое повышение температуры. Антициклон становится высоким теплым барическим образованием. Высотная ось становится квазивертикальной. Перенос вихря какого-либо заметного влияния на изменение давления в центре антициклона не оказывает. Под влиянием дивергенции ветров в слое трения давление в антициклоне падает. В результате этого антициклон начинает разрушаться вначале заметнее у земной поверхности, а затем и на высотах, где он сохраняется более продолжительное время. Давление в центре антициклона может меняться в течение нескольких дней.

3. ПРОГНОЗ ЭВОЛЮЦИИ ЦИКЛОНОВ И АНТИЦИКЛОНОВ

3.1. Общие сведения об эволюции циклонов и антициклонов

Эволюция циклона — понятие широкое. В него входит: изменение давления в центре циклона; расширение (сужение) площади, занятой циклоном; увеличение (уменьшение) градиентов давления в циклоне, а следовательно, и скорости ветра; колебание интенсивности осадков и ширины зоны, занятой осадками; распространение циклона кверху; изменение положения фронтов в циклоне и, наконец, изменение общего характера погоды в системе циклона. Все эти процессы эволюции циклона тесно связаны между собой. Углубление циклона ухудшает погоду, циклон становится обширнее, зона осадков шире и осадки интенсивнее, усиливается ветер. Наоборот, рост давления в центре циклона в целом приводит к улучшению погоды в системе циклона, при этом размеры циклона могут меняться незначительно как по горизонтали, так и по вертикали. Он исчезает как бы изнутри и снизу. Сначала циклон заполняется у поверхности земли и остается еще некоторое время на высотах. На приземной карте в первую очередь исчезает изобара, ближайшая к центру, затем следующая за ней и так далее, пока циклон не исчезнет совсем или не начнет регенерировать.

Следовательно, изменение давления в центре циклона является важным показателем эволюции. Прогнозируя его, можно хотя бы качественно предвидеть изменение ряда других характеристик циклона. Однако не все изменения можно таким образом предвидеть. Например, поведение фронтов далеко не всегда коррелируется с изменением давления в центре. То же самое можно сказать о распространении циклона по вертикали. Так, регенерирующий циклон, только начиная углубляться, уже выступает как высокое барическое образование. Таким образом, прогноз только лишь изменения давления в центре дает важную, но далеко не полную информацию об ожидаемой эволюции циклона.

Известно, что весь жизненный цикл циклона можно разбить условно на четыре стадии: стадия возникновения (стадия волны); молодой циклон; циклон, достигший максимального развития; заполняющийся циклон. Каждая из стадий характеризуется определенной погодой, расположением фронтов и вертикальным развитием циклона. Следовательно, задача синоптика состоит в том, чтобы предсказать, будет ли циклон в течение срока прогноза оставаться в той же стадии, что и в исходный момент времени, или перейдет в следующую стадию. Прогнозируя изменение давления в центре циклона и стадию его развития, синоптик тем самым дает достаточно полную картину будущего состояния циклона.

Эволюция антициклона - тоже сложное понятие. Применяя к антициклону те же рассуждения, что и к циклону, можно сказать, что прогноз изменения давления в центре и прогноз стадии развития антициклона дает достаточно полную информацию об эволюции антициклона в течение срока прогноза.

Прогноз эволюции барических образований включает в себя две фазы:

- 1) прогноз изменения давления в центре и стадии развития;
- 2) использование результатов первой фазы для суждения обо всех остальных характеристиках барического образования на основе известных моделей циклонов и антициклонов в разных стадиях развития.

Предполагается, что отклонение от модели в исходный срок соответствующим образом сохранится и в течение срока прогноза. Разумеется, при этом необходимо учитывать эволюцию фронтов и трансформацию воздушных масс, из которых сформировано данное барическое образование.

Исходными данными для прогноза служат результаты анализа предшествовавшего развития циклона или антициклона. Анализ предполагает выяснение причин, которые определяли эволюцию барического образования за 12-24 часа до исходного срока. При этом имеется в виду, что те факторы, которые действовали в предыдущие сутки (12 часов), будут действовать и в последующие. Обычно анализу подлежат: адвекция вихря скорости и температуры на разных уровнях, изменение лапласиана температуры, дивергенция скорости ветра на средних уровнях, изменение ветра с высотой и его временной ход, приземное трение, перемещение фронтов. Все эти факторы сопоставляются с происходящей эволюцией циклона или антициклона и таким образом устанавливается роль каждого из них. Большую помощь оказывают прогностические карты барической топографии, составленные численными методами.

Сравнивая исходные барические поля на разных уровнях над центром барического образования с прогностическими, а также анализируя последние, можно судить об ожидаемых изменениях высотных полей над циклоном или антициклоном. Производя такой анализ, не следует забывать, что циклоны и антициклоны подвижны. Следовательно, чтобы сравнивать и анализировать поля на высотах над ожидаемым положением того или иного барического образования, рекомендуется предварительно дать прогноз перемещения циклонов. Поскольку определенной стадии развития соответствует и определенным образом развитое барическое поле на разных уровнях, нетрудно определить будущую стадию развития циклона или антициклона.

При диагнозе устанавливается роль тех или других факторов, влияющих на изменение давления, которые будут определять эволюцию приземного барического поля. **Наиболее важные факторы, определяющие эволюцию барических образований, следующие: перенос вихря скорости, адвекция температуры на разных уровнях, дивергенция скорости ветра в средних слоях тропосферы, изменение лапласиана температуры.** Рассмотрим вклад каждого фактора в эволюцию барических образований.

3.2. Горизонтальный перенос вихря скорости

Значительную роль в эволюции приземных барических образований у поверхности Земли играет **горизонтальный перенос вихря скорости**

$$\Omega = \frac{9,8}{\ell} \nabla^2 H \quad \text{в средних слоях тропосферы.}$$

Связь эволюции барического образования со знаком и величиной изменения вихря $\frac{\partial \Omega}{\partial t}$ на изобарической поверхности АТ-500 дает табл. 3.1.

Таблица 3.1

Вероятность (в %) усиления или ослабления циклонов и антициклонов у поверхности Земли при различных значениях изменения вихря скорости $(\frac{\partial \Omega}{\partial t})_{500}$

Барические образования	Эволюция	Изменение вихря скорости, $(\frac{\partial \Omega}{\partial t})_{500}$ (гп. дам за 12 час.)						
		>0	≤0	>4	>6	≥0	<0	<-3
Циклоны	углубление	53	13	65	72			
	без изменения	16	10	12	12			
	заполнение	31	77	23	16			
Антициклоны	усиление					32	58	73
	без изменения					19	16	9
	ослабление					49	26	18

При использовании этой таблицы знак фактического изменения давления за полусутки в центрах циклонов и антициклонов у поверхности Земли сопоставляется со знаком и величиной изменения вихря скорости над барическим центром, рассчитанного по картам АТ-500 гПа для тех же полусуток. Из данных этой таблицы следует, что в случаях, когда над центром циклона у поверхности Земли перенос вихря положителен по знаку и является большим по абсолютной величине, циклоны будут углубляться в 65-72% случаев, а заполняются лишь в 16-23% случаев. Когда перенос вихря равен нулю или отрицателен, гораздо чаще происходит заполнение циклона (77% случаев), чем углубление (13%). Антициклоны у поверхности Земли, при значительном по величине отрицательном переносе вихря над их центрами, усиливаются в 73% случаев, а ослабевают лишь в 18% случаев.

Для осей приземных барических ложбин и гребней совпадение по знаку изменения давления у поверхности Земли с переносом вихря в средних слоях тропосферы в целом на 10—15% лучше, чем для приземных барических центров.

Знак фактического изменения давления у поверхности Земли в центрах циклонов и на осях ложбин значительно чаще совпадает со знаком переноса вихря в средних слоях тропосферы в случаях, когда последний указывает на рост, чем когда он указывает на падение давления.

3.3. Градиент геопотенциала на карте OT_{1000}^{500}

Другим существенным фактором является **адвекция температуры**. Например, адвекция тепла (холода) в нижней стратосфере и в верхних слоях тропосферы благоприятствует падению (росту) давления в средних ее слоях, а, следовательно, и у поверхности Земли.

Ряд факторов изменения давления (перенос вихря, адвекция температуры) косвенно или непосредственно связаны с горизонтальным градиентом (контрастом) температуры на карте OT_{1000}^{500} . При прочих равных условиях вероятность усиления или ослабления барического образования у поверхности Земли увеличивается при больших значениях градиента температуры на карте OT_{1000}^{500} .

Контраст температуры определялся по картам OT_{1000}^{500} гПа не только для центров циклонов и антициклонов у земной поверхности, но и для точек, отстоящих на 250 км влево и вправо от этих центров (смотря по направлению изогипс карты OT_{1000}^{500}).

Таблица 3.2

Вероятность (в %) усиления или ослабления циклонов и антициклонов у поверхности Земли при различных значениях градиента геопотенциала на карте OT_{1000}^{500} гПа

Барические образования	Эволюция	Градиент геопотенциала, H_{1000}^{500}							
		слева, гп. дам/500км		в центре, гп. дам/1000км				справа, гп. дам/500км	
		≤ 6	≥ 15	≤ 13	≥ 21	≤ 11	≥ 18	≤ 4	≥ 12
Циклоны	углубление	14	70	20	72				
	без изменен.	12	12	9	4				
	заполнение	74	18	71	24				
Антициклоны	усиление					26	72	25	81
	без изменен.					22	10	20	9
	ослабление					52	18	55	10

Данные табл. 3.2 получены сопоставлением изменения давления в барическом центре у поверхности Земли за 12-часовой промежуток времени

со средним для этого промежутка значением градиента геопотенциала карты OT_{1000}^{500} гПа. Из этих данных можно заключить, что большой контраст температуры является неплохим признаком усиления антициклона (особенно, когда большой контраст имеет место в правой, теплой его части) или углубления циклона. Небольшой же контраст температуры в циклоне (особенно в левой, холодной его части) является признаком его заполнения.

Нередко бывают случаи, в которых различные факторы действуют на изменение давления у поверхности Земли с противоположными знаками и решение вопроса о будущем изменении давления осложняется. В связи с этим при составлении прогноза необходимо дополнительно использовать имеющиеся эмпирические правила. Они позволяют получить представление о будущей эволюции барических образований путем использования барических тенденций, изаллогипс, пространственной структуры барических образований, фронтальной структуры циклонов.

3.4. Эмпирические правила эволюции барических образований

3.4.1. Правила эволюции барических образований по барическим тенденциям

1. Циклон углубляется (заполняется), если в его центре наблюдаются отрицательные (положительные) барические тенденции

2. Антициклон усиливается (ослабевает), если в его центре наблюдаются положительные (отрицательные) тенденции.

3. Близкие к нулевым тенденции в центре циклона (антициклона) говорят о том, что его глубина (мощность) существенно изменяться не будет. Это правило для циклонов оправдывается несколько хуже, чем для антициклонов, так как у циклонов переход от углубления к заполнению происходит быстрее, чем у антициклонов от усиления к ослаблению.

4. Барическая ложбина углубляется (заполняется), когда нулевая изаллобара проходит позади (впереди) оси ложбины.

5. Барический гребень усиливается (ослабевает), когда нулевая изаллобара проходит позади (впереди) оси гребня.

6. При отрицательных (положительных) тенденциях в центре циклона (антициклона) продолжительность его углубления (усиления) будет тем больше, чем дальше от центра циклона (антициклона) в его тылу проходит нулевая изаллобара. Аналогично правило может быть сформулировано и для ложбин и гребней.

7. Циклон углубляется, если в его теплом секторе барические тенденции отрицательны, и заполняется, когда они положительные. Если тенденции в теплом секторе близки к нулевым, давление в центре циклона существенно не изменяется.

8. Удаление области падения давления от центральной части циклона на его периферию — надежный признак быстрого заполнения циклона.

Удаление области падения наблюдается обычно после окклюдирования циклона.

9. Удаление области роста давления от центра антициклона на его периферию указывает на прекращение усиления антициклона.

По барическим тенденциям можно судить не только о знаке, но и о величине изменения давления в центре циклона или антициклона или у взятой точки на оси ложбины или гребня в исходный срок. Для этого вычисляется среднее значение тенденции по данным метеорологических станций в районе исследуемой точки радиусом 250 км от нее. Умножая найденное среднее значение тенденции на число 3-часовых интервалов в промежутке времени, на который составляется прогноз, найдем суммарное изменение давления, относящееся к этому промежутку времени. Полезно еще учесть, что в случаях резко асимметричного приземного барического поля осредненное по площади значение барической тенденции не дает полного представления об истинном изменении давления в центре движущегося циклона или антициклона. Например, циклон, характеризующийся небольшими градиентами давления в передней части и большими градиентами в тылу, может и не заполняться, хотя бы падение давления в передней части циклона, оказалось, по величине меньше роста давления в тылу. Чтобы учесть эту асимметричность, надо к величине изменения давления, найденной по тенденциям и отнесенной к 12-часовому промежутку времени, прибавить (алгебраически) разность между давлением в исходный срок в районе некоторой точки А, находящейся впереди рассматриваемого приземного центра, и давлением в районе другой точки Б, находящейся позади центра. Точки А и Б берутся на прямой, совпадающей с направлением ожидаемого перемещения приземного барического центра. Расстояние же каждой из этих точек от барического центра должно соответствовать его ожидаемому перемещению в течение 6 час.

Ослабление падения (роста) давления часто предшествует уменьшению интенсивности углубления циклона (усиления антициклона). Однако усиление области падения не является надежным признаком того, что давление в центре циклона через сутки будет ниже, чем в исходный срок наблюдений. При сильном углублении циклон может в ближайшие же часы стать высоким, после чего начнется его заполнение.

Используя данные о барической тенденции, следует иметь в виду суточный ход давления, особенно при прогнозе эволюции приземных антициклонов и гребней. При прогнозе на 12 (или 36) часов поправку на суточный ход давления можно найти путем сопоставления барических тенденций, отмечавшихся в исходный срок и за 24 часа до него, с тенденциями, наблюдавшимися за 12 часов до исходного срока.

3.4.2. Правила эволюции барических образований по изаллогипсам карты АТ 700 гПа

Изаллогипсы это линии равного изменения геопотенциала на любой изобарической поверхности (АТ 850, 700, 500 и др.) за определенный промежуток времени (12 или 24 часа).

Представление о знаке последующей эволюции барических образований у поверхности Земли дают и полусуточные изаллогипсы АТ 700 гПа. В умеренных широтах значительное (на 4 гп. дам и более) изменение геопотенциальной высоты поверхности 700 гПа над барическим центром у земной поверхности почти всегда сопровождается таким же по знаку изменением давления в самом центре. Исключение представляют летние антициклоны и гребни, в которых на изменении H_{700} сказывается суточный ход температуры нижнего слоя тропосферы.

О вероятности совпадения знака изменения давления в центре барического образования у поверхности Земли со знаком предшествующего изменения H_{700} можно судить по расстоянию между этим центром и ближайшим к нему центром изаллобарической области на поверхности 700 гПа. Чем меньше это расстояние, тем вероятнее совпадение знаков. Если области повышения и понижения H_{700} находятся примерно на одинаковом расстоянии от центра циклона у земной поверхности, то в случае приблизительно одинаковой интенсивности этих областей предпочтение нужно отдавать области повышения. Если области повышения и понижения H_{700} резко различаются по величине, то знак изменения давления в центре барического образования совпадает со знаком большей по интенсивности области изаллогипс.

Таблица 3.3

Повторяемость (в %) совпадения знака изменения давления в центре барического образования у поверхности Земли со знаком изменения H_{700} над центром

Расстояние до центра изаллобарической области (км)	Область понижения H_{700} и углубления циклонов	Область повышения H_{700} и заполнения циклонов	Область повышения H_{700} и усиление антициклонов
Менее 500	67	88	Около 100
500-1000	28	65	86

Представление о том, насколько часто совпадают друг с другом знаки изменения давления в центрах барических образований у поверхности Земли и в центрах изаллобарических областей на поверхности 700 гПа, найденных, при различном расстоянии между этими центрами, дает табл. 3.3. Данные этой таблицы получены для холодного полугодия по Европейской территории России. При этом рассматривались изаллобарические области интенсивностью не менее 4 гп. дам за 12 час.

При расстоянии между центром барического образования и центром изаллобарической области более 1000 км процент совпадения меньше, чем при расстоянии 500- 1000 км.

Данные табл. 3.3 показывают, что с помощью изаллогипс достаточно уверенное заключение о знаке изменения давления в центре циклона у поверхности Земли (особенно о его углублении) может быть получено только в случае, когда центр изаллобарической области отстоит от центра циклона не далее чем на 500 км. Усиление антициклона весьма вероятно и при большем расстоянии (до 1000 км) между его центром и центром повышения H_{700} .

3.5. Пространственная структура барических образований

Прослеживание пространственного развития барических образований, а также изменений, происходящих в термическом поле (в высотных фронтальных зонах), позволяет в ряде случаев предусмотреть последующий переход знака изменения давления в центрах барических образований на противоположный.

Углубление циклонов и усиление антициклонов обычно прекращаются после их превращения в высокие образования. Циклон чаще всего начинает заполняться после того, как его пространственная ось станет квазивертикальной (почти вертикальной). Аналогичное правило для антициклонов оправдывается значительно хуже. Давление в центре высокого антициклона с квазивертикальной пространственной осью может заметно не меняться в течение ряда дней. Следует также иметь в виду, что иногда нормальный процесс развития барических образований, при котором циклоническая или антициклоническая циркуляция лишь постепенно охватывает все более высокие слои атмосферы, нарушается. Например, молодой, низкий циклон при своем перемещении может попасть в район, над которым на высотах располагался другой, старый (но не обязательно малоподвижный) циклон, уже заполнившийся у поверхности Земли. Тогда молодой циклон внезапно превращается в высокое барическое образование, и происходившее ранее его углубление может резко смениться заполнением. Аналогичный ход давления может быть в случае, когда приземный циклон или антициклон ввиду небольших барических градиентов на высотах над его центром очень быстро становится высоким. Противоположный характер носит ход давления в случаях регенерации циклонов и антициклонов.

3.6. Адвекция температуры

Эволюция приземных ложбин и гребней, как и циклонов и антициклонов, определяется в первую очередь переносом вихря и дивергенцией скорости ветра в средних слоях тропосферы. Однако для приземных ложбин и гребней приобретает относительно большее значение, чем для приземных барических центров, адвективное изменение

температуры. При этом углубление ложбины у земли может происходить в случаях, когда адвекция тепла осуществляется не только в передней, но и в тыловой части ложбины или, когда адвекция холода в тылу ложбины отсутствует. Точно так же адвекция холода может вызвать усиление гребня, если она наблюдается как в передней, так и в тыловой его части или если в тыловой части адвекция тепла отсутствует. Очевидно, в случаях противоположного распределения адвекции тепла и холода она может приводить к заполнению ложбин и к ослаблению гребней. Особенно резко влияние адвекции на изменение характера приземного барического поля сказывается тогда, когда интенсивность адвекции на разных участках высотной фронтальной зоны неодинакова.

Довольно хорошее представление о последующем развитии (как и о возникновении) циклона можно получить, рассматривая интенсивность адвекции холода в его тылу. При интенсивной адвекции холода, приводящей к увеличению в тылу циклона контрастов температуры, циклон часто углубляется. В случае, когда в тыл окклюдированного, начавшего заполняться циклона осуществляется заток свежей порции холодного воздуха, давление в центре циклона может резко упасть за счет регенерации циклона. Особенно большой глубины циклоны достигают тогда, когда вблизи центра циклона располагаются две параллельные фронтальные системы, так что на близком расстоянии находятся воздушные массы тропического и арктического происхождения.

Циклон не развивается, если в его тылу отсутствует сколько-нибудь интенсивная адвекция холода. В тех случаях, когда заток холода в тыловой части циклона по каким-либо причинам резко ослабевает или прекращается совсем, циклон начинает заполняться. Ослабление адвекции холода нередко наступает в связи с приближением к данному циклону второго, следующего за ним и более обширного циклона. Тогда первый из этих циклонов проявляет тенденцию к исчезновению.

В случаях, когда почему-либо контраст температуры в центральной части циклона существенно не уменьшается со временем, неплохим признаком дальнейшего его углубления является обострение здесь профиля гребня тепла (в поле изогипс карты ОТ 500/1000). Вместе с развитием циклона термический гребень постепенно суживается, что отражает процесс последующего окклюдирования.

3.7. Стратификации атмосферы.

Эволюция барических образований частично связана со стратификацией атмосферы. Устойчивая стратификация оказывает тормозящее влияние на их развитие тем большее, чем меньше вертикальный градиент температуры и, чем меньше размеры барических образований. Если вертикальный градиент температуры меньше влажноадиабатического, то небольшие циклоны и антициклоны, с радиусом менее 200 км, не развиваются. При радиусе же, близком и превышающем 1000 км,

устойчивость стратификации уже не имеет значения для эволюции барических образований.

Благоприятные условия для развития циклонов и антициклонов создаются при влажно-неустойчивом состоянии атмосферы. Тогда в случае небольших барических градиентов у поверхности Земли можно ожидать быстрого возникновения и последующего развития циклонов. Влияние влажнонеустойчивости тем сильнее, чем в более мощном слое она имеет место. На материках умеренных широт ее влияние на развитие циклонов заметно сказывается в теплое время года. Представление о степени устойчивости стратификации получают с помощью аэрологических диаграмм.

3.8. Фронтальная структура циклонов

Ряд правил связывает эволюцию циклонов с их фронтальной структурой.

1. Чем больше длина фронтальной волны, тем вероятнее, что волна неустойчива, и, следовательно, циклон, с которым она связана, будет углубляться. Волны, длина которых меньше 1000 км, преимущественно устойчивы.

2. Неокклюдированный циклон углубляется тем сильнее, чем быстрее приближается холодный фронт к тепловому.

3. После окклюдирования циклон обычно начинает заполняться.

3.9. Регенерация циклонов и антициклонов

Определение: Регенерацией циклона называется процесс углубления старого заполняющегося окклюдированного циклона или резкое углубление молодых низких циклонов.

Регенерация циклонов происходит при следующих основных процессах:

- 1) при вхождении в систему существующего циклона нового основного фронта;
- 2) при развитии вблизи центра существующего циклона нового циклона с последующим слиянием обоих центров или при быстром заполнении старого циклона.

По первому сценарию у поверхности земли процесс регенерации циклона чаще всего происходит при сближении окклюдированного полярно-фронтального циклона с арктическим фронтом.

На новом арктическом фронте возникает волновое возмущение или молодой циклон, развитие которого происходит на фоне старого циклона. В тыл молодого циклона происходит интенсивный заток холода. При этом полярнофронтальный циклон прослеживается до уровня 500 гПа, его высотный центр совпадает с замкнутой областью холода карты OT500/1000, и адвекция температуры равна 0, а фронтальная зона сгущения изогипс

смещена на южную периферию циклона. Это последняя стадия циклона - заполнение окклюдированного циклона.

При сближении молодого циклона на арктическом фронте с заполняющимся циклоном на полярном фронте, молодой циклон попадает в готовое высотное циклоническое барическое поле. Циклон, возникающий на арктическом фронте, также становится высоким, но область холода располагается в его тылу, где отмечается интенсивная адвекция холода. При сближении двух центров холод устремляется в тыловую часть старого циклона, за счет чего происходит усиление контрастов температуры во фронтальной зоне полярного фронта и углубление его.

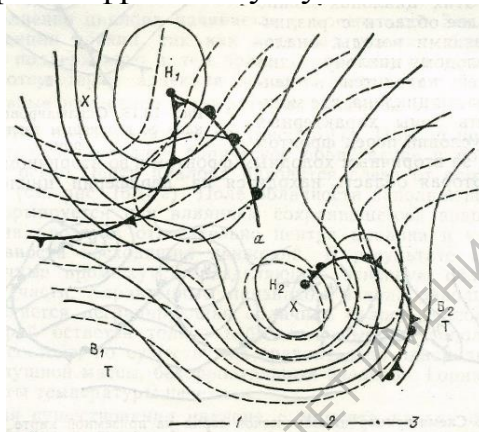


Рис. 3.1. Схема термобарического поля при регенерации окклюдированного циклона
1-изогипсы АТ- 500, 2-изогипсы ОТ 500/1000,
3-изаллогипсы АТ-500

Если адвекция холода у земли захватывает и тыловую часть старого циклона на полярном фронте, то он регенерирует (рис. 3.1). Процесс регенерации происходит, если скорость арктического фронта больше скорости полярного фронта, поэтому оба этих фронта сближаются.

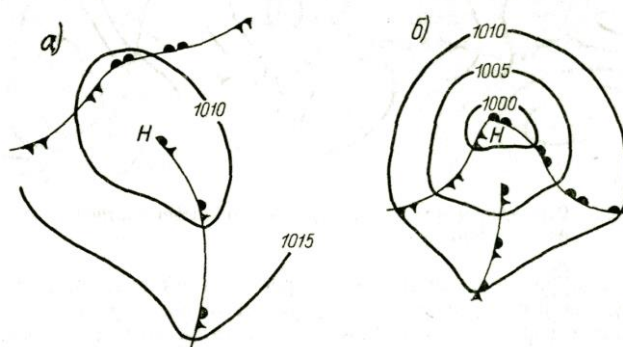


Рис. 3.2. Схема регенерации циклона на приземной карте на новом холодном фронте

По первому сценарию осуществляется заток свежих порций холодного воздуха в тыл циклона на полярном фронте, начавшегося заполняться. Создаются дополнительные контрасты температуры, и

нарушается температурная симметрия в окрестностях центра старого циклона. В результате внешне процесс воспринимается как новое углубление ранее заполнявшегося циклона. После регенерации этот циклон проходит те же стадии, что и вновь возникший циклон. Типичная схема регенерации циклона на арктическом фронте у поверхности земли представлена на рис. 3.2.

Первым определяющим условием такого рода регенерации является наличие больших контрастов средних температур между тыловой частью молодого циклона и центральной частью старого циклона. Эти контрасты должны составлять не менее 20 градусов на 1000 км. Вторым условием является адвекция холода в тыл старого циклона.

Регенерация становится невозможной, если адвекция холода происходит в передней части этого циклона. Хорошим признаком регенерации является наличие сильных северных ветров в тылу молодого циклона, как у земли, так и на высотах.

По второму сценарию в процессе регенерации наблюдается сильное падение давления в центральной части циклона или на периферии старого циклона. В первом случае происходит углубление старого циклона, а во втором – основной циклон заполняется, а на небольшом расстоянии от него быстро развивается новый циклон.

Сильному падению давления может предшествовать рост, ровный ход или слабое падение давления в предшествующий период. Поскольку развитие нового циклона происходит на фоне старого, то новый циклон с самого начала как бы является уже высоким барическим образованием.

Во втором случае регенерации циклон, возникающий на холодном фронте заполняющегося малоподвижного циклона, продолжая углубляться, смещается в направлении центра старого циклона, который быстро заполняется, а на его место смещается новый углубляющийся циклон. В этом случае наблюдается резкое углубление низких неокклюдированных циклонов.

Все погодные условия при регенерации циклона резко изменяются: усиливается ветер, уплотняется облачность, усиливаются осадки, зимой метели. Скорость движения циклонов возрастает, а направление смещения, резко изменяясь, совпадает с высотным потоком.

Регенерацией антициклонов называется усиление старых, высоких, разрушающихся антициклонов или усиление интенсивности развития молодых, низких антициклонов.

Существует 2 типа регенерации антициклонов:

- 1) при слиянии заключительного антициклона с малоподвижным старым антициклоном.
- 2) при развитии нового антициклона в отроге существующего (рис. 3.4).

Подобно регенерации циклонов, регенерация антициклонов осуществляется тогда, когда в термобарическом поле происходит новое увеличение горизонтальных градиентов температуры и создаются условия,

благоприятные для антициклогенеза. В обоих случаях регенерации происходит развитие нового антициклона на фоне старого.

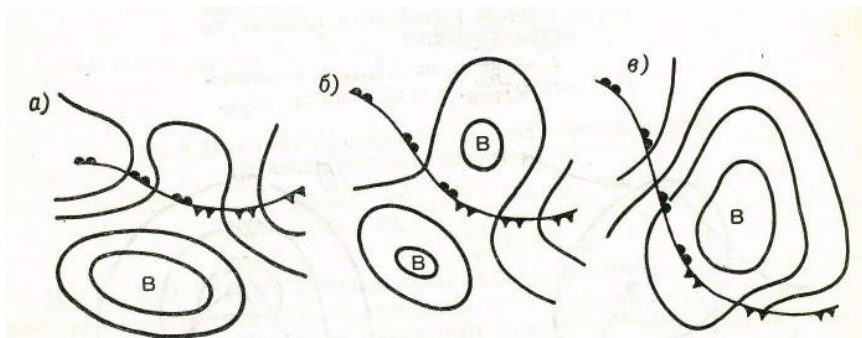


Рис. 3.3. Регенерация антициклона при развитии нового антициклона в отроге старого

По первому типу регенерация происходит, когда наблюдается усиление старого разрушающего антициклона за счет затоков в его систему холодных воздушных масс. Такой процесс часто наблюдается в тех случаях, когда при прохождении серии циклонов южнее располагается малоподвижный антициклон. Регенерация происходит при слиянии заключительного антициклона с малоподвижным старым антициклоном.

По второму типу регенерация происходит при развитии нового антициклона в отроге существующего (рис.3.3). При этом старый антициклон разрушается, а новый молодой антициклон проходит все стадии развития быстрее, так как он попадает в готовое высотное барическое поле. На рис.3.4 показана схема последовательных изменений приземного барического поля во втором типе регенерации антициклона.

В рассмотренных процессах регенерации новый циклон (антициклон), развиваясь на фоне старого, проходит все стадии, как и любой циклон (антициклон). Своеобразие заключается лишь в том, что начальное термобарическое поле соответствует не столько зарождающемуся барическому образованию, сколько старому, уже ослабевающему барическому образованию.

Сходимость ветров к центру циклона в приземном слое обуславливает заполнение циклона, а расходимость от центра антициклона - ослабление антициклона. Этот фактор действует постоянно с самого начала возникновения циклона или антициклона. Если вопреки тому циклон продолжает углубляться, а антициклон - усиливаться, то это означает лишь, что другие факторы, действующие в противоположном направлении, имеют перевес на данной стадии развития циклона или антициклона.

Поскольку обусловленное трением отклонение ветра от геострофического в приземном слое зависит от свойств подстилающей поверхности, то при перемещении циклона или антициклона с моря на сушу или наоборот изменяется величина вклада приземного трения в изменение давления. Кроме

того, изменение температурных свойств подстилающей поверхности влияет на изменение устойчивости воздушных масс, развитие вертикальных движений и т. п.

Все это приводит к тому, что при перемещении циклона или антициклона с одной подстилающей поверхности на другую происходит изменение интенсивности их развития и даже может иметь место регенерация. Например, при смещении циклонов на Балтийском море часто наблюдается замедление их перемещения и углубление.

4. АТМОСФЕРНЫЕ ФРОНТЫ

4.1. Определения и основные понятия об атмосферных фронтах

Определение: *Атмосферный фронт это узкая переходная зона, проходящая между соседними воздушными массами с различными свойствами, и характеризующаяся резкими изменениями метеорологических величин.* Синонимами являются термины «фронтальная зона» и «фронтальный слой», «фронтальная поверхность».

Атмосферный фронт у поверхности Земли имеет размеры в несколько десятков километров, а в свободной атмосфере — несколько сотен километров. Вертикальная протяженность фронтального слоя составляет обычно несколько сотен метров.

Атмосферные фронты наклонены к поверхности Земли. Как правило, поверхность фронта наклонена в сторону холодного воздуха – он как более тяжелый располагается под ней. А теплый воздух, более легкий, располагается над фронтальной поверхностью (рис. 4.1).

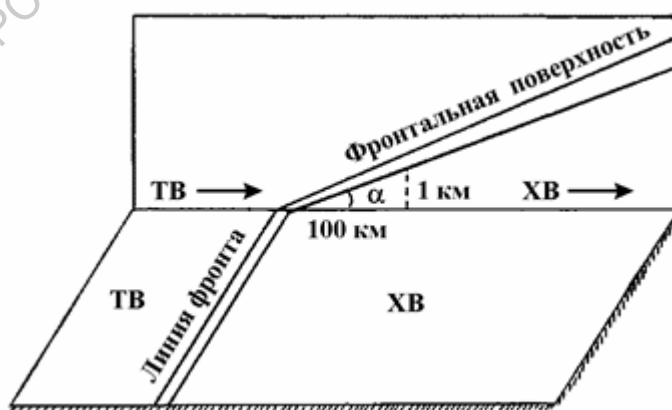


Рис. 4.1. Пространственное положение атмосферного фронта

Возникновение и поддержание существования фронтов, которые обычно наблюдаются в течение нескольких суток, возможно только в области сходимости воздушных течений, обеспечивающих сближение

разнородных по своим характеристикам воздушных масс. Поэтому они возникают и длительное время существуют в областях пониженного давления, т. е. в циклонах и ложбинах. Ширина фронтального слоя тем меньше, чем интенсивнее идет процесс конвергенции воздушных течений, а поскольку он лучше выражен в слое приземного трения, то фронтальный слой имеет меньшую ширину вблизи поверхности Земли и большую — в свободной атмосфере.

В областях повышенного давления (антициклонах и гребнях), для которых характерна расходимость воздушных течений, особенно значительная в пограничном слое атмосферы, фронты длительное время существовать не могут. Их иногда можно встретить на перифериях антициклонов, причем в полях метеорологических величин как переходные зоны от одной воздушной массы к другой они выражены значительно хуже, чем в областях пониженного давления.

Если представить фронтальный слой в виде фронтальной поверхности, то на ней, из очевидных соображений, будут претерпевать разрыв (скачкообразные изменения) значения таких метеорологических величин, как температура и влажность. При переходе через фронтальную поверхность резко изменяет свое значение горизонтальный градиент давления и ветер.

4.2. Классификации атмосферных фронтов

Классификации атмосферных фронтов основываются на учете целого ряда их характерных признаков.

1. В зависимости от положения границ слоя, в котором фронт прослеживается, различают:

— **тропосферные фронты**, которые хорошо выражены по всей нижней половине тропосферы;

— **приземные фронты**, которые обнаруживаются только в пределах пограничного слоя;

— **верхние фронты**, которые можно обнаружить в средней и верхней тропосфере, но которые у земли не прослеживаются;

— **стратосферные фронты**, которыми принято считать зоны повышенных значений горизонтальных градиентов на стратосферных уровнях.

2. В соответствии с географической классификацией воздушных масс принято различать **арктический фронт, разделяющий арктический воздух и воздух умеренных широт. Фронт, разделяющий воздух умеренных широт от тропического — полярным.**

В результате сходимости воздушных потоков в приэкваториальной зоне возникают облачные системы, состоящие преимущественно из облаков вертикального развития. Эти синоптические объекты ранее, по аналогии с фронтами более высоких широт называли **тропическими фронтами**, хотя обе воздушные массы, по обе стороны фронта не отличались существенно по своим свойствам. По этой причине термин «тропический фронт» в настоящее время вышел из употребления, а определяемые им ранее

синоптические объекты, обусловленные конвергенцией воздушных течений, получили название **внутритропических зон конвергенции (ВЗК)**.

3. В зависимости от горизонтальной и вертикальной протяженности воздушных масс и их свойств различают **основные, вторичные, линии неустойчивости и сомкнутые фронты**.

Определение: К основным фронтам относятся такие атмосферные фронты, которые разделяют воздушные массы различных географических типов, и которые существенно различаются по своим свойствам. Они являются, как правило, тропосферными, имеют протяженность несколько тысяч километров, существуют в течение нескольких суток. Для них характерны резкие изменения значений основных метеорологических величин при переходе из одной воздушной массы в другую. Изменение температуры при переходе из одной воздушной массы в другую на приземной карте погоды обычно превышает 5—7°C. Горизонтальный градиент относительного геопотенциала в высотной фронтальной зоне, в пределах которой находится основной фронт, как правило, превышает 16 гп. дам на 1000 км.

Основные фронты не непрерывно опоясывают все полушарие. На ежедневных синоптических картах они представлены в виде отдельных ветвей с протяженностью в несколько тысяч километров.

С основными фронтами связаны образование подвижных циклонов и антициклонов, резкие изменения погоды на больших территориях.

Определение: Вторичными называются атмосферные фронты, разделяющие части одной и той же воздушной массы, которые отличаются по своим свойствам (погодным условиям). Обычно они являются приземными, т. е. имеют вертикальную протяженность 1,0—1,5 км, а горизонтальную — сотни километров. Их характеристики лучше всего выражены на приземных синоптических картах, особенно в полях ветра, облачности и осадков. Время существования вторичных фронтов не превышает суток. Эти фронты при благоприятных условиях иногда могут увеличить свою вертикальную мощность и распространиться на всю толщу тропосферы. В этом случае они могут классифицироваться как вновь возникшие основные фронты.

Сходство с вторичными фронтами по погодным условиям, вертикальной и горизонтальной протяженности имеют так называемые **топографические фронты**. Они образуются в зонах конвергенции воздушных течений, направление которых почти параллельно границе между территориями с различными свойствами подстилающей поверхности. Образуются они вдоль морских побережий, границы морских льдов или снежного покрова. Обычно эти фронты остаются неподвижными в местах своего образования.

Некоторые сходства с вторичными фронтами имеют меньшие в пространственном и временном масштабе **линии неустойчивости (линии шквалов)**. Они часто располагаются параллельно линиям основных фронтов, и представляют собой протяженные на несколько десятков километров зоны интенсивного развития конвекции. С ними связаны ливневые осадки, грозы,

шквалы (кратковременное сильное усиление ветра). Период существования линий неустойчивости не превышает нескольких часов. Они хорошо прослеживаются на спутниковых фотографиях облачности в виде гряд конвективной облачности.

Сомкнутые фронты представляют собой объединенную систему двух атмосферных фронтов. Процесс смыкания атмосферных фронтов называется **окклюдированием**, а сомкнутый фронт называют **фронтом окклюзии**.

В соответствии с термодинамической классификацией воздушных масс и в зависимости от направления перемещения все атмосферные фронты могут быть разделены на **теплые, холодные, стационарные и нейтральные**.

Определение: *Теплыми* называются фронты, перемещающиеся в сторону холодной воздушной массы, а *холодными*, которые перемещаются в сторону теплой воздушной массы. На *нейтральных фронтах* воздушные массы по обе стороны фронтального раздела имеют примерно одинаковые свойства. Чаще всего они возникают в результате окклюдирования.

Фронты, существенно не меняющие своего положения, называются стационарными или малоподвижными.

Плоские фронты имеют квазигоризонтальные линии тока. Вертикальные движения в области таких фронтов практически отсутствуют или очень слабые и знакопеременные.

В зависимости от степени выраженности характерных для фронта данного типа погодных условий фронты могут быть **хорошо выраженными или размытыми**. Для оценки динамики погодных условий на фронтах применяют термины «**обостряющийся**» и «**размывающийся**». Фронты, плохо выраженные в поле какой-нибудь метеорологической величины, называют **маскированными** в поле этой величины.

При всем многообразии классификаций атмосферных фронтов имеются некоторые «базовые» модели, которые получили наибольшее распространение, в основу которых положено деление фронтов на теплые, холодные и окклюзии по типу холодного и теплого фронтов.

4.3. Особенности полей метеорологических величин в области фронта

Фронт в поле давления. Фронты образуются и существуют в области сходимости воздушных течений, т.е. фронт лежит в барической ложбине на ее оси.

Причем в пограничном слое это обычно U- или V-образная ложбина, а в свободной атмосфере — замаскированная ложбина. Это происходит потому, что с высотой оси барических ложбин смещаются в сторону более низких температур и сближаются с осями термических ложбин. В связи с этим наибольшие контрасты температуры создаются на периферии высотных ложбин.

Ширина зоны фронта у земли составляет около 50 км. Однако на практике это трудно обнаружить в связи с редкой сетью метеостанций. Поэтому фронт у земли совмещают с осью барической ложбины.

С высотой в связи с расширением фронтальных зон, линии фронтов смещаются в сторону холодной воздушной массы относительно линии фронта у поверхности земли. **Вывод: область между теплым и холодным фронтами в циклоне, т.е. теплый сектор с высотой расширяется.**

Фронт в поле барических тенденций. Поскольку перемещение фронта происходит вместе с ложбиной, то при его приближении на станциях отмечается падение давления, а после прохождения — рост давления. Таким образом, формируется характерное для фронта поле изотенденций в виде двух сопряженных областей падения и роста давления (Рис.2).

При симметричной, не меняющей своей глубины ложбине, нулевая изаллобара должна проходить за фронтом на расстоянии, соответствующем пути фронта за 1,5 ч, так как поле изаллобар анализируется по данным изменений давления за прошедшие 3 ч. Поэтому станцию, где барическая тенденция равна 0, фронт уже прошел, т. е. они находятся за фронтом.

Но если ложбина одновременно **заполняется (деградирует)**, то нулевая изаллобара может переместиться в переднюю часть ложбины. Наоборот, при **углублении ложбины (активизации)** значительную площадь в тыловой части может занимать падение давления. У быстро заполняющейся ложбины с фронтом окклюзии наблюдается рост давления по обе стороны от фронта.

Вывод: если фронт перемещается, то барические тенденции по обе стороны фронта различные или по знаку или по величине.

Поле температуры в области фронта. Особенности поля температуры в области фронта определяются тем, что массы с различными температурами соседствуют не только по горизонтали, но и в вертикальном направлении: теплый воздух находится над холодным.

В горизонтальном направлении изотермы на поверхности раздела претерпевают разрыв. При переходе из теплой массы в холодную температура скачкообразно понижается. В реальных условиях, поскольку переход от одной воздушной массы к другой представляет собой фронтальный слой, в действительности происходит не разрыв, а резкое изменение температуры. Т.о. вдоль линии фронта у поверхности земли по обе стороны от него (перпендикулярно линии фронта) будет наблюдаться значительный контраст температуры воздуха (от 2-5⁰ до 8-15⁰ С).

На картах абсолютной топографии нижней и средней тропосферы атмосферные фронты определяются по наличию на этих картах протяженных зон сгущения изотерм, наиболее узких (200—300 км) на карте АТ-850 и несколько более широких (300—500 км) на картах АТ₇₀₀ и АТ₅₀₀. Линию фронта на карте АТ-850 проводят вдоль срединной изотермы зоны сгущения.

Вывод: на картах АТ атмосферные фронты определяются по сгущению изотерм, которое особенно четко выражено на карте АТ-850 гПа. Приземная линия фронта будет совпадать со срединной изотермой в зоне их сгущения на карте АТ-850 гПа.

На карте относительной топографии ОТ-500/1000 гПа приземной линии фронта также соответствует сгущение изогипс (изотерм). **Причем, приземная линия фронта проходит параллельно изогипсам карты ОТ-500/1000 таким образом, что основное сгущение изогипс остается в холодной воздушной массе (рис. 3)**

На приземной синоптической карте поле изотерм в целом характеризуется сгущением в области фронта. Однако за счет многочисленных влияний на него подстилающей поверхности это сгущение не всегда четко, проявляется. В таком случае говорят, что фронт замаскирован в поле приземной температуры. В других случаях области больших контрастов температуры в приземном слое могут быть не связаны с фронтами. Такие области у поверхности Земли могут образоваться, например, при длительном перемещении воздуха вдоль границы снежного покрова образуется так называемый **мнимый фронт**.

Порядок проведения атмосферных фронтов: рекомендуется начинать поиск атмосферных фронтов с выявления на карте ОТ 500-1000 высотных фронтальных зон, затем в пределах этих зон выделяют районы сгущения изотерм на карте АТ₈₅₀ и, наконец, с привлечением данных приземной карты погоды уточняют положение линии фронта у поверхности Земли.

Особенности поля влажности в области фронта. Особенности поля влажности в области фронта определяются структурой этих полей в смежных воздушных массах, характером и плотностью облачного поля, связанного с фронтом, и структурой поля осадков. В связи с этим можно выделить два основных типа горизонтального распределения влажности на высотах.

Первый тип распределения влажности характерен для участков фронта с плотной облачностью и осадками. Наиболее высокая точка росы наблюдается вблизи линии фронта. Поле точки росы представляет собой гребень с осью, почти совпадающей с линией фронта и ориентированный от центра циклона к периферии. Вблизи линии фронта горизонтальные градиенты точки росы малы. Наибольшего значения они достигают в холодном воздухе вблизи границы зоны осадков.

Второй тип распределения влажности характерен для тех участков фронта, где облачность имеет разрывы или вообще отсутствует. Точка росы постепенно понижается от теплого воздуха к холодному. Наибольший горизонтальный градиент точки росы отмечается вблизи линии фронта в холодном воздухе.

Распределение ветра в области фронта. У поверхности земли прохождение фронта сопровождается правым поворотом ветра (по часовой стрелке), если фронт располагается на оси ложбины.

Распределение ветра в области фронта в свободной атмосфере удовлетворительно описывается геострофической или градиентной моделью связи поля геопотенциала и поля ветра, т.е. направление ветра на высотах совпадает с касательной к изогипсе. Отклонения вектора ветра от изогипсы обычно находятся в допустимых для практических целей пределах. На приземных картах погоды, когда фронт проходит по оси U- или V-образной ложбины, вектор ветра перед фронтом составляет с ним угол меньший, чем за фронтом, где он зачастую почти перпендикулярен к нему. В замаскированной, ложбине отличия в направлении ветра в теплой и холодной массах невелики.

Изменение ветра с высотой в зоне фронта соответствует модели термического ветра, по которой при адвекции тепла ветер с высотой поворачивает вправо, а при адвекции холода — влево в северном полушарии. Поэтому, если фронт смещается в сторону холодной воздушной массы, то на нем ветер с высотой поворачивает вправо. Если же фронт смещается в сторону теплого воздуха, то на нем ветер с высотой будет поворачивать влево.

Поле вертикальных движений в области фронта. Поле вертикальных движений в области фронта формируется под влиянием нескольких факторов. Основными из них являются конвергенция воздушных течений в пограничном слое на оси ложбины, нестационарность движения воздуха и внутреннее трение, возникающее в зоне фронта, при движении холодной и теплой воздушных масс относительно друг друга. В результате области атмосферных фронтов наблюдаются интенсивные вертикальные движения, которые проявляются как скольжение теплого воздуха по клину холодного. При восходящих движениях в теплом воздухе над фронтальным слоем образуется массив облачности слоистых форм. Структура фронтальных полей облачности и осадков, их расположение относительно приземной линии фронта зависят от многих факторов и в первую очередь от типа фронта.

4.4. Особенности полей облачности и осадков с теплым фронтом

Теплым наз. фронт, который перемещается в сторону холодной воздушной массы.

При большом многообразии полей облачности и осадков общим для теплых фронтов является:

1. теплый воздух, как более легкий натекает на клин холодного воздуха, который как более тяжелый располагается всегда внизу.
2. Облачный массив располагается перед приземной линией фронта.

3. основные формы облачности, слоисто-дождевая облачность и высокослоистая (Ns, As) вместе образуют клинообразную форму и располагаются над фронтальной поверхностью в теплом воздухе.

Вблизи центра циклона, где система облаков более развита, зона облаков и обложных осадков простирается на 300 км впереди т.фронта. Вся система (Ns, As) простираются на 500-600 км. Облака перисто-слоистые и перистые (Cs, Ci) располагаются впереди (Ns, As) на расстоянии 700-900 км от фронта. При средней скорости перемещения фронта 30 км/час осадки продолжаются в среднем 10 часов.



Рис. 4.2. Схема теплого фронта

Эта схема теплого фронта зависит от стадии развития циклона, его глубины, географических условий, сезона, поэтому существуют отклонения от этой классической схемы.

4.5. Отклонения от классической схемы теплого фронта

1. В теплое полугодие облачная система может включать кучево-дождевые облака в ночные часы. Когда теплый воздух становится неустойчивым, в результате излучения с верхней границе облаков системы As-Ns, поэтому появляются конвективные движения, которые приводят к формированию Cb облаков, ливневых осадков, гроз в ночное время. Системы облаков имеют меньшую ширину, может располагаться по обе стороны от линии фронта. Грозы на Европейской части, связанные с теплыми фронтами встречаются в 100% случаев в ночные или утренние часы.
2. При достаточной влажности воздуха в пограничном слое и активной турбулентном перемешивании образуются подфронтальные облака St и St fract – слоистые разорванные. Они полностью маскируют надфронтальную облачность. Из As выпадающие осадки могут

- стимулировать осадки из St, и тогда зона осадков может увеличиться до 400 км.
3. Если в пограничном слое профиль теплого фронта очень пологий из-за тормозящего влияния подстилающей поверхности, то основная система облаков и зона осадков смещается вперед относительно линии фронта до того места, где профиль фронтальной поверхности становится обычным.
 4. Если теплый фронт располагается на периферии циклона в глубокой ложбине, то он смещается медленно и его облачная система может располагаться по обе стороны от линии фронта. Зона осадков имеет небольшую ширину, но из-за малой скорости смещения осадки могут быть продолжительными.
 5. Облачность размывающегося старого фронта в заполняющейся ложбине распадается, но при высокой влажности теплого воздуха могут появиться внутримассовые кучево-дождевые облака. Зона осадков и их интенсивность резко уменьшается.

Признаки прохождения теплого фронта.

При движении теплого фронта с запада на восток в среднем за 15-20 часов до его прохождения появляется перистая облачность, занимающая всю западную, северо-западную или юго-западную часть горизонта.

Перистая облачность Ci сменяется более плотными перисто-слоистыми Cs, затем высоко-слоистыми As облаками. За несколько часов до прохождения фронта появляются слоисто-дождевая Ns облачность и начинают выпадать обложные осадки.

Одновременно с появлением облачности усиливается ветер и происходит постепенный поворот его вправо. Отмечается значительное падение давления, усиливающееся по мере приближения фронта. Зимой натекание облаков сопровождается постепенным повышением температуры и влажности воздуха. Летом натекание облаков сопровождается постепенным понижением температуры, так как облака ослабевают радиационный прогрев.

Момент прохождения фронта совпадает с резким повышением температуры воздуха, резким поворотом ветра вправо, прекращением осадков, сменой падения давления на его рост или ослабление падения.

Летом моменты прохождения фронта совпадают с полным прояснением неба, зимой со сменой слоисто-дождевой Ns облачности на слоистую St.

После прохождения фронта кривые хода температуры, давления и влажности имеют вид ровных линий, т.е. они не меняются. Ветер постепенно ослабевает, облачность рассеивается.

4.7. Особенности полей облачности и осадков с холодным фронтом

Холодным фронтам называется фронт, который перемещается в сторону теплой воздушной массы.

В зависимости от скорости перемещения холодные фронты подразделяются на:

- медленно перемещающиеся холодные фронты (**холодные фронты 1 рода**);

- быстро смещающиеся холодные фронты (**холодные фронты 2 рода**).

У медленно перемещающихся холодных фронтов 1 рода клин холодного воздуха подтекает под теплую воздушную массу (рис. 4.3). Теплая воздушная масса постепенно вытесняется вверх и натекает на клин холодного воздуха, образуя зафронтальную облачность и осадки. Зимой и в переходные сезоны конвекция слаба и облачная система холодного фронта 1 рода, являясь зеркальным отображением теплого фронта, располагается в обратном порядке, и обычно состоит из облаков Ns, As, Cs, Ci. Вся эта система облаков располагается за линией холодного фронта. Преимущественно в теплый сезон при неустойчивой стратификации теплой воздушной массы образуется кучево-дождевая облачность, и выпадают перед линией фронта ливневые осадки, которые сменяются обложными осадками за линией фронта. Осадки наблюдаются в зоне на расстоянии 200 км от фронта.

У быстро смещающегося холодного фронта 2 рода его нижняя часть в результате влияния приземного трения приобретает крутой наклон к горизонту (рис. 4.4). Теплый воздух перед приземной линией фронта начинает активно вытесняться вверх, что способствует развитию конвекции. Но уже сразу за приземной линией фронта восходящие конвективные движения ослабевают и сменяются нисходящими, направленными вдоль верхней границы фронтального слоя.

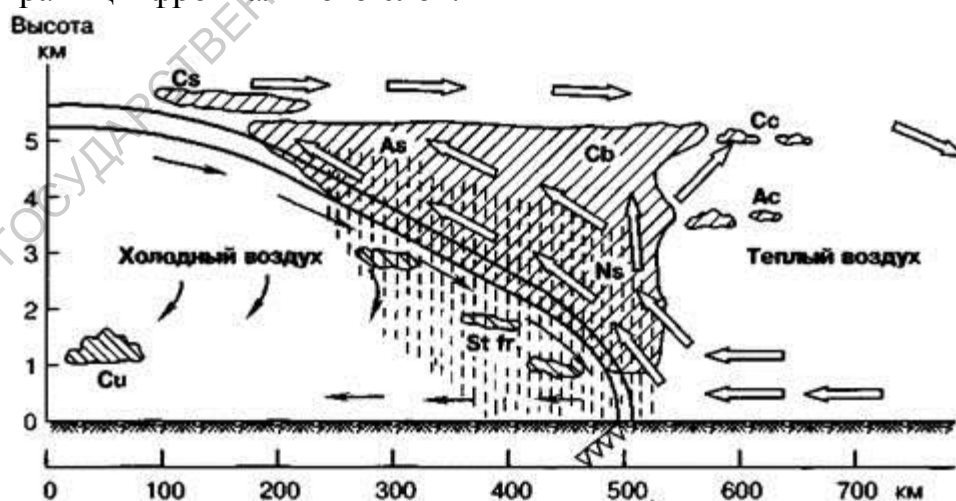


Рис. 4.3. Схема холодного фронта 1 рода

Основной облачный массив из кучево-дождевой облачности, находится перед линией фронта и имеет ширину 50-100 км. Такую же ширину имеет зона ливневых осадков.

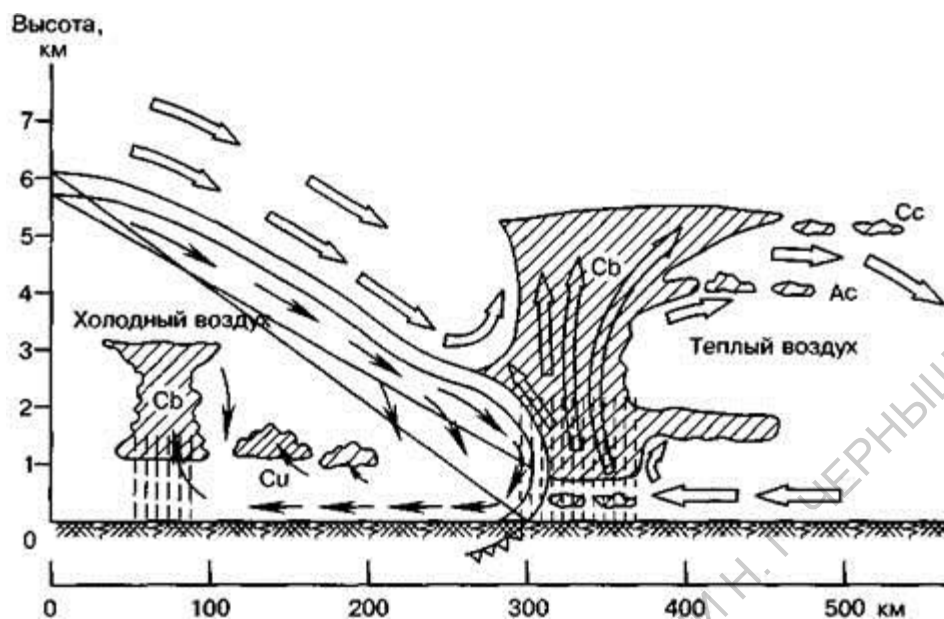


Рис. 4.4 Схема холодного фронта 2 рода

В холодное полугодие за быстро смещающимся холодным фронтом могут возникать слоисто-дождевые и высоко-слоистые облака. Тогда зона осадков становится более симметричной по отношению к приземной линии фронта. Зимой вертикальное развитие Cb небольшое 2-3 км. Зато летом верхняя граница облаков может достигать тропопаузы и проникать в нижнюю стратосферу.

4.8. Фронты окклюзии

В различных частях циклона находятся воздушные массы с разными характеристиками: в южной части располагается теплая воздушная масса, а в передней и тыловой частях – холодные воздушные массы. В результате в циклоне всегда имеются теплый и холодный фронты (рис. 4.5).

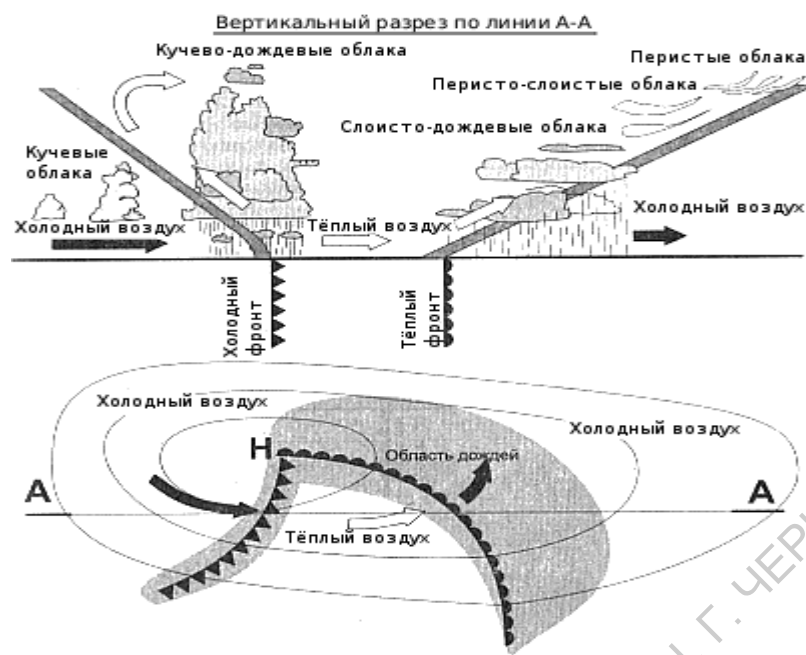


Рис. 4.5. Тёплый и холодный фронты в циклоне

В процессе развития циклона холодный фронт движется быстрее тёплого, со временем догоняет его и сливается с ним. В результате слияния образуется фронт окклюзии (рис. 4.6). **Фронтами окклюзии называются фронты, образующиеся за счет слияния тёплого и холодного участков одного фронта.**

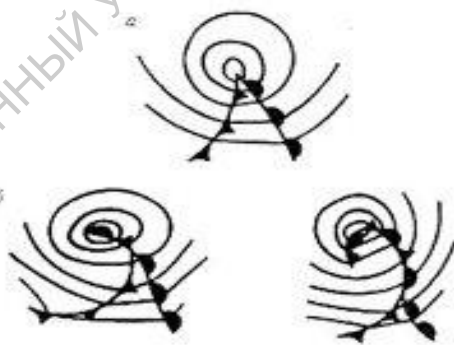


Рис. 4.6. Схема фронтов в циклоне на разных стадиях развития
 а) в молодом циклоне; б) в циклоне в стадии максимального развития (начало образования фронта окклюзии); в) в окклюдированном циклоне

Точка, от которой расходятся остающиеся несомкнутые участки тёплого и холодного фронтов, называется **точкой окклюзии**. Область, заключенная между тёплым и холодным фронтами называется **тёплым сектором циклона**. В процессе развития циклона тёплый сектор сужается, а в результате окклюдирования тёплый воздух с поверхности земли перемещается вверх на более высокие уровни. Фронт окклюзии разделяет предфронтальный и зафронтальный холодный воздух.

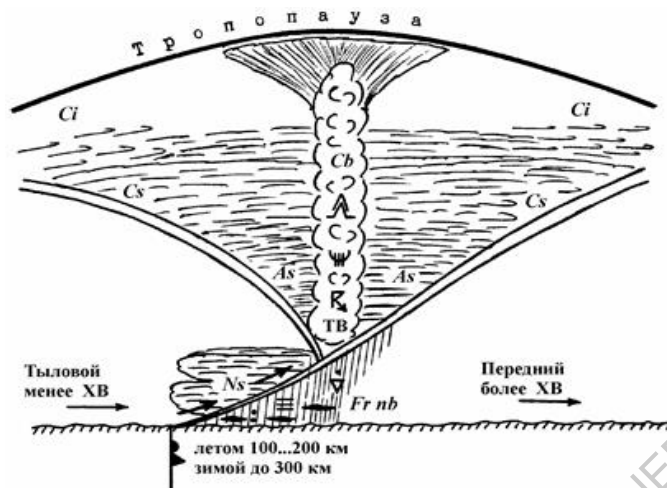


Рис. 4.7. Схема теплого фронта окклюзии

Фронты окклюзии делятся на холодные и теплые. Если воздух тыловой части циклона теплее воздуха передней части, то фронт называется окклюзией по типу теплого фронта (рис. 4.7).

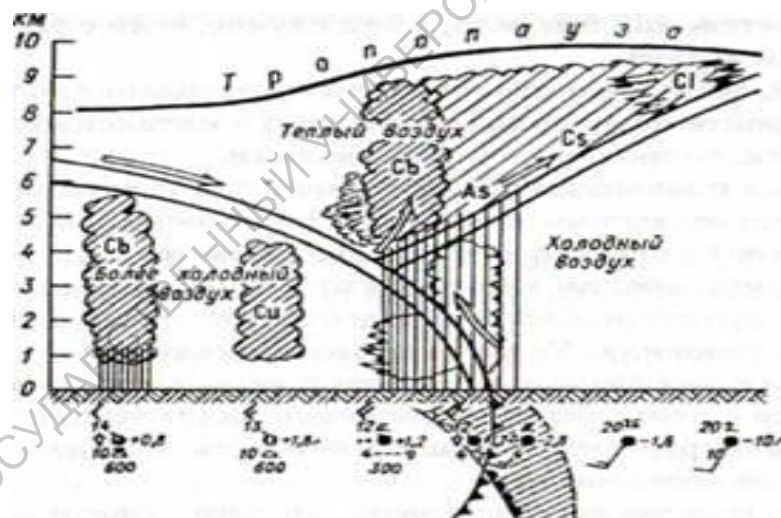


Рис. 4.8. Схема холодного фронта окклюзии

Если тыловой воздух холоднее переднего, фронт окклюзии называется по типу холодного фронта (рис. 4.8). Нейтральные фронты окклюзии, когда контрасты в зоне фронта отсутствуют.

В теплом и холодном фронтах окклюзии различают линию верхнего холодного и верхнего теплого фронтов.

С фронтом окклюзии связаны симметричные, хорошо выраженные ложбины. Перед фронтом окклюзии располагается область падения давления, которая удалена в случае теплого фронта окклюзии несколько вперед, перед

верхним холодным фронтом. Область роста находится позади фронтов окклюзии и на некотором удалении от него в случае холодного фронта окклюзии.

Контраст температуры при прохождении фронта окклюзии меньше, чем у основных фронтов. На картах относительной топографии фронту окклюзии соответствует гребень тепла.

4.9. Особенности полей облачности и осадков с фронтами окклюзии

В начале окклюдирования происходит слияние облаков теплого и холодного фронтов, поэтому горизонтальная протяженность зоны облачности и осадков может быть очень большой, и располагается как перед, так и за линией фронта окклюзии.

В процессе окклюдирования и подъема верхнего фронта, облачность верхнего фронта уменьшается, слоисто-дождевая Ns облачность постепенно может исчезнуть, а остается только высокостроистая As облачность и др. формы облаков. Зона осадков, постепенно сужаясь, перемещается в предфронтальную область, а затем исчезает.

В системе облаков теплого фронта окклюзии, наряду с облачностью могут наблюдаться кучево-дождевые облака вблизи приземной линии фронта. Из них могут выпадать ливневые осадки перед линией фронта. Характерной особенностью осадков фронтов окклюзии является их неравномерность по площади и интенсивности.

В зимнее время с фронтами окклюзии могут быть связаны сильные и продолжительные метели, обледенение.

Теплые фронты окклюзии чаще наблюдаются в холодное время года, когда зафронтальный воздух, поступающий с Атлантики, теплее предфронтального континентального воздуха. При этом могут наблюдаться метели, гололед.

Для лета типичны холодные фронты окклюзии, с которыми связаны грозы и туманы.

Нейтральные фронты окклюзии имеют облачность и осадки теплых фронтов окклюзии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ветлов И.П. Петренко Н.В. Осадки холодных фронтов в центральной европейской территории СССР в теплое время года. Л.: Гидрометеиздат, 1955. 64 с.
2. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 616 с.
3. Гущина Д.Ю. Синоптическая метеорология. Атмосферные фронты. Учебное пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2013. 104 с.

4. Зверев А.С. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 711 с.
5. Иванова Г.Ф. Анализ и прогноз синоптического положения. Учебно-методическое пособие. Саратов: ИЦ «Наука», 2011.- 65с.
6. Калинин Н.А. Динамическая метеорология. Пермь, Перм. кн. изд-во, 2009.- 256 с.
7. Практикум по синоптической метеорологии /Под ред. В.И. Воробьева. СПб.: изд. РГГМУ, 2005.-303 с.
8. Приходько М.Г. Справочник инженера-синоптика. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 327 с.
9. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 702 с.
10. Русин И.Н., Тараканов Г.Г. Сверхкраткосрочные прогнозы. СПб.: Изд-во РГГМИ, 1996. 308 с.
11. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 568 с.
12. Шакина Н.П. Динамика атмосферных фронтов и циклонов. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 262с.
13. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. Прогностическая значимость динамических факторов генерации осадков // Метеорология и гидрология. 2008, № 4. С. 5-18.
14. Шакина Н.П. Лекции по динамической метеорологии. М.: ТРИАДА ЛТД, 2013. 160 с.