

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИЙ ПО КУРСУ «СТРУКТУРА ЦИКЛОГЕНЕЗА В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ»**

### **Лекция 1,2.**

#### **Роль основных факторов в формировании ОЦА, циклогенеза и антициклогенеза.**

Циклогенез и антициклогенез можно связать с крупномасштабными циркуляционными системами, то есть с общей циркуляцией атмосферы, так как циклоны и антициклоны являются составной частью общей циркуляции атмосферы. Можно выделить пять основных факторов, определяющих формирование течений крупного масштаба: 1-солнечная радиация; 2- вращение земли; 3 - пространственные размеры атмосферы; 4 - неоднородность подстилающей поверхности и ее термических свойств; 5 - солнечная активность и ряд других космических и геофизических факторов. Например, таких, как нутация, космическое излучение, влияние притяжения Луны, солнечный ветер, магнитное поле Земли и межпланетное магнитное поле. Все эти 5 факторов влияют с помощью нескольких механизмов. Основными из них являются: макротурбулентный горизонтальный обмен; вертикальный турбулентный и конвективный обмен; лучистый теплообмен; влагооборот, включающий в себя процессы конденсации и сублимации водяного пара и испарения воды в атмосфере. Под солнечной радиацией понимают стационарную часть солнечного излучения. Солнечная постоянная равна 1,38 киловатт на метр квадратный. Энергия стационарной части превышает 99 процентов, остальная часть ее приходится на солнечную активность. Однако только три с половиной процента энергии, которую поглощают земля и атмосфера, переходит в кинетическую энергию атмосферных движений. В пределах тропосферы приток тепла осуществляется путем турбулентного переноса, конденсации и испарения, а также длинноволновым излучением подстилающей поверхности. В результате вращения Земли появляется сила Кориолиса, которая приводит к возникновению западного потока. Температура вдоль меридиана меняется неравномерно, поэтому в субтропиках и умеренных и высоких широтах образуются узкие зоны с большими градиентами температуры и давления. В областях этих зон происходит образование циклонов и антициклонов, помощью которых осуществляется макротурбулентный обмен между низкими и высокими широтами. Наибольшая повторяемость глубоких циклонов в нижней тропосфере наблюдается на полярной периферии умеренных широт, а наибольшая повторяемость антициклонов - на субтропической. Таким образом, под влиянием солнечной радиации и вращения Земли в тропосфере формируются воздушные течения большого масштаба, которые подвергаются дополнительному возмущению, обусловленному орографией, трением и термической неоднородностью подстилающей поверхности. Благодаря различию тепловых свойств материков и океанов образуются обширные области замкнутой циркуляции, то есть формируются постоянные и сезонные центры действия атмосферы.

Основными силами, вызывающими ускорение частиц воздуха и циркуляцию атмосферы, являются горизонтальная составляющая силы барического градиента и сила Кориолиса. В Северном полушарии, когда градиент давления направлен от экватора к полюсу, наблюдается западный поток. Угловая скорость вращения Земли только в первом приближении может считаться величиной постоянной. Во-первых, обнаружено постепенное непрерывное уменьшение скорости вращения Земли, т.е. наблюдается вековой ход. Внутри векового хода отмечается годовой ход. В среднем наибольшая скорость вращения приходится на 1 июня, а наименьшая на - 27 сентября. Наконец существуют еще непериодические колебания, т.е. существуют скачкообразные изменения скорости. Хотя они малы, однако некоторые ученые считают, что они значимы для общей циркуляции атмосферы. Атмосферу обычно рассматривают как тонкую пленку высотой 30 км, прилегающую к земной поверхности. Оценка порядка средних значений вертикальной и горизонтальной скоростей переноса в общей циркуляции атмосферы с помощью уравнения неразрывности для несжимаемой атмосферы показала, что скорость вертикальных движений более чем в 100 раз меньше скорости горизонтального переноса.

Рельеф земли представляет собой некоторую преграду. Воздушные течения могут их обтекать и частично перетекать. Тот или иной тип течения зависит от высоты препятствия и степени устойчивости воздушной массы. На наветренном склоне гор имеет место конвергенция линий тока,

а на подветренном - дивергенция. С конвергенцией и дивергенцией связаны изменение вихря скорости, которое обуславливает изменение циркуляции. Географическое распределение рельефа приводит к возникновению возмущений в определенных районах и к созданию в них особых циркуляционных условий, которые формируют погоду. С другой стороны на формирование циркуляции оказывает влияние трения воздуха о земную поверхность. Над слоем трения при движении воздуха поперёк изобар в сторону низкого давления возникает компенсирующий поток поперёк изобар в сторону высокого давления. Благодаря этому механизму действия приземное трение распространяется в более высокие слои атмосферы.

Количество энергии, поступающей от Солнца, претерпевает суточные, сезонные и годовые изменения, которые связаны с вращением Земли. Но помимо этого есть колебания, связанные с процессами, происходящими непосредственно на Солнце. В волновом излучении Солнца нестабильность характерна только для ультрафиолетового и рентгеновского участков спектра. В видимом и прилегающим к нему частях спектра излучение постоянно, так как пятна на Солнце по площади невелики по сравнению с площадью диска Солнца и недостаток излучательной способности компенсируется более яркими факелами. Корпускулярное излучение нестабильно. Интенсивность указанных видов излучения возрастает с увеличением количества пятен, факелов, флоккул. Для количественной характеристики солнечной активности применяются индекс Вольфа, который определяется формулой:  $W = k(10g + f)$ . Здесь  $k$  – множитель, зависящий от условий наблюдения и вида инструментов,  $g$  - число групп и отдельных пятен,  $f$  - число всех пятен в группах и отдельных пятен. Этот индекс характеризует только количественную сторону пятнообразовательной деятельности. Он не учитывает ни площадь пятен, ни их устойчивость во времени. Существуют другие индексы, учитывающие количественные характеристики пятнообразовательной деятельности: это сумма площадей пятен на Солнце за период от одного дня до нескольких лет; средняя продолжительность жизни всех групп пятен, которая выражается в оборотах Солнца, а также индекс геомагнитной возмущенности. В изменениях солнечной активности были выделены циклические колебания: 27 суточные, которые связаны с вращением Солнца вокруг своей оси относительно Земли; 5-6 –летние, 11-летние, 20-23-летние, 80-90-летние.

### **Лекция 3, 4.**

#### **Основные положения теории Россби. Длинные волны Россби-Блиновой.**

Баротропной средой называется среда в которой давление зависит только от плотности или только от температуры. В такой среде изобары изотермы и изопикны параллельны или совпадают друг с другом. Здесь сохраняется абсолютный вихрь скорости и геострофический ветер не имеют сдвигов по вертикали. Баротропные модели были созданы на основе использования уравнение вихря скорости. Они позволяют осуществлять количественный прогноз геопотенциала одной изобарической поверхности. Это упрощённые, то есть плоские модели. А бароклинная среда это среда, в которой распределение температуры не совпадает с распределением давления и помимо этого накладываются некоторые условия на распределение ветра по вертикали. Здесь давление и плотность являются функцией температуры, а во влажном воздухе - функцией влажности. На картах показателем бароклинности является наличие горизонтального градиента температуры на изобарических поверхностях. Меридиональный перенос тепла через умеренные широты происходит при перемещении крупномасштабных барических систем с временным масштабом в несколько суток. Развитие этих систем происходит из-за бароклинной неустойчивости основного зонального потока из-за дифференциального нагрева. По теории Россби ансамбль синоптических вихрей в сумме может переносить момент импульса в широтные зоны с наибольшими западными ветрами верхней тропосфере и действовать как отрицательная вязкость, то есть питать осредненную зональную циркуляцию кинетической энергией. В циркумполярных воздушных течениях в верхней тропосфере образуются струйные течения. Струйные течения является бароклинно-неустойчивыми, то есть в них скорость основного потока зависит от вертикальной координаты. На них возникают малые возмущения которые распространяются и превращаются в волны Россби - Блиновой. Эти волны имеют большие амплитуды по широте и перемещаются на восток медленнее, чем в основном западном потоке. В ложбинах и гребнях волн Россби -Блиновой образуются

циклоны и антициклоны. Между шахматами четверками этих вихрей образуются высотные деформационные поля и высотные фронтальные зоны. Под ними в нижней тропосфере возникают атмосферные фронты. Атмосферные фронты также являются бароклинно-неустойчивыми, особенно под дельтами высотных фронтальных зон. На них формируются волновые возмущения и приземные циклоны и антициклоны. В некоторых случаях приземные циклоны и антициклоны окклюдируют и проникают в верхнюю тропосферу, то есть «баротропируются». Ансамбль баротропирующихся вихрей действует на струйные течения как отрицательная вязкость. Момент импульса к струйным течениям переносится волновыми возмущениями, так как ось ложбин и гребней наклонена из тропиков в сторону течения, причем момент импульса перед ложбинами, где он больше, переносится в меридиональном направлении к течению, а из ложбины, где он меньше, уносится из течения. Таким образом, эволюция вихрей состоит в их разрастании, в стремлении к движению на запад и в вытягивании вдоль кругов широты (анизотропизации) и баротропизации. В северном полушарии в зональном потоке возникают дополнительные возмущения за счет орфографии и взаимодействия с областями раздела океан-суша. При крупномасштабных проявлениях это приводит к концентрации бароклинного переноса вдоль траекторий штормов в Тихом и Атлантическом океанах. Существенными могут оказаться и другие процессы.

Усилиями ученых разных стран было определено, что в толще тропосферы и в нижней стратосфере существуют длинные термобарические волны, свойства которых отличаются от коротких фронтальных волн. На учете длинных волн основаны методы долгосрочного прогнозирования. Е.Н.Блинова на основе теории длинных волн впервые разработала гидродинамический долгосрочный прогноз погоды полей давления и температуры. С эволюцией длинных волн связаны периодические смены типов циркуляции, которые характеризуются с помощью индексов циркуляции. Многие исследователи искали динамические причины преобразования типов циркуляции и неустойчивости длинных волн. Сначала представим себе движения, не зависящие от географической широты. Пусть на зональное распределение наложены синусоидальные барические возмущения. Если отвлечься от влияния широты, то можно видеть, что при одинаковой густоте изогипс через оси гребней, где кривизна антициклоническая, переносится больше воздуха, чем через оси ложбин, где кривизна циклоническая. Поэтому падение происходит к востоку от оси ложбин, а рост - к востоку от оси гребня. Так как основной поток западный, то ложбины и гребни должны перемещаться на восток. Помимо этого скорость перемещения зависит от радиуса кривизны, то есть чем меньше радиус кривизны и короче волны, тем больше скорость. Следовательно, короткие волны при одной и той же амплитуде смещаются быстрее длинных. Рассмотрим теперь только влияние широты. Из формулы градиентного ветра вытекает следующее: между смежными изобарами в низких широтах воздуха переносится больше, чем в высоких. Перенос массы воздуха между данной парой изогипс расположенных на разных широтах больше в ложбине, чем в гребне. Восточнее гребня наблюдается падение давления, восточнее ложбины - рост. Этот эффект приводит к перемещению волны на запад, причем скорость перемещения не зависит от длины волны. Длинные волны чаще перемещаются на запад, а короткие - на восток. А волны промежуточной длины могут оказаться стационарными. Такие перемещения характерны для баротропной атмосферы, а в бароклинной процесс оказывается более сложным.

Россби сделал вывод, что изменение характеристик атмосферной циркуляции может быть предсказано на основе перестройки поля скорости ветра. Перестройка этого поля выражается адвективным изменением поля вихря на бездивергентном уровне. При заданной длине волны на данной широте волна движется быстрее, если скорость ветра больше, а при заданной скорости ветра скорость волны тем больше, чем меньше длина волны. Очень короткие волны стремятся двигаться со скоростью близкой к скорости ветра на бездивергентном уровне, а у длинных волн значение скорости приближается к величине скоростью западного потока. Большое значение имеет длина стационарной волны. Если длина волны больше длины стационарной волны, то скорость перемещения волны ( $C$ ) отрицательна, и волны движутся на запад. А если длина волны меньше длины стационарной волны, то скорость перемещения волны ( $C$ ) положительна, и волны движутся на восток. Россби получил свою формулу для ограниченной задачи - для баротропного возмущения. Длинные волны наблюдаются в общем зональном переносе: по окружности земли укладывается 3-6 длинных волн. Длина стационарной волны колеблется в следующих пределах: от 2700 км на широте 30 градусов при скорости 4 метра секунду до 8300 километров - на широте 60

градусов при скорости 20 метров в секунду. Кресман развил идею Россби и выяснил, что новые ложбины не могут образовываться, если волны движутся на восток. Образование новых ложбин происходит по его мнению тогда, когда ложбины движутся на запад, то есть когда фактическая длина волны значительно превосходит длину стационарной волны.

Россби вывел уравнение зависимости длины волны от скорости зонального потока:

$$V_L - C = \beta L^2 / 4\pi^2,$$

где  $V$  – скорость ветра на бездивергентном уровне,

$C$  – скорость движения волны,

$L$  – длина волны.

Коэффициент характеризует скорость изменения параметра Кориолиса в северном направлении.

Россби проверил практическую применимость этой формулы и сделал вывод, что изменение характеристик атмосферной циркуляции может быть предсказано на основе перестройки поля скорости ветра. Перестройка этого поля выражается адвективными изменениями поля вихря на бездивергентном уровне без учета изменения этих характеристик с высотой. (Как было замечено, при заданной длине волны на данной широте волны движутся быстрее, если скорость ветра больше, а при заданной скорости ветра скорость волны тем больше, чем меньше длина волны.) Очень короткие волны стремятся двигаться со скоростью близкой к скорости ветра на бездивергентном уровне, а у длинных волн значение скорости приближается к величине скорости западного потока. Бьеркнес и Холмбо назвали правую часть уравнения критической скоростью и определили длину стационарной волны. С помощью сравнения и анализа можно определить, куда смещаются длинные и короткие волны, характеризующиеся ложбинами и гребнями, – на запад или на восток.

## **Лекция 5, 6.**

### **Географическая локализация очагов циклонической и антициклонической деятельности. Роль циклонической деятельности в системе ОЦА.**

Под циклонической деятельностью понимают образование, эволюцию и перемещение циклонов и антициклонов. Это множественное явление. Ежегодно в Северном полушарии образуется в среднем около тысячи циклонов. На ежедневных приземных картах обнаруживается до 15-20 циклонов и 7-10 антициклонов. Преобладающий западный перенос у земли является не в виде упорядоченного зонального потока, как на высотах, а как суммарный эффект переноса циклонов и антициклонов с запада на восток. По причинам зарождения вне тропические циклоны делятся на термические и фронтальные. Основными элементами деятельности являются фронтальные подвижные циклоны и антициклоны. Термические барические образования возникают в условиях неоднородного нагрева подстилающей поверхности, а фронтальные – на фронтальных разделах. Их повторяемость неравномерна и имеет сезонный ход. Распределение повторяемости подвижных циклонов и антициклонов носит зональный и очаговый характер. В среднем повторяемость антициклонов в два с половиной три раза ниже, чем циклонов. Помимо этого была проведена оценка средней повторяемости циклонов и антициклонов. Основная широтная зона с наибольшей повторяемостью подвижных циклонов зимой находится в пределах 40-60 градусов северной широты, а летом – 50-70 градусов северной широты. Антициклоны располагаются в пределах от 30 до 50 градусов северной широты зимой и 40 - 50 градусов северной широты – летом. Зимой и летом максимальная повторяемость наблюдается в околополюсном районе. Основным очагом повышенной повторяемости циклонов и антициклонов являются районы вблизи границы океанов и материков и вблизи гор. Положение очагов повышенной повторяемости подвижных циклонов и антициклонов совпадает с положением основных центров действия атмосферы. Погосян рассмотрел траектории перемещения циклонов и антициклонов и влияние их на погоду Европейской Территории России, Западной Сибири и Казахстана. По траектории Ньюфаундленд -Исландия - Баренцево море циклоны двигаются зимой. Направление циклонов на картах АТ-700 совпадает с положением арктической планетарной высотной фронтальной зоны и северной планетарной

высотной фронтальной зоны умеренных широт. Летом зона наибольшей повторяемости циклонов смещается к югу по траектории Лабрадор - Исландия- Северная Европа. Зимой антициклоны располагаются в районе от Северного моря до устья Оби равномерно. А летом максимум вторжений арктического воздуха проходит по оси, которая ориентирована с Баренцева моря на Урал.

Циклоны и антициклоны является важным звеном в общей циркуляции атмосферы. Развиваясь на фоне планетарных волн, циклоны и антициклоны превращаются стационарные барические образования. Тогда они становятся компонентами высотных деформационных полей. Они участвуют в образовании высотных фронтальных зон, которые являются источником возникновения подвижных циклонов и антициклонов. Таким образом главная роль циклонической деятельности состоит в том, что подвижные циклоны и антициклоны осуществляют обмен воздуха между высокими и низкими широтами . Они поддерживают в определенных границах меридиональный градиент температуры. Под отдельными районами увеличения градиентов температуры и давления образуются фронтальные зоны. В нижней и средней тропосфере формируется фронтальные разделы. Если условия для фронтогенеза благоприятные - градиенты температуры давления и ветра возрастают, отмечается критическое значение градиента потенциальной энергии- то при превышении этого критического значения устойчивость высотной фронтальной зоны нарушается.

Критическое значение градиентов температуры, давления и ветра достигается лишь на отдельных участках высотной фронтальной зоны, а средние значения остаются ниже критических. Таким образом, роль циклонической деятельности в общей циркуляции атмосферы заключается в том, что она приводит к ликвидации избыточных контрастов потенциальной энергии. При избытке контрастов потенциальной энергии и потери устойчивости она затем автоматически переходит в более устойчивое состояние с помощью макротурбулентного перемешивания, так как большие массы холодного воздуха перемещаются к югу, а теплого к северу. В результате потенциальная энергия переходит в кинетическую. Таким образом ,циклоническая деятельность ограничивает верхний предел контраста потенциальной энергии. Избыток контраста потенциальной энергии ликвидируется путем перехода ее в кинетическую. Тогда временно происходит рост кинетической энергии, который в результате приводит к увеличению скорости циркуляции. В период максимального возмущения потока достигается максимум скорости ветра в отдельных областях высотной фронтальной зоны. Однако после затухания этого процесса градиенты температуры, давления и ветра уменьшаются. Такие процессы возникают спорадически там, где имеются благоприятные условия для образования и обострения высотных фронтальных зон.

## **Лекция 7, 8.**

### **Распределения циклонов и антициклонов по исследованиям Петерсена, Тальярда и Баррета.**

Петерсен, Тальярд и Баррет считали, что образование циклонов и антициклонов связано с крупномасштабными циркуляционными системами. Они построили карты географической повторяемости циклонов и антициклонов и их появления в Северном полушарии на основании анализа 40 летнего периода и получили следующие выводы. Наибольшая повторяемость циклонов и антициклонов наблюдается вблизи 38 градуса северной широты зимой и около 48 градуса северной широты летом. Там, где господствует максимальный средний западный перенос. В оба сезона у циклонов после их образования была обнаружена ярко выраженная тенденция перемещения к полюсу. У антициклонов была замечена более слабая тенденция перемещения к экватору. Аналогичные результаты относительно циклонов южного полушария были получены другими учеными. Причем в обоих полушариях в различные сезоны максимальная повторяемость циклонов наблюдается на 15 градусов широты ближе к полюсам, чем максимальная повторяемость самого циклогенеза. При сравнении циркуляционных систем в обоих полушариях были обнаружены существенные различия в распределении циклонов и антициклонов. Их подтвердил Тальярд. Он рассмотрел синоптические системы Южного полушария. Антициклоны Южного полушария большей частью концентрируются в субтропиках при наименьшей повторяемости антициклонов в высоких широтах над океаном. Над районами между 45 градусом южной широты и

Антарктидой наблюдается нулевая повторяемость антициклонов. Хотя Антарктида характеризуется значимой повторяемостью антициклонов. Повторяемость циклонов однородна во все сезоны. Анализ карт показал, что Южный океан представляет собой район множества развитых и окклюдированных циклонов. Эти циклоны зарождаются в субтропиках и ниже, затем движутся по направлению к полюсам по спирали через Тихий и Атлантический и Индийский океаны. Распределение центров циркуляционных систем северного полушария является сложным из-за топографических особенностей. В Южном полушарии отмечается большая регулярность в распределении циклонов и антициклонов. Однако нарушения ее более заметны, чем в Северном полушарии. Изменения в масштабе полушария связаны с колебанием широты нахождения пояса максимальных ветров. Баррет отметил, что зимой ось максимального среднего ветра расположена по спирали в направлении к полюсу. Эта спираль имеет над восточными районами Тихого океана выпуклость к югу, а над Атлантическим океаном она смещена к северу. Эта спираль отмечается и летом, но выражена слабее. Аналогичная спираль существует в южном полушарии. Районы, где концентрируются струйные течения, накладываются друг на друга и совпадают с меридианами наибольшей повторяемости блокирующих антициклонов. Внетропические возмущения наблюдаются в районах сильной бароклинности - вблизи струйных течений-, поэтому расположенные по спирали средние ветры должны оказывать влияние на повторяемость циклонов и антициклонов.

## **Лекция 9, 10.**

### **Теории цикло – и антициклогенеза: конвективная теория Мона-Ферреля, волновая теория развития циклонов метеорологов бергенской школы.**

Эта теория была выдвинута середине 19 века Моном и Феррелем. По их теории началом развития циклона является прогрев воздуха на ограниченной территории. При прогреве воздуха образуются вертикальные конвективные токи, которые обуславливают конденсацию водяного пара. Скрытая теплота конденсации поддерживает вертикальные токи и приводит к формированию циклона. Движение циклона рассматривается ими как образование центров низкого давления там, где вертикальные токи образуются интенсивно. и наиболее интенсивно происходит конденсация. По их мнению наиболее интенсивно конденсация происходит в восточной части циклона и центр смещается в восточном направлении. В результате невозможно объяснить движение циклона к северу и северо-востоку, и к западу. Главной их ошибкой был тот факт, что причиной развития они считали конденсацию. Конденсация несомненно играет важную роль в поддержке вертикальных токов, но ее энергии недостаточно для развития циклона, размеры которого достаточно велики. Опровержением этой теории является и тот факт, что циклоны не перемещаются в сторону теплого сектора, где сосредоточено наибольшее количество влаги. В 1882 году Броунов в работе «Поступательное движение циклонов и антициклонов в Европе и России» писал, что причина поступательного движения циклонов заключается в том, что происходит непрерывное убывание атмосферного давления в его передней части вследствие замены тяжелого воздуха более легким. Наибольшее падение давления происходит там, где ветры дуют перпендикулярно изотермам и линиям равных влажностей. Таким образом, можно рассматривать движение циклонов как результат возникновения новых вихрей там, где наблюдается наибольшее падение давления. Броунов приводил 2 причины падения давления: нагрев подстилающей поверхности и растекание воздуха на высотах. Для возникновения циклонов необходимо неустойчивое состояние воздуха. Неустойчивость может возникнуть из-за дифференциального нагрева поверхности земли. Если нагрев достаточно сильный, то в окружающей атмосфере возникают вертикальные токи. Восходящие движения служат причиной падения давления, так как в этом случае происходит растекание воздуха, меняется вес столба и давление падает. Воздух под действием силы Кориолиса отклоняется вправо и возникает циклоническая циркуляция. Внизу у земли в циклонах изобарические поверхности вогнутые, а на высотах - выпуклые. Доказательством выпуклости наверху он считал растекание воздуха от центра к периферии. По мере углубления циклонов облака верхнего яруса удалялись от центра в переднюю часть. Антициклоны, по его мнению, образуются двумя способами: 1 - вследствие охлаждения земли в результате лучеиспускания ;2 - вследствие

накопления воздуха, выбрасываемого из циклона. Механизм развития антициклона он представлял главным образом за счет термических причин. Если на некоторой ровной поверхности температура одна и та же, то поверхности одинакового давления будут располагаться параллельно земной поверхности. Пусть часть поверхности охлаждается сильно, тогда охлажденный прилегающий воздух сжимается и от этого оседает весь столб воздуха. После того как происходит оседание, давление растёт. так как наверху воздух будет проседать. Оседание приводит к рассеиванию облачности за счет нисходящих движений, а это тоже увеличивает лучеиспускания. Это механизм развития за счет термического фактора. При учете динамического фактора необходимо учесть следующее: наверху воздух от каждого циклона оттекает и скапливается в промежутках, в результате между ними появляются замкнутые области высокого давления, в которых растекание не компенсируется трением и давление растёт. Поэтому в промежутках образуется антициклон. Аналогично между двумя антициклонами может возникнуть циклон .

Основоположником этой теории является группа норвежских ученых: В.Бьеркнес, Я.Бьеркнес, Сульберг, Бержерон, Свобода. Ранее в 1911 году Шоу дал схему строения циклонов на базе двух холодных и одной теплой воздушных масс. Эскнер в 1923 г предложил теорию развития и образования циклонов на фронте. Ее суть такова: на арктическом фронте под действием каких-то причин может образоваться волна. В результате ее образования формируется язык холодного воздуха, который нарушает западный поток. Барьером является холодный фронт. За барьером уменьшается мощность воздушной массы, происходит падение давления. Это падение приводит к развитию циклона. Наиболее ценной его идеей считается мысль о барьере холодного воздуха, но за барьером циклон не образуется, хотя эта область влияет на траекторию движения циклона. Такие барьеры циклон может огибать. На фронтальную природу циклонов было указывал также В. Бьеркнес. Помимо этого были установлены стадии развития циклона. Ученый считал, что циклон происходит из волны на фронте. Фронтальные волны могут быть устойчивыми и неустойчивыми. Устойчивые волны - это такие волны, амплитуда которых со временем уменьшается. Из них циклон развиваться не может. Неустойчивые волны - это такие волны, амплитуда которых увеличивается, и волновые движения переходят вихревые. Бьеркнес считал, что причиной волновых образований являются или орография, или наличие рядом уже существующей волны из циклона, который дает импульс для образования новых. Этот факт можно считать недоработкой норвежской школы, так как циклоны могут возникнуть и над ровной поверхностью и при отсутствии циклонов вокруг него. Второй недостаток заключается в том, что не было представлено аналитическое обоснование этой теории. Первым математически обосновал теорию фронтальных циклонов Кочин в 1931 году. Он рассмотрел возможные причины возникновения волн на фронте и дал теоретическую схему циклонов. Выводы из теории следующие : существуют три силы определяющие развитие волны на фронтальной поверхности: сила тяжести, сила сдвиговой деформации, сила инерции. Сила тяжести обусловлена возникновением гравитационных волн на фронте, однако эти волны устойчивы и сами по себе к развитию циклона не приводят. Они со временем затухают и они могут действовать на циклон, усиливая или ослабевая его. Сила сдвига возникает за счет не одинаковой скорости воздушных масс, разделяемых фронтом .Под действием такой силы возникает неустойчивые волны, которые аналогичны волнам на поверхности моря. При переходе через какое-то критическое значение из волн сдвига могут возникать циклоны. Силами инерции является сила Кориолиса и центробежная сила. Под влиянием их могут возникнуть волны на атмосферном фронте. Но несмотря на то, что эти волны имеют длину и периоды, совпадающие с циклоническими волнами, они устойчивы, и к развитию циклона привести не могут. По мнению Кочина чаще всего циклон возникает при наличии всех трех сил.

Выделяют три стадии развития циклона. Стадия волны, стадия молодого циклона, стадия окклюзии. Стадия волны возникает тогда, когда имеется стационарный фронтальный раздел холодного и теплого воздуха, причем холодный воздух движется на запад, а теплый - на восток. На таком фронте может возникнуть волна. В вершине этой волны холодный воздух заменяется теплым воздухом, и давление в центре циклона падает. Теплый воздух приобретает северную составляющую, холодный - южную, и перед теплым фронтом наблюдается падение давления, а за холодным фронтом отмечается рост давления. Холодный фронт в стадии волны имеет характеристику холодного фронта 2 рода и узкую полосу осадков. Перед теплым фронтом полоса осадков намного шире. Если волна устойчивая, то процесс угасает, фронт становится

квазистационарным, и давление на вершине падает на малую величину. Барическое поле в этом случае оформляется одной изобарой В стадии молодого циклона барическое поле оформлено несколькими изобарами, теплый воздух смещается к северу, холодный воздух - на юг. Происходит оформление теплого сектора, и наблюдается хорошо выраженная циклоническая циркуляция. Перед теплым и за холодным фронтами полоса осадков более широкая, отмечается область пониженного и повышенного давления, которая представлена замкнутыми изотенденциями. В стадии окклюдирования холодный фронт догоняет теплый фронт и сливается с ним. Начинается стадия окклюдирования. В начале окклюдирования циклон углубляется, теплый сектор уменьшается, циклон заполняется, давление начинает расти. Точка окклюзии смещается на периферию и циклон становится холодным.

Недостаток этой теории заключается в том, что внешне теория правильно описывает стадии развития циклонов, но она не объясняет основной причины их зарождения.

## Лекция 11, 12.

### Адвективно-динамическая теория развития циклонов и антициклонов. Недостатки рассмотренных теорий.

Первые идеи о значении динамического фактора в развитии циклонов были высказаны П.И. Броуновым. Идея заключалась в том, что на высоте существуют области сходимости и расходимости потоков (конвергенция и дивергенция), а у земли, в соответствии с этим, возникают области роста и падения давления. Наличие областей сходимости и расходимости потоков впервые обнаружил Михель, а потом Шерхаг высказал мысль, что все циклоны возникают под дельтой ВФЗ. Дальнейшие наблюдения показали, что все циклоны возникают под областью расходимости потоков.

Это означает, что одним динамическим фактором нельзя объяснить возникновение перечисленных барических образований.

Анализ карт барической топографии Погосьяном и Таборовским привел их к мысли о совокупном действии адвективного и динамического факторов, т.е. об адвективно-динамической природе циклонов и антициклонов. В атмосфере эти два фактора взаимосвязаны и взаимообусловлены. В самом деле, изменение давления приводит к изменению конфигурации изогипс, а следовательно, и к изменению характера адвекции. Изменение характера или интенсивности адвекции, неизбежно приводит к изменению давления.

В 1947 году Таборовский вывел формулу адвективно-динамического изменения давления:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = K T_y^2 [2H_{ns} \cos 2\varepsilon - H_{nn} \sin 2\varepsilon + (H_{nn}/r) \sin 2\varepsilon],$$

где К – коэффициент пропорциональности,

r – радиус кривизны,

$\varepsilon$  - угол адвекции, остальные обозначения стандартные.

На основании этой формулы можно объяснить возникновение циклонов и антициклонов и их эволюцию.

Погосьяном и Таборовским была доказана единая природа циклонов и антициклонов.

Возникновение циклонов объясняется следующим образом. Все циклоны возникают на стационарных фронтах, поэтому в момент зарождения их изогипсы прямолинейны и проходят примерно параллельно фронту. Поскольку в этом случае  $H_{ns} = 0$ ,  $r = \infty$ , то кривизна и сходимость не могут быть причиной изменения давления. Изменение давления в начальный момент определяется сжатием и разрежением изогипс и характером адвекции. Величина и знак изменения давления характеризуется формулой:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = - K T_v H_{nn} \sin 2\varepsilon$$

Если вблизи какого-нибудь участка фронта имеет место сгущение изогипс в сторону высокого давления, и возникает адвекция холода, то здесь будет наблюдаться падение давления. Наибольшая величина его отмечается в зоне фронта.

Падение давления приводит к оформлению области пониженного давления, которую воздух стремится заполнить. Частицы начинают смещаться к центру этой области, но под действием силы Кориолиса отклоняются вправо - возникает циклоническая циркуляция. В результате циклонической циркуляции воздуха появляется волна на фронте.

Если условия, определяющие падение давления, будут сохраняться длительное время, то волна, будучи неустойчивой, разовьется в циклон. Если же условия изменятся и падение давления прекратится или сменится ростом, то волна постепенно исчезнет.

Таким образом, по адвективно-динамической теории сначала создаются условия для понижения давления, а волна на фронте появляется вследствие циклонической циркуляции в области пониженного давления. Углубление циклонов, развившихся их волн на фронте, имеет место до тех пор пока существуют условия, обеспечивающие падение давления.

По волновой теории, наоборот, сначала возникает волна на фронте, а затем, как следствие - область падения давления.

В этом и состоит коренное отличие адвективно-динамической теории от волновой.

Под фронтальной зоной в зависимости от направления сгущения и характера адвекции с одинаковой вероятностью может наблюдаться как рост, так и падение давления, следовательно, развитие циклонов и антициклонов также равновероятно. Только в случае роста давления и развития антициклона фронт у земли размывается вследствие дивергенции потоков. Волна на фронте не возникает.

Погосяном и Таборовским в соответствии с адвективно-динамической теорией изучены стадии развития циклонов и антициклонов по всей толще нижней тропосферы, т.е. дана пространственная структура барических образований на протяжении всей истории их существования.

## **Лекция 13, 14.**

### **Современная теория цикло - и антициклогенеза.**

Это вихревая теория и базируется она на вихре скорости. Обязательным условием образования замкнутых циклонов и антициклонов является неравномерность изменения давления, которое приводит к прогибу изобарических поверхностей, что математически характеризуется знаком и величиной лапласиана геопотенциала. В циклонах геопотенциал больше нуля, в антициклонах - меньше нуля. Анализ интенсивности адвекции в тылу и на периферийной части может дать возможность спрогнозировать эволюцию гребня тепла и ложбины холода. Изменение вихря скорости определяется: адвекцией вихря скорости на уровне  $P$ ; дивергенцией; изменением лапласиана и средней температуры между уровнями. Формула расчета является приближенной, так как не учтены сила трения, вертикальные токи и стратификация. Она предназначена только для качественной оценки. Вихревой фактор. в передней части высотной ложбины, где вдоль потока уменьшается циклоническая кривизна, адвекция вихря обуславливает циклогенез. Циклогенез в передней части увеличивается в случае расходимости изогипс циклонической кривизны. Под тыловой частью ложбин, где вдоль потока усиливается циклоническая кривизна, имеет место антициклогенез, и он усиливается в случае сходимости изогипс. Интенсивность цикло- и антициклогенеза очень сильно зависит от градиента геопотенциала. Наиболее интенсивно антициклоны и циклоны будут образовываться под высотной фронтальной зоной, где отмечаются наибольшие градиенты. При уменьшении широты вклад адвекции вихря увеличивается, а на экваторе где  $l=0$  рассуждение теряет смысл. Термический фактор влияет следующим образом. В термической ложбине холода изменения температуры будут больше нуля, а в гребне тепла - меньше нуля. Если усиливается со временем ложбина холода в поле  $OT$ , то при изменении температуры больше нуля наблюдается антициклогенез, при изменении температуры меньше нуля циклогенез. Вклад адвекции и дивергенции по знаку одинаков на любом уровне, а термический вклад различен на разных уровнях.

В процессе своего развития внетропический циклон претерпевает значительные качественные изменения, которые проявляются в структуре его термобарического поля и погодных условиях. Поэтому период развития циклона может быть разделен на ряд стадий. Переход из одной стадии в другую происходит постепенно, между ними нет четко выраженных границ. Определить такие границы тем более сложно, что отсутствуют возможности непрерывного слежения за циклоном, так как существующие системы наблюдений представляют собой дискретные данные.

Полный цикл развития циклона как фронтального, так и термического 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  $\cdot 5$  гПа. В определении второй временной границы, очевидно, существует определенная условность;

2) стадия углубления циклона или стадия молодого циклона - от момента появления первой замкнутой изобары на приземной синоптической карте до момента прекращения интенсивного углубления;

3) стадия максимального развития - давление в центре циклона изменяется незначительно;

4) стадия заполнения - от момента интенсивного роста давления в центре циклона до исчезновения замкнутой циклонической циркуляции.

В начальной стадии развития фронтального циклона на приземной линии фронта возникает волнообразный изгиб, связанный с возникновением на данном участке фронта замкнутой циклонической циркуляции. Давление вблизи вершины волны падает. Над передней частью волны находится слабо выраженный барический гребень в нижней тропосфере, а в тыловой части расположена неглубокая ложбина. Вершина волны находится под дельтой ВФЗ. Осевая линия сгущения изогипс на карте относительной топографии немного смещена относительно вершины волны в сторону холодного воздуха. В тыловой части волны, за холодным фронтом, появляется ложбина холода, а в передней - гребень тепла.

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 сектор циклона, где находится теплый воздух, то есть теплый сектор. Время существования молодого циклона обычно не превышает 1,5-2 суток.

Начало стадии максимального развития циклона совпадает с началом процесса окклюдирования. У поверхности Земли циклон уже очерчен большим числом замкнутых изобар. Он становится высоким барическим образованием. Угол наклона его высотной оси к горизонту увеличивается по сравнению со стадией молодого циклона. Гребень тепла на карте ОТ сужается, ось его совпадает с верхним фронтом. Тыловая ложбина холода на карте ОТ 500 на 1000 располагается ближе к центру циклона на приземной карте погоды

Дальнейшее окклюдирование циклона, приводящее к вытеснению теплого воздуха наверх и исчезновению раздельного существования теплого и холодного фронтов, сопровождается его заполнением. Эта последняя стадия эволюции циклона продолжается до исчезновения последней замкнутой изобары на приземной карте погоды.

Под **регенерацией циклона** понимают процесс углубления ранее заполнявшегося циклона или резкое увеличение интенсивности углубления медленно углублявшегося циклона. После регенерации циклон проходит такой же путь своей эволюции, как и вновь возникшее барическое образование, но на фоне более низкого давления. Основным процессом, обуславливающим регенерацию циклона, является вторжение в его тыл новой порции холодного воздуха, что приводит к повышению асимметрии температурного поля циклона и падению давления вблизи его центра.

В некоторых случаях процессы регенерации происходят неоднократно, что поддерживает длительное существование обширных малоподвижных циклонов, которые надолго нарушают доминирующий западный перенос, и поэтому их называют блокирующими или центральными.

Регенерировавший окклюдированный циклон имеет внешние признаки молодого, поскольку в нем имеется теплый сектор с характерными для него условиями погоды, но в отличие от молодого циклона он с самого начала является высоким барическим образованием. Oroграфические

неоднородности оказывают существенное влияние на возникновение, эволюцию и перемещение циклонов и антициклонов. Эффект этих влияний приводит к учащению случаев цикло - и антициклогенеза в районе горных хребтов, к изменению направления движения циклонов и антициклонов, замедлению их движения, а иногда и к полной задержке перемещения (для низких антициклонов). А также к деформации барических образований в связи с переваливанием через хребты, к образованию фронтальных волн, развивающихся в циклоны, и к некоторым другим процессам. Влияние горных хребтов на планетарное распределение областей цикло - и антициклогенеза сказывается в том, что в умеренных широтах циклогенез чаще происходит с подветренной стороны горных хребтов, а антициклогенез - с наветренной стороны.

Отсюда следует вывод, что влияние на возникновение, движение и эволюцию циклонов и антициклонов каждого горного хребта и других неровностей рельефа, по площади соизмеримых с этими барическими образованиями, сугубо индивидуально. Поэтому в каждом конкретном районе проводятся специальные исследования влияния орографии на атмосферные процессы синоптического масштаба и погоду, а результаты этих исследований используются при анализе и прогнозе синоптических процессов и погодных условий.

## **Лекция 15, 16.**

### **О факторах цикло – и антициклогенеза. Расчет изменения давления под отдельными участками ВФЗ.**

Изменение погоды в любом месте пространства в течение суток определяется тремя важными факторами. Во-первых, движением объектов - циклонов и антициклонов - и другими. Во-вторых, эволюцией всех сил этих объектов трансформации воздушных масс, в-третьих, возникновением новых вихрей и связанных с ними фронтов. Движение воздушной массы определяется потоками высотных фронтальных зон. Высотные фронтальные зоны - это зоны относительно однонаправленного движения больших воздушных масс в свободной атмосфере. В них сосредоточены огромные запасы кинетической энергии. Таким образом, высотную фронтальную зону следует уподобить огромной реке массы жидкости или газа, которая составляет 0,5 - 0,7% всей массы атмосферы. Обладая такой огромной массой, которая уносится этой рекой воздуха вместе со всеми его свойствами и процессами, в том числе и вихрями, которые прослеживаются до высоты 700 гПа, чем больше скорость потока, тем больший по объему вихрь способна унести высотная фронтальная зона. Масса воздуха прилегающая к земле в 7 - 8 раз меньше массы воздуха на высотной фронтальной зоне, а количество движения меньше на 1 - 2 порядка. Именно огромными запасами кинетической энергии высотной фронтальной зоны объясняется сохранение однотипных процессов и погоды в течение естественного синоптического периода. А смену процесса от одного периода к другому следует искать в факторах, обладающих потенциальной и внутренней энергией, соизмеримых с кинетической энергией фронтальной зоны. В Чикаго были проведены опыты. Было рассмотрено вращение сосуда с водой, стенки которого нагревались, а в центр был помещен холодильник. В результате было сформирована циркуляция в виде квазистационарной горизонтальной волны, напоминающей волны Россби. Амплитуда и период волны зависит от контраста температур и скорости вращения сосудов. На поверхности земли средняя разность температур воздуха между полюсом и экватором изменяется от 61,2 до 25,3 градусов летом. Этим объясняются различия в положении и интенсивности высотных фронтальных зон зимой и летом.

Второй фактор это изменение угловой скорости вращения Земли. Изменение формы высотной фронтальной зоны, ее положения от одного дня в другом есть следствие мелких колебаний угловой скорости и температуры. Изменение температуры зависит от притока солнечной энергии и от преобразования ее в атмосфере. Прогноз формы фронтальной зоны возможен при прогнозе угловой скорости вращения Земли и прогнозе изменения температуры от экватора к полюсам. Эта задача решается с помощью методов долгосрочного прогноза погоды. Основным вопросом, который рассматривают прогнозисты краткосрочных прогнозов погоды, является вопрос об эволюции существующих вихрей и о возникновении новых. Если поток течет в одном направлении с достаточно большой скоростью, то выше и ниже его могут образоваться вихри с циклоническим и

антициклоническим вращением. Поэтому основной задачей синоптиков является расчет изменения давления под отдельными участками высотной фронтальной зоны внутри воздушной массы, а не в локальной точке пространства. С помощью уравнения движения, которое отражает закон сохранения количества движения, можно получить критерий для оценки перемещения вихрей, фронтов и воздушных масс. Эволюция может быть учтена только при использовании закона сохранения массы и энергии. Решение задач будет состоять из двух частей: смещение всей погоды и процессов в соответствии с потоками высотной фронтальной зоны. Это первое приближение к прогнозу. Вторая часть прогноза - это расчет эволюции процесса. Он связан с эволюцией давления и трансформацией воздушной массы. Учет трансформации ведется на основе использования эмпирических соотношений. Формула расчета имеет вид:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\epsilon R}{Cv} - \epsilon \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \epsilon P \frac{\partial w}{\partial z}$$

Таким образом, изменение давления в движущейся массе воздуха определяется влиянием трех факторов: 1- притоком тепла. 2- плоской дивергенцией. 3- изменением вертикальной скорости с высотой. При дивергенции воздуха, большей нуля, давление падает. Падение тем больше, чем ниже уровень. При изменении вертикальной скорости с высотой, большим нуля, давление также падает. При положительной скорости изменении тепла, когда происходит приток тепла, давление в индивидуальной частице растет. Так можно рассчитывать изменение давления в движущейся массе воздуха.

Уравнение изменения давления в индивидуальной частице можно использовать и для расчета изменения давления в локальной точке пространства.

Приведенная формула дает возможность рассчитать эту характеристику:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\epsilon R}{Cv} - \epsilon \frac{\partial w}{\partial z} - \epsilon \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - w \frac{\partial P}{\partial z} - \left( u \frac{\partial P}{\partial x} + v \frac{\partial P}{\partial y} \right)$$

Полученное поле после расчета частной производной и суммировании ее с величиной давления у земли переносится вдоль потока во фронтальной зоне на фронте. После оценки порядка каждого из слагаемых уравнения в соответствии с таблицей Юдина можно сделать вывод о том, что наибольший вклад вносит дивергенция в трехмерном пространстве, то есть суммарный отток и приток массы воздуха в горизонтальном и вертикальном сечении атмосферы над данной точкой. При прогнозе давления на станции необходимо найти метод оценки средней по высоте дивергенции масс воздуха, которая должна суммироваться с адвекцией, с изменением давления по высоте, с притоком тепла. Горизонтальная дивергенция в натуральной системе координат определяется изменением модуля скорости вдоль линий тока и сходимостью либо расходимостью линий тока. Натуральная система координат - это ортогональная, криволинейная система отсчета, в которой координатными линиями являются линии тока и нормали к ним. Натуральная правая система координат это система координат, в которой кратчайший поворот от положения направления линии тока к положению направления нормали проходит против часовой стрелки. Угол бета между осью x в декартовой системе координат и касательной к линии тока отсчитывается против часовой стрелки, характеризует направление ветра и меняется от точки к точке с течением времени. Имеется формула, которая характеризует поворот линий тока на единицу длины ее дуги и кривизну нормалей линий тока, которая характеризует поворот нормалей линий тока на единицу длины дуги этих нормалей. При положительной циклонической кривизне нормалей линии тока расходятся по течению, а при отрицательной антициклонической кривизне нормалей линии тока расходятся по течению.

Кривизна траекторий Kt-это поворот пути частицы, рассчитанный на единицу пройденного расстояния. Определяется этот поворот из выражения полной производной по времени как производной сложной функции. Формула расчета в натуральной системе координат горизонтальной дивергенции определяет изменение модуля скорости вдоль линий тока и сходимостью или расходимостью линий тока. Для этого на стандартных уровнях 700 500 300 200 гПа необходимо рассчитать геопотенциал, начиная со входа во фронтальную зону и кончая дельтой высотной фронтальной зоны. Шаг следует брать 300 км. Над каждой точкой высотной фронтальной зоны

подсчитывается среднее по высоте значение геопотенциала. После этого подсчитывается среднее значение в зоне входа и в зоне дельты. Если в центральной части высотной фронтальной зоны наблюдается падение давления, то под высотной фронтальной зоной воздух начинает разряжаться. После этого сверху и снизу наблюдается подток воздуха. Причем внизу он в 10 раз больше, чем сверху. Тогда под зоной разряжения наблюдаются восходящие токи, которые под действием силы Кориолиса в этой части вызывают циклонический вихрь. Помимо этого имеет место отсечение глубоких ложбин. Причем при возрастании градиента температур между экватором и полюсом происходит увеличение амплитуды волн Россби, и при некоторых критических значениях происходит отсечение циклонических вихрей в ложбинах и антициклонических - в гребнях.

## **Лекция 17, 18.**

### **Местоположение полярного фронта и полярно-фронтального струйного течения. Предистория развития идей, на которых построена теория полярного фронта**

Анализ синоптических карт показал, что характерным свойством атмосферы является существование границ между воздушными массами. В 1928 году в метеорологии было предложено деление воздуха на арктический и полярный. Также были названы и фронты. Полярный фронт регулярно связан с полярно-фронтальным струйным течением в верхней тропосфере и, по мнению многих ученых, с разрывом тропопаузы или с узкой областью нечетко выраженной тропопаузы. Таким образом, полярно- фронтальное струйное течение и специфическая структура тропосферы в его области характеризуется границей между воздушными массами и на высоте. В средней тропосфере струйные течения характеризуются ярко выраженной бароклинностью. Арктический фронт прослеживается четко в определенных районах северного полушария. Однако он проявляется большей частью как граница между воздушными массами на малых высотах и находится под сильным влиянием распределения снега на материке. Различие между арктическим воздухом и континентальным полярным, который имеет иногда такую же температуру, как и арктический, трудно обосновать. Также труднее провести деление между арктическим и полярным воздухом в верхних слоях тропосферы, так как их температуры бывают равными.

В своей работе Бьеркнес и Сульберг указывали, что полярный фронт не следует рассматривать как планетарное явление в том смысле, что он не огибает земной шар непрерывно и существуют разрывы на этом фронте. Если бы он был непрерывным, то меридиональный обмен был бы невозможен. Существуют районы, где наблюдаются явно выраженные разрывы фронтов. Позднее по аэрологическим данным было выявлено, что полярный фронт в свободной атмосфере имеет характерную гипербароклинную структуру со значительным наклоном. Полярный фронт на АТ-500 расположен в полосе изотерм (-24)- (- 34) градуса зимой и (- 14)- (-20) градусов летом. С южной стороны изотермы имеют волновой характер со значительной меридиональной бароклинностью. А с севера изотермы принимают вид замкнутых областей холодного и теплого воздуха. Такие различия возникают, если фронт отделяет зону атмосферы, где на сильное западное течение налагаются возмущения от более северной зоны. Фронт располагается в среднем вдоль 48 градуса с.ш.с максимальным отклонением к югу до 30 градуса с.ш. В редких случаях полярный фронт может смещаться на север до самого Северного полюса. Но на поверхности 500 гПа он очень редко смещается на юг далее 30 градуса с.ш. По аналогии должно существовать субтропическое струйное течение и субтропический фронт.

Впервые струйное течение в субтропических широтах обнаружено Немайесом и Клаппом. Субтропическое струйное течение, которое в типичных случаях достигает максимума на поверхности 200 гектопаскалей, характеризуется сильным вертикальным сдвигом ветра. На высоте 500 гПа оно с трудом различимо. Выше этого уровня бароклинная зона, которая соответствует сильному вертикальному сдвигу ветра, в среднем выражена лучше в районах с максимальной скоростью ветра.

## Лекция 19, 20.

### Теория полярного фронта. Семейство циклонов и их связь с ОЦА.

Бергерон в 1959 году говорил, что успехи в анализе и прогнозе погоды определяются тремя факторами: 1- совершенствованием наблюдений, 2- совершенствованием теории, 3- совершенствованием моделей. Самый важный принцип высказал Бьеркнес. Он заключается в том, что, если удалось описать составляющие погоды достаточно точно в начальный момент времени, то можно дать прогноз будущего состояния погоды на основе уравнений гидротермодинамики. Для введения этого тезиса в практику потребовалось бы более точное описание атмосферной циркуляции для того, чтобы на его основе создать точные модели. Для разработки модели необходимо было сначала усовершенствовать методы наблюдений, что и было сделано в 40- 60 годы. Затем была разработана модель циклона, которая была основана она на не очень полных данных. В 1922 году модель циклона была разработана Я.Бьеркнесом, которая в дальнейшем им была усовершенствована и получены значимые выводы. Они заключались в том, что внетропические циклоны, образовавшиеся на фронтальной поверхности, где основной контраст температур между воздушными массами концентрируется на поверхности разрыва его температуры и плотности, располагаются у поверхности разрыва, т.е. поверхности разрыва являются источником возникновения циклонов и антициклонов. Маргулес еще раньше показал, что во вращающейся системе отсчета поверхность разрывов существует и имеет наклон горизонтальной поверхности при циклоническом сдвиге ветра поперек поверхности разрыва. По теории Гельмгольца следует, что возмущения в этой зоне приобретают неустойчивость и превращаются в вихри, таким образом поверхности разрыва связывались с фронтами. Вышесказанное относится к холодному фронту, наиболее детальное описание которого дали в 1910 году Корлес и Лемпферт. Линию фронта они назвали «линейным фронтом» или «линией шквалов». По модели Бьеркнеса и Сульберга циклон ограничен теплым фронтом спереди и холодным фронтом в тылу. Из наблюдений за облаками и осадками они пришли к выводу, что облачная система теплого фронта связана с наклоном фронтальной поверхности. Теплый влажный воздух восходит по наклонной поверхности. В результате образуется обширная облачная система. У холодного фронта воздух верхних слоев имеет составляющую скорости ветра, направленную вниз, что приводит к быстрому прояснению погоды. Непосредственно перед холодным фронтом имеется узкая полоса осадков, так как фронт обгоняет теплый влажный воздух, который в нижних слоях поднимается. В начале развития циклон выглядит как малое возмущения на квазистационарном фронте. С появлением малой начальной волны теплый воздух продвигается в сторону холодного. Под действием силы Кориолиса образуются замкнутые изобары, и давление падает у гребня волны. Наступление холодного фронта и отступление теплого обуславливает продвижение фронтальной волны в направлении общего высотного переноса. Амплитуда первоначально малого возмущения увеличивается. Давление в центре падает, циркуляция вокруг центра продолжает усиливаться. Холодный фронт движется быстрее теплого и в конце концов холодный фронт догоняет теплый, и теплый воздух полностью вытесняется от земной поверхности. Они смыкаются и образуется фронт окклюзии, разделяющий две холодные воздушные массы с различными свойствами. В дальнейшем смыкание холодного фронта с теплым распространяется все дальше от центра циклона. Протяженность фронта окклюзии увеличивается, возрастают размеры циклона, который трансформируется в обширный холодный вихрь в нижней тропосфере при сохранении теплого воздуха в верхних слоях. Весь процесс завершается тогда, когда циклон становится более или менее баротропным вихрем, потерявшим свой фронтальный характер. Затем он под воздействием трения заполняется. Кинетическая энергия циклона может возрастать до тех пор, пока существует фронтальный контраст между воздушными массами. Когда циклон становится окклюдированным, прекращается его развитие. Это рассматривается как результат отсутствия доступной потенциальной энергии.

В 1922 году обнаружено, что циклоны выходят на западное побережье Европы сериями в очень быстрой последовательности и структура каждого циклона меняется в зависимости от того, какое место он занимает в этой серии. Таким образом, циклоны при движении организуются в семейства. Индивидуальные циклоны, образующиеся на полярном фронте, отделяют воздушные массы полярного происхождения от субтропических и тропических воздушных масс, которые движутся в северо-восточном направлении. Первый циклон в серии распространяется дальше к

востоку, являясь наиболее зрелым или окклюдированным. Находящийся на юго-западе циклон является наиболее молодым. После прохождения семейства циклонов наступает продолжительный период северных ветров при сравнительно слабой циклонической деятельности. А затем начинается прохождение нового семейства циклонов. Семейства циклонов и их отдельные его члены рассматриваются как механизм меридионального обмена. Теоретически можно представить себе различные процессы теплообмена между тропическим и полярными широтами, которые необходимы для выравнивания радиационного баланса, положительного в низких и отрицательного в высоких широтах. Самая простая модель обмена - это простая меридиональная циркуляция, при которой у полюса опускается холодный воздух, который затем переносится к экватору, нагревается и поднимается в низких широтах и переносится к полюсу. Однако Бьеркнес и др. теоретически доказали, что такая схема не применима для высоких широт, так как в результате вращения Земли будут возникать чрезвычайно большие зональные скорости. В низких широтах, где отклонение обусловленное вращением Земли невелико, возникают такие простые типы циркуляции, как пассаты в нижних слоях атмосферы и антипассаты в верхних. Бьеркнес и Сульберг для высокоширотной циркуляции предложили следующую схему. Меридиональные движения осуществляются в широких языках теплого воздуха, перемещающегося к полюсу, и холодного воздуха, перемещающегося к экватору по спиралевидной траектории. Каждое течение стремится отклониться вправо под действием силы Кориолиса. Это отклонение должно привести к накоплению воздуха и образованию повышения давления в зонах между правыми флангами течения и к разряжению воздуха и образованию низкого давления между левыми составляющими течения. Зональный барический градиент препятствует возникновению сильных западных и восточных ветров. Таким образом система циркуляции принимает форму южных и северных течений, чередуясь друг с другом по спиралевидной траектории, с помощью которой они проникают далеко к полюсу и экватору. Семейство циклонов это пограничное явление между левым флангом полярного течения и прилегающим к нему тропическим течением. Только в областях между последним членом семейства циклонов и антициклонов, отделенным от следующего семейства, происходит проникновение полярного воздуха в пассаты субтропических широт. Полярно-фронтальная теория была построена на анализе приземных карт по виду облаков и гидрометеоров, которая впоследствии была подтверждена аэрологическими наблюдениями.

## **Лекция 21, 22.**

### **Преобразования энергии в процессах цикло-и антициклогенеза.**

Циклоны и антициклоны обладают огромным запасом кинетической энергии, поэтому возникает вопрос об источнике этой энергии. Основные виды энергии в атмосфере следующие: кинетическая, потенциальная и внутренняя энергии, а также энергия турбулентных пульсаций. Потенциальная и внутренняя энергии в сумме составляют лабильную энергию. Существуют приток и отток энергии из основных барических систем. Кинетическая энергия может возникать из потенциальной и внутренней энергий. Также она может рассеиваться за счет турбулентных движений. В атмосфере кинетическая энергия упорядоченных движений переходит в тепло под действием внутреннего турбулентного трения. А кинетическая энергия среднего зонального течения переходит в кинетическую энергию турбулентных пульсаций более мелкого масштаба. Процесс идет до тех пор, пока она не переходит в тепловую. Внутренняя энергия определяется тепловыми свойствами частицы воздуха. Потенциальная - высотой уровня в поле силы тяжести. Кинетическая - скоростью движения. Помимо этого рассматривают энергию фазовых превращений воды в атмосфере. Рассмотрим опыт, иллюстрирующий переход потенциальной энергии в кинетическую. В первом варианте представим, что две воздушные массы находятся в некотором замкнутом объеме и разделены вертикальной перегородкой. Причем первая воздушная масса имеет температуру меньше, чем вторая. Если убрать перегородку, то над более холодной воздушной массой будет располагаться более теплая. Общий центр тяжести понизится и изменится температура воздушных масс.

Во втором варианте воздушные массы были разделены горизонтальной перегородкой так, что более теплая находилась внизу, а более холодная - наверху. Если убрать перегородку, то воздушные

массы поменяются местами. В реальной атмосфере такие схемы можно сравнить с перемещением фронтов и перемещением слоев при конвективных движениях в неустойчивой атмосфере. Источником кинетической энергии циклонов и антициклонов могут быть потенциальная и внутренняя энергия воздушных масс, высвобожденная в связи со смещением фронтальных поверхностей и при развитии конвективных движений. Вертикальное смещение воздушных масс в крупномасштабном процессе можно рассматривать как механизм перераспределения воздушных слоев и взаимного преобразования потенциальной и кинетической энергии. Помимо этого необходимо учитывать перераспределение кинетической энергии высотных фронтальных зон в вихревую энергию циклонического или антициклонического движения. Помимо этого накопление кинетической энергии связывают с бароклинностью струйных течений, если в центре углубляющегося циклона происходит уменьшение средней по площади доступной потенциальной энергии и в ближайшие сутки циклон заполняется. Доступная потенциальная энергия - это та часть потенциальной энергии, которая может перейти в кинетическую в адиабатически замкнутой системе. Это разность между потенциальной энергией рассмотренной системы и той частью потенциальной энергии, которая соответствует наиболее устойчивому состоянию системы после распределения массы. Наиболее значительное убывание кинетической энергии наблюдается в верхней тропосфере, а в нижней она резко возрастает. Эффективная потенциальная доступная энергия определяется температурным контрастом и устойчивостью воздушной массы. В процессе развития циклона изменяется также эффективная потенциальная энергия. От стадии волны она заметно возрастает. За сутки до начала заполнения она начинает падать, и падение прекращается с начала заполнения циклона, когда кинетическая энергия начинает убывать. Возникновение внетропических циклонов и антициклонов тесно связано с высотными фронтальными зонами и струйными течениями, которые являются источниками больших запасов кинетической энергии.

#### **Лекция 23, 24.**

#### **Преобразование энергии в системе циклон-и антициклон по Борисенкову – Сакурабе. Высотная дивергенция и начало развития нижнего циклона.**

На земном шаре перенос кинетической энергии является в то же время переносом количества движения. Циклоны и антициклоны являются не замкнутыми энергетическими системами. Основное отличие атмосферы с барическими системами от атмосферы, обладающей только зональным потоком, состоит в том, что в первой системе происходит перераспределение потенциальной энергии между широтами и долготами. Сакураба показал, что энергетически замкнутая система бывает лишь тогда, когда циклон и антициклон рассматриваются вместе. В исследованиях Е.П.Борисенкова и Сакурабы показано, что преобразование энергии в циклонах и антициклонах происходит в различном направлении и факторы, которые приводят к понижению кинетической энергии в одной системе, обеспечивают ее увеличение в другой. То же самое происходит и с потенциальной энергией. По мнению этих ученых в обоих случаях решающим является поток потенциальной энергии для циклонов. Для циклонов характерны восходящие движения, которые на высоте усиливаются и усиливают циклоническую циркуляцию. Они приводят к оттоку потенциальной энергии к антициклону. Потенциальная энергия практически отдается антициклону. Ее приток в антициклоне усиливает антициклоническую циркуляцию и нисходящие движения. В антициклоне происходит увеличение внутренней энергии за счет адиабатического сжатия при опускании и перетекания в циклон. В циклоне происходит потеря внутренней энергии за счет ее расходования во время работы, производимой в результате подъема в поле силы тяжести. В циклон из антициклона устремляется поток внутренней и скрытой энергии, полученной в результате конденсации. Таким образом, антициклон является источником энергии. Перераспределение потенциальной энергии из циклона в антициклон тем больше, чем больше массы переносится на высотах, кроме этого перераспределение массы воздуха может происходить также под воздействием космических лучей. Развитие циклонов, связанных со струйными течениями, происходит при условии выноса в районы интенсивного циклогенеза внутренней и скрытой энергии и одновременного оттока из этих районов потенциальной энергии. Средний

зональный перенос во внетропических широтах сохраняется за счет переноса вихрями зональной кинетической энергии через субтропические широты к полюсу.

Во всех теориях малых возмущений предполагается, что атмосферное возмущение черпает свою кинетическую энергию из освобождающейся доступной потенциальной энергии, которая обуславливает контраст температур на фронте между воздушными массами. Тропические циклоны генерируют доступную потенциальную энергию из вертикальной циркуляции. Внетропические циклоны - из бароклинности основного зонального течения. Кинетическая энергия преобразуется из кинетической энергии основного течения, из потенциальной энергии или из той и другой видов энергии. Выводы из бароклинной теории неустойчивости следующие:

1 - развитие возмущений зависит от длины волны; возмущение с длиной волны меньше определенного критического значения не будет развиваться даже при наличии вертикального сдвига;

2 - росту возмущения благоприятствуют волны определенной длины: от двух с половиной тысяч километров до 500 километров; наибольшая длина волны, при которой волны остаются устойчивыми, возрастает с уменьшением широты;

3 - скорость увеличения интенсивности при длине волны, соответствующей максимальной устойчивости, примерно пропорциональна энергии вертикального сдвига;

4 - при больших длинах волн скорость интенсификации требует увеличения вертикального сдвига с возрастанием длины волны;

5 - малая статистическая устойчивость и сильный вертикальный сдвиг благоприятствуют отклонению ветра от геострофического.

Существует общий бездивергентный уровень, то есть уровень, на котором дивергенция равна нулю. Этот уровень характеризуется почти полной компенсацией противоположных знаков выше и ниже этого уровня ( дивергенции и конвергенции). Развитие и сохранение циклона требует наличия над циклоном области высотной дивергенции, которая на карте наблюдаются с восточной стороны ложбины в верхней тропосфере. Интенсивность этой дивергенции зависит от длины волны, амплитуды и скорости ветра, которая зависит от степени бароклинности атмосферы. Высотная дивергенция и конвергенция имеют максимум вблизи струйного течения. Таким образом, циклоны и антициклоны нижней тропосферы с более или менее значительной интенсивностью и с типичным для области существованием конвергенции и дивергенции связаны с бароклинностью зоны струйного течения. Причина того, что максимальная скорость развития циклонов наблюдается в то время, когда высотная дивергенция накладывается на фронтальную ложбину, состоит в том, что воздушный вихрь под воздействием дивергенции пропорционален самой завихренности или предшествует циркуляции, которая имеет циклонический характер на любом приземном фронте. Последовательность процессов при продвижении высотной ложбины относительно приземного фронта можно описать следующим образом. Когда высотная ложбина находится далеко в тылу, то зона адвекции вихря -тоже далеко в тылу. Тенденция к развитию циклона под высотной областью усиления адвекции вихря препятствуют как распределение горизонтального адвективного понижения температуры, так и влияние вынужденных вертикальных движений. Когда высотная ложбина займет такое положение ,что усиление вихря будет над приземным фронтом, распределение термической адвекции окажется благоприятным для развития циклона, хотя распределение вертикальных движений в этой стадии остается не благоприятным. Однако это тормозящее влияние будет в значительной мере ослабляться эффектами конденсационного нагревания, как только оно начнется.

По мере приближения высотной холодной ложбины и распределения вихря к фронтальной зоне нарушается равновесие, что приводит к конвергенции на нижних уровнях. Эта последовательность процессов связана с полем дивергенции в верхней тропосфере. Благодаря особенностям термической структуры экстремальные значения вихря наблюдаются не в средней, а в верхней тропосфере и, так как скорость ветра с высотой растет. Можно утверждать, что область адвекции положительного вихря на бездивергентном уровне, которая связана с развитием завихренности на уровне моря, также близко совпадает с областью верхнетропосферной дивергенции или восходящего движения в тропосфере.

## Лекция 25, 26.

### **Эволюция термического поля и ограничивающие процессы. Развитие циклонов при изменении планетарных волн.**

Когда циклоническая циркуляция достигает значительной интенсивности, поле высотных изогипс деформируется, амплитуда высотных изогипс увеличивается, адвекция вихря усиливается. Циклон начинает интенсивно развиваться. Этот процесс Сатклифф и Форсдаик назвали «саморазвитием». Его можно рассматривать как прогрессивную деформацию высотного течения в окрестности приземного циклона. Роль горизонтальной адвекции заключается в том, что она способствует деформации изотерм и высотных течений. Возрастание амплитуды высотных волн соответствует увеличению изменений завихренности, выражаемой кривизной, вдоль течения. Это в свою очередь означает возрастание высотной дивергенции, способствующее прогрессивному возрастанию конвергенции на нижних уровнях, и интенсификации циклона. Наблюдения показывают, что после некоторого усиления деформации процесс прекращается, и поле относительного геопотенциала в циклоне далее не деформируется. Затем увеличивается тормозящее влияние статической устойчивости и влияние горизонтальной адвекции уравнивается противоположным влиянием вертикального движения. Таким образом, процесс «саморазвития» вызывает появление процесса «самоограничения», препятствующего беспредельному развитию. Если в циклоне есть обширная область конденсации, то тормозящий член уравнения при заданном вертикальном движении будет меньше. Таким образом, «саморазвитие» может продолжаться дальше и циклон может достичь большей интенсивности, чем при отсутствии осадков.

Образование основного циклона связано с изменениями системы длинных волн. Это происходит при появлении новой главной волны в верхнетропосферном западном переносе. Первый признак появляется тогда, когда вторичная холодная ложбина появляется к западу от главной ложбины над восточными районами Тихого океана. Затем вторичная ложбина углубляется и происходит появление новой главной ложбины западнее положения старой главной ложбины. Этот процесс называют процессом разрывного обратного движения. После этого происходит возрастание волнового числа над полушарием от 4 до 5. На уровне моря над Тихим океаном образуется антициклон. В области вторичной ложбины возрастает адвекция холода. Очень холодный воздух располагается к северу от нее и ложбина интенсивно углубляется и через некоторый промежуток времени характеризуется значительной адвекцией вихря, которая указывает на высотную дивергенцию на восточной ее стороне. Сильная высотная дивергенция располагается над областью, где адвекция холода была наиболее выражена на нижних уровнях. Затем наибольшая адвекция вихря на высотах переместилась непосредственно к холодному фронту у земли, расположилась над ним и циклон начал интенсивно развиваться. В этом месте у земли наблюдалось быстрое падение давления и образовался новый циклон. То есть произошло приспособление системы высотных волн к приземным процессам. Возрастание адвекции вихря приводит к усилению высотной дивергенции ниже по течению относительно ложбины. Эту систему впервые обнаружил Шерхаг в 1937 году. Однако Польстер в 1960 г. установил, что хотя начальное образование волны происходило в одной пятой части всех случаев под высотной ложбиной, ее углубление под такой ложбиной наблюдалось редко. В противоположность этому в 73% всех случаев углубление циклонов наблюдалось под областью расходимости изогипс преимущественно перед высотными ложбинами, а в большей части остальных случаев – под параллельным высотным течением.

## Лекция 27, 28.

### **«Взрывной» циклогенез.**

Внетропический циклогенез происходит на атмосферных фронтах. Фронтальные волны делятся на устойчивые, которые не превращаются в циклоны, и неустойчивые, которые дают начало образованию циклонов. Малая статическая устойчивость и сильный вертикальный сдвиг ветра благоприятны для отклонений ветра от геострофического. Следовательно, возникает благоприятная

для неустойчивости длина волны, совпадающая с размерами синоптических возмущений. Наблюдается сильная бароклинность, которая является основной характеристикой развивающихся полярнофронтовых циклонов. Устойчивые волны не превращаются в циклоны, а неустойчивые дают начало образованию циклонов. Промежуток времени, необходимый для превращения фронтальной волны в циклон, меняется в широких пределах: от 2 - 3 до 50 -60 часов. Если циклон оформляется менее, чем за 12 часов, то процесс его образования называют «взрывным» циклогенезом. Хотя результатом этого процесса является образование нормального циклона синоптического масштаба, сам процесс носит разряд мезомасштабного из-за весьма короткого времени в течение которого он протекает. Известно четыре разновидности взрывного циклогенеза: 1 - вхождение циклона в зону холодного фронта; 2 - переворачивание горизонтальных вихревых трубок; 3 - ускорение фронтального циклогенеза; 4 - циклогенез у точки окклюзии. В первом случае мезомасштабный вихрь, возникший в тылу циклона, по ведущему потоку смещается к холодному фронту; если скорость мезоциклона больше скорости холодного фронта, то циклон подойдет к фронту через очень короткий промежуток времени. Это создает ситуацию «взрывного циклогенеза», так как объединяет два важнейших фактора внетропического циклогенеза: это наличие значительной циклонической завихренности и бароклинности потока. Во втором случае вихри с горизонтальной осью возникают под воздействием вертикальных сдвигов ветра. Горизонтальный градиент вертикальной скорости обуславливает их переворачивание. Если на подветренной стороне гор возникает такая ситуация, то это будет способствовать «взрывному» циклогенезу. В третьем случае при ускорении обычного фронтального циклогенеза возможен «взрывной» циклогенез. Ускоренный процесс происходит в том случае, когда все составляющие циклогенеза действуют в одном направлении. Численные значения параметров компонентов циклогенеза оказываются наиболее высокими. Основными условиями, влияющими на скорость циклогенеза, являются: динамическая неустойчивость, спиралевидность атмосферных движений, длина волны Россби, под восходящей ветвью которой развивается циклон. В четвертом случае циклогенез у точки окклюзии представляет собой регенерацию заполняющегося циклона. Скорость регенерации в первую очередь зависит от бароклинности потока. Если над точкой окклюзии восстанавливается бароклинность, потерянная в процессе эволюции старого циклона, регенерации происходит обязательно вновь. Возникший циклон обычно достигает зрелости через 12- 18 часов.

Таким образом, после образования неустойчивости и наличия бароклинности развитие циклона происходит в тех случаях и в тех местах, где область высотной адвекции положительной завихренности налагается на нижнюю бароклинную зону, вдоль которой наблюдается непрерывная термическая адвекция. Когда высотная ложбина займет такое положение, что усиление вихря будет наблюдаться над приземным фронтом, распределение термической адвекции должно быть благоприятным для развития циклона.

## **Лекция 29, 30.**

### **Погода, связанная с синоптическими возмущениями.**

Синоптикам хорошо известно, что синоптические возмущения (циклоны и антициклоны) даже со сходными системами воздушных течений могут характеризоваться различным распределением погоды. Существуют модели, связывающие распределение облачности и осадков с различными типами циркуляционных систем. В каждом конкретном случае нужно учитывать отклонения от общей модели, например, колебания влагосодержания и устойчивости стратификации воздушных масс циркуляционной системы. Но существуют общие аспекты, касающиеся облачности и осадков, связанные с фронтами и синоптическими возмущениями. Общее распределение погоды в циклоне и его структура было дано представителями Бергенской школы. Они определили основные особенности распределения погоды в окклюдированном циклоне. Поле облачности молодого циклона представляет собой облачный вихрь, имеющий две спирали облаков, сходящиеся в одной точке, которая соответствует холодному и теплому фронтам. Центр облачного вихря совпадает с центром циклона на высоте 3 км. Границы облачного вихря совпадают с положением последней замкнутой изобары на приземной карте. В передней части циклона погода определяется влиянием теплого фронта. В тылу погода определяется влиянием холодного воздуха. Если холодный фронт

смещается медленно и его облачная система является зеркальным отображением облачной системы теплого фронта, то в этой части холодного сектора выпадут обложные осадки. Они будут ослабевать по мере удаления от фронта. Если холодный фронт смещается быстро, то при высокой влажности и большой неустойчивости выпадают ливневые осадки и бывают грозы. Они наиболее интенсивны над сушей днем, а над морем – ночью. В теплом секторе обычно воздух устойчивый и влажный. Начало стадии максимального развития совпадает с началом окклюзии. На этой стадии облачная система приобретает спиралевидную форму. Имеются безоблачные полосы. В циклонах максимального развития можно выделить несколько зон с различными условиями погоды. Эти зоны разделяются фронтом окклюзии. Дальнейшее окклюдирование циклона приводит к вытеснению теплого воздуха наверх и к исчезновению теплого и холодного фронтов. Это стадия эволюции продлится до исчезновения последней замкнутой изобары. Время существования циклона с момента начала окклюдирования до заполнения составляет 3- 4 суток. Заполняющийся циклон состоит из однородной холодной воздушной массы без фронтальных разделов. В окклюдирующем циклоне между фронтом окклюзии и одним из вторичных фронтов возникает вторичный теплый сектор. Процесс может повториться, но более слабо. Перемещаясь по воздушным течениям циклоны образуют серии. Первым в серии является наиболее старый окклюдированный циклон, последний - наиболее молодой. Циклоны одной серии разделены промежуточными антициклонами или гребнями. Серия заканчивается вторжением в тылу последнего циклона холодного воздуха, оформленного в виде заключительного антициклона.