

ГЛАВА УП

ЦИКЛОНЫ И АНТИЦИКЛОНЫ

§ I. Классификация циклонов

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

Фронтальные циклоны — это вихри очень большого масштаба, развивающиеся из неустойчивых волн на поверхности фронтов. Они имеют значительные скорости смещения и с ними связаны разнообразные условия погоды. Анализ условий возникновения, развития, движения и затухания фронтальных циклонов является наиболее сложной задачей синоптической метеорологии.

Внутри однородных масс циклоны развиваются в результате сильного прогрева воздуха над ограниченной территорией. Прогрев воздуха приводит к уменьшению его плотности и увеличению барической ступени. Последнее является причиной формирования области повышенного давления на высоте и дивергенции масс от района прогрева. Высотная дивергенция приводит к формированию области низкого давления у земли. Эти области пониженного давления иногда называют термическими депрессиями. Термические депрессии — малоподвижные барические образования, в них наблюдается ясная, тихая, жаркая погода. Прогноз погоды внутри таких образований особых трудностей не вызывает.

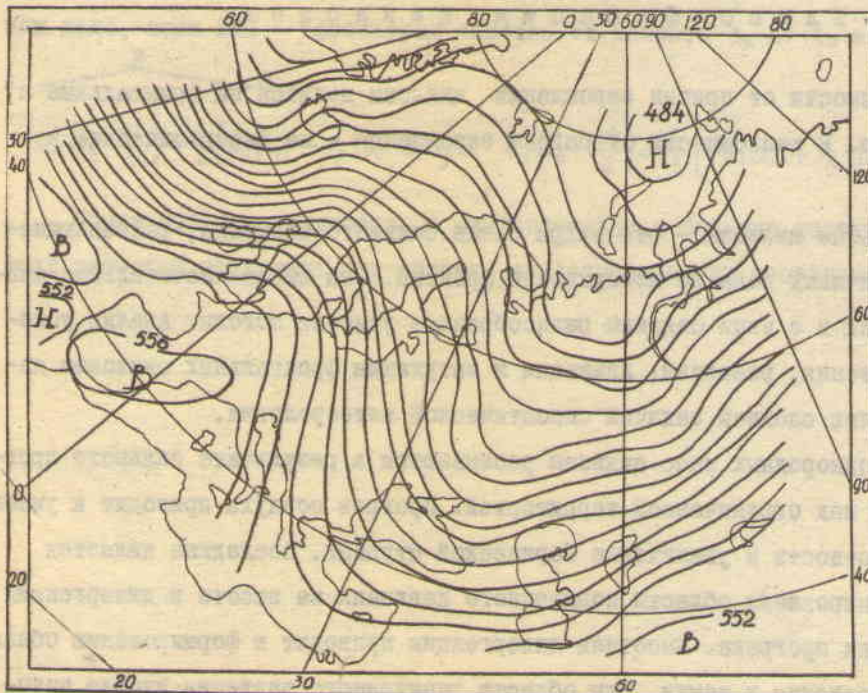
Примером внутримассовых образований может служить Среднеазиатская термическая депрессия, развивающаяся в летнее время. Иногда в это время года депрессия формируется и над южными районами Казахстана.

Формирование приземных циклонов возможно также за счет падения давления, вызванного разворотом высотных гребней. Такие циклоны, возникая в более или менее однородной массе, постепенно втягивают в свой тыл холодные массы с севера, ^а в переднюю часть — теплые массы с юга. При достаточном контрасте температуры, таким образом, могут возникать вторичные фронты и теплые сектора.

Фронтальные циклоны, обуславливающие погоду ЕТС, Западной Сибири и Казахстана, можно разделить на три типа: западные (или их чаще называют атлантическими), южные и ныряющие.

Западные или атлантические циклоны зарождаются на арктическом и полярном фронтах, на севере и в центральной части Атлантического океана (в районах: пролив Девиса, Исландия, Север Великобритании и несколько южнее) и затем смещаются на восток.

Возникновение и развитие этих циклонов происходит под высотной фронтальной зоной, ориентированной с запада на восток по северным и средним широтам Атлантики и Евразийского континента.



Ось гребня высокого давления довольно часто бывает ориентирована с юга Франции на Шпицберген. Западнее гребня располагается ложбина низкого давления.

Рис. I

В передней

части ложбины и тыловой части гребня имеет место адвекция тепла. Поэтому вихревой и термический фактор вызывают падение давления, что, при наличии больших контрастов средней температуры, приводит к развитию циклона и смещению его в направлении потоков высотной фронтальной зоны (рис. I).

Траектории западных циклонов образуют хорошо выраженные пучки, оси которых показывают среднее положение траектории. Имеется три ярко выраженных траектории движения исландских циклонов.

1. Северная, проходящая по северным морям и северным районам Евразийского континента.

2. Средняя, проходящая севернее 60° с.ш.

3. Южная, проходящая южнее 60° с.ш.

Все указанные траектории не представляют собой прямых линий. По своей форме они близки к синусоидам, амплитуда и период которых могут быть самыми различными.

Южные циклоны развиваются на полярном фронте над районами южных морей и югом Европейского континента. Чаще всего южные циклоны зарождаются над Средиземным и Черным морями, но иногда они могут развиваться в районах Каспийского и Аральского морей. Эти циклоны возникают под высотной фронтальной зоной, расположенной над югом Европы и Южными морями.

Высотная фронтальная зона в этих районах является одной из зон ВДЦ, образованного антициклоном субтропических широт и гребнем или ядром высокого давления над севером Атлантики и Скандинавией — с одной стороны и циклонами над ЕТС и центральными районами Атлантики — с другой (рис.2)

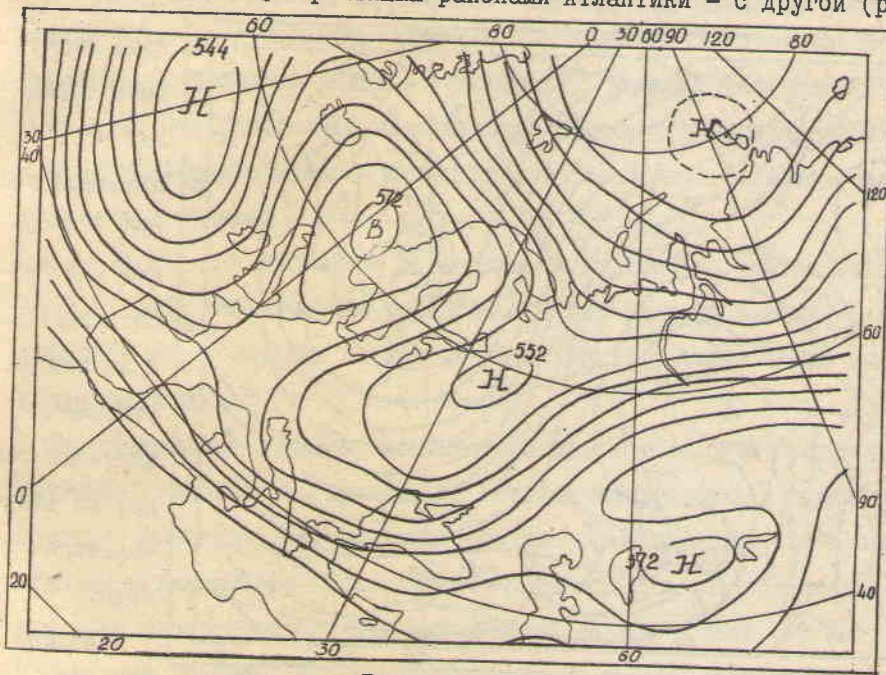


Рис. 2

По данным Н.Н.Бельской эта зона может иметь и меридиональные, и зональные направления.

Траектории смещения средиземноморских и черноморских циклонов также образуют три хорошо выраженных пучка.

1. Северный. Циклоны выходят из районов Черного моря и движутся почти меридионально с небольшой восточной составляющей.

2. Средний. Выходя из тех же районов, циклоны смещаются на Среднее Поволжье и Средний Урал.

3. Южный, когда циклоны смещаются почти на восток через Казахстан и юг Западной Сибири.

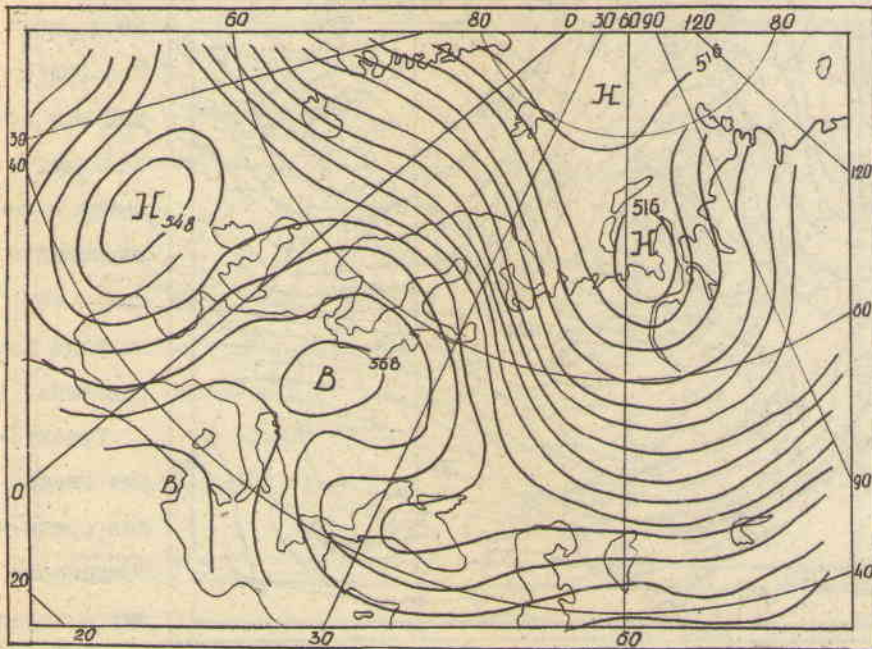
Циклоны, зарождающиеся над районами Каспия, могут смещаться почти на север, на северо-восток и на восток. В очень редких случаях наблюдается смещение их на северо-запад, иногда до районов Ленинграда. Такое anomальное

смещение их на северо-запад, иногда до районов Ленинграда. Такое anomальное

движение имеет место в том случае, когда над Западной Сибирью или северным Казахстаном располагается мощный антициклон, по западной периферии которого наблюдается сильный юго-восточный поток теплого воздуха.

Ныряющие называются циклоны, смещающиеся с севера или с северо-запада на юг или на юго-восток.

Ныряющие циклоны над ЕТС наблюдаются в тех случаях, когда над Западной Европой располагается антициклон или гребень, а над северо-востоком ЕТС и северо-западом Западной Сибири — глубокий Циклон. По западной, а затем северной периферии антициклона происходит заток теплого морского умеренного воздуха, а по северо-западной периферии циклона — холодного арктического воздуха. В результате над северо-западом ЕТС и Фенноскандией формируется ВФЗ с большими контрастами температуры (рис.3). Эта фронтальная



зона имеет волнообразный изгиб с ложбиной над ЕТС и гребнем над Фенноскандией. В дельте ее отмечается адвекция тепла, во входе — адвекция холода.

Зародившись на северо-

Рис. 3

западе или севере ЕТС эти циклоны в дальнейшем движутся почти на юг с небольшой восточной составляющей. Сместившись до центральных районов, циклоны резко меняют направление движения на восточное или северо-восточное. Момент смены направления смещения совпадает с моментом начала заполнения циклонов.

Термическая депрессия.¹⁾ Среднеазиатская термическая депрессия тесно связана с более мощной депрессией, развивающейся в передней Азии (Ирак, Иран, Афганистан и западный Пакистан). В период наиболь-

¹⁾ дается так, как у М.В.Бурковой

шего развития и углубления переднеазиатская депрессия своей северной частью захватывает Среднюю Азию, а иногда и юг Казахстана.

Основной причиной возникновения летней термической депрессии является нагревание воздушной массы над обширными пустынями Передней и Средней Азии и общий летний отток воздуха с Азиатского материка на океаны в верхних слоях. С нагреванием воздушных масс связан теплый субтропический антициклон в нижней и средней тропосфере (AT_{500} , AT_{300} , AT_{200}). От антициклона отходит хорошо выраженный высотный гребень, который развивается над районами Средней Азии. Ось этого гребня ориентирована почти меридионально. Восточнее гребня располагается высотная ложбина, ось которой проходит из районов Западной Сибири на Памир.

В период возникновения депрессии над Средней Азией, ВФЗ располагается далеко от ее центральной части. Это благоприятствует прогреву воздуха. Но изоляция от холодных потоков наблюдается обычно в течение 2-3 дней, реже 5-7 дней. Это определяет длительность существования депрессии.

Заполнение депрессии происходит в результате западного или северного холодных вторжений.

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.

Тропические циклоны возникают на южной периферии субтропических антициклонов, когда здесь происходит встреча тропических и экваториальных масс воздуха. Смещение этих циклонов сначала происходит по южной периферии антициклона с востока на запад, затем по западной и северо-западной их периферии - на северо-восток. При движении на северо-восток они могут сблизиться с полярным фронтом, за счет чего происходит их дополнительное углубление.

Тропические циклоны наблюдаются в Тихом, Индийском и Атлантическом океанах. В Тихом океане они зарождаются восточнее Филиппинских островов и восточнее Австралии, а также в Южно-Китайском море и смещаются сначала на запад, а затем на северо-восток, достигая районов Кореи, Японии, а иногда и Камчатки. В этих районах тропические циклоны называют тайфунами.

В Индийском океане тропические циклоны зарождаются в Бенгальском заливе, Аравийском море и районе Мадагаскарских островов, затем смещаются на юг Индии и восток Африки.

В Атлантическом океане районом зарождения являются Антильские острова и Карибское море. Отсюда циклоны смещаются на юго-восток Соединенных Штатов

Считают, что основной энергией, вызывающей возникновение тропических циклонов, является энергия фронтальных зон, а основной энергией, поддерживающей развитие их — энергия конденсации водяного пара. Поэтому все тропические циклоны возникают над акваториями океанов.

§ 2. Классификация антициклонов

С.П.Хромов предложил выделять пять типов антициклонов:

1. Промежуточные
2. Заключительные
3. Стационарные, умеренных широт
4. Субтропические
5. Арктические (антарктические).

Промежуточные антициклоны (или чаще гребни высокого давления) образуются между двумя циклонами одной серии. Это невысокие, холодные области высокого давления, смещающиеся в основном с запада на восток, или, точнее, в том же направлении и с теми же скоростями, что и циклоны.

Заключительные антициклоны являются замкнутыми областями высокого давления, перемещающимися в тылу последнего циклона серии. Это тоже холодные образования. Сначала они прослеживаются только как низкие образования, а по мере развития могут становиться средними. Заключительные антициклоны смещаются обычно в меридиональном направлении, чем вызывают смену зональной циркуляции на меридиональную. Траектории движения заключительных антициклонов образуют три хорошо выраженных пучка.

1. Северо-западный — антициклоны смещаются с северо-запада на юго-восток.

2. Северный — антициклоны смещаются с севера на юг.

3. Северо-восточный — смещение антициклонов происходит с северо-востока на юго-запад.

Траектории направленные с севера и северо-востока Мультановский назвал ультраполярными; траектории, идущие с северо-запада — полярными.

Стационарные антициклоны — это обширные малоподвижные области высокого давления, не связанные с циклоническими сериями. При неизменном положении интенсивность антициклона может меняться. Усиление стационарных антициклонов может происходить за счет слияния их с заключительными. Положение центра внутри обширной области повышенного давления может меняться иногда довольно резко.

Примером стационарных антициклонов является азиатский антициклон.

С у б т р о п и ч е с к и е антициклоны – стационарные области высокого давления, формирующиеся в пределах 30–40° северной и южной широт. Это теплые, высокие барические образования, прослеживаемые почти по всей толще тропосферы.

А р к т и ч е с к и е антициклоны – это области высокого давления, развивающиеся в районах Арктики и Антарктики. Одной из причин их образования является сильное выхолаживание воздуха над поверхностью покрытой льдом. Поэтому арктические антициклоны – это барические образования холодные в своей нижней части.

Второй причиной образования этих антициклонов является мощный вынос теплых масс из умеренных широт. Поэтому в верхней части они в подавляющем большинстве случаев теплые.

Низкие арктические антициклоны относительно быстро смещаются на юг, юго-запад и юго-восток. Высокие стационарируют или смещаются с востока на запад. И тогда их движение происходит по петлеобразным траекториям.

Раньше считали, что в районах полюса наблюдается только поле высокого давления. Б.М.Дзердзеевский показал, что арктические антициклоны не являются стационарными – они могут смещаться. Поэтому в районах полюса наблюдается и циклоническая деятельность.

§ 3. К р а т к а я х а р а к т е р и с т и к а ц и к л о н о в

Размеры внетропических циклонов могут быть самыми различными. Диаметр крайней замкнутой изобары колеблется от 200 до 3000 км. Наибольшие размеры имеют циклоны с несколькими центрами.

Под глубиной циклонов обычно понимают значение давления в его центре. Глубина зависит от стадии развития циклона. В начальной стадии давление, как правило, выше 1000 мб. В стадии наибольшего развития давление наиболее низкое, но и оно в большинстве случаев не ниже 985–990 мб. Наиболее глубокие циклоны наблюдаются в холодную половину года, когда велики горизонтальные градиенты температуры.

Скорости перемещения циклонов колеблются от нуля до 2000 км/сутки. В среднем скорость циклонов составляет 700–800 км/сутки. В холодную половину года скорость несколько больше, чем в теплую. При заполнении циклонов скорость их перемещения уменьшается и старые окклюдивированные циклоны, не имея поступательного движения, могут перемещаться по петлеобразной траектории.

Повторяемость циклонов зависит от времени года и географических условий. В северном полушарии в среднем зимой циклонов больше, чем летом.

Отношение повторяемости летних циклонов к зимним равно 1:2, а отношение продолжительно существующих летних циклонов к зимним как 3:10. Соотношение повторяемости циклонов и антициклонов над материками и континентом различны. Над континентами зимой преобладает антициклоническая деятельность, летом — циклоническая. Над океанами повторяемость циклонов зимой больше, чем летом.

Выходы южных циклонов на азиатскую территорию Союза происходят главным образом в теплую половину года. По территории ЕТС они могут смещаться и в холодный период года.

Погода в циклонах у поверхности земли крайне разнообразная. Наибольшие скорости ветра наблюдаются в восточной и западной частях циклона в небольшом удалении от центра. Наименьшие скорости отмечаются в южной и северной части. При движении циклона с юга на север наибольшие скорости отмечаются на северной периферии.

Температура внутри молодого циклона у поверхности земли и на высотах распределяется асимметрично. Наиболее теплой является южная и юго-восточная части циклона. Наиболее холодными — северная и северо-западная. Асимметричность распределения температуры сохраняется на всех высотах, на которых прослеживается область низкого давления. Причем на высотах области тепла более обширны, чем у поверхности земли.

При окклюзировании циклона резкая асимметричность в распределении температуры у поверхности земли исчезает. В нем различие температуры определяется только различиями влияния подстилающей поверхности и распределением облачности, ветра и других погодных условий. На высоте асимметричность сохраняется некоторое время и после окклюзирования.

По распределению облачности и осадков циклоны также неоднородные образования. Наибольшая облачность и осадки наблюдаются в восточной и западной частях циклона, вблизи его центра.

В южной части циклона могут выпадать осадки внутримассового характера (зимой — внутри устойчивой морской умеренной массы, летом — внутри неустойчивых масс). При устойчивой стратификации воздуха летом в теплом секторе наблюдается ясная погода. При малом влагосодержании теплого воздуха зимой в южной части циклона также наблюдается ясная погода.

В северной части циклона осадки выпадают только вблизи центра, на северной периферии отмечается ясная, холодная погода, летом иногда могут выпадать ливневые осадки.

§ 4. Краткая характеристика тропических циклонов

По своим горизонтальным размерам тропические циклоны значительно меньше внетропических. Их диаметр, как правило, равняется 100–200 км и лишь в очень редких случаях может достигать 1000 км.

Давление в центре в среднем 960–970 мб, но иногда могут встречаться очень глубокие тропические циклоны (до 910–915 мб). Самое низкое, приведенное к уровню моря давление, наблюдавшееся на суше, равно 892 мб, и наблюдалось оно в тропическом циклоне над Флоридой в сентябре 1935 года.

Барические градиенты могут достигать 15–16 мб на градус экватора, скорости ветра в среднем 30 м/сек, в maximume могут достигать 50 м/сек.

Скорости смещения этих циклонов невелики, порядка 200–500 км/сутки. Лишь в тех случаях, когда происходит углубление циклонов за счет сближения с полярным фронтом, скорости их могут резко возрастать (до 700–1000 км/сутки).

Тропические циклоны встречаются в основном в теплую половину года, зимой их повторяемость очень небольшая.

Внутри тропических циклонов наблюдается относительно однородная на всем пространстве жаркая, облачная погода с сильными ливневыми осадками и очень сильными ветрами. Только в самом центре, на небольших пространствах, может наблюдаться ясная погода, вызванная сильными нисходящими токами (глаз бури).

§ 5. Краткая характеристика антициклонов

Горизонтальные размеры антициклонов обычно больше, чем размеры циклонов. Диаметр крайней изобары может колебаться от 1000 до 6000 километров. Наиболее часто диаметр хорошо развитого антициклона составляет 2000 километров.

Интенсивность антициклона, определяемая давлением в его центре, также может быть различной. В начальный период развития величина давления в центре антициклона колеблется около 1015 мб. К моменту наибольшего развития величина давления достигает 1030 мб. В редких случаях максимальное давление может составлять 1070–1080 мб.

Наиболее интенсивные антициклоны также наблюдаются зимой – в периоды наибольших горизонтальных контрастов температур.

Скорость перемещения подвижных антициклонов в среднем такая же, как и у циклонов. Но антициклоны гораздо чаще, чем циклоны стационарируют, т.е.

бывают малоподвижными.

Погодные условия в антициклоне относительно однородны.

В центральной части антициклона наблюдается малоградиентное поле, а следовательно, и поле слабых ветров неопределенных направлений. На периферии антициклона ветры могут быть очень сильными, особенно в тех случаях, когда антициклон сближается с циклоном. В переходной зоне между циклоном и антициклоном ветры часто достигают силы штормовых. Направление ветра на периферии антициклона определяется его циркуляцией.

Поле температуры в антициклоне у поверхности земли относительно однородное, хотя в передней его части всегда несколько холоднее, чем в тыловой.

На высоте в антициклонах могут наблюдаться большие горизонтальные градиенты температуры, обусловленные наличием высотных фронтальных зон и слоев инверсии различной мощности и интенсивности.

В процессе разрушения антициклона температурные контрасты ослабевают и на высотах.

Облачность и осадки фронтального характера могут наблюдаться лишь на периферии антициклона.

В центральной части могут наблюдаться внутримассовые и подинверсионные облака. Внутримассовые облака и осадки отмечаются лишь в тех случаях, когда в антициклоне отсутствует или имеется слабый слой инверсии, а состояние воздушной массы, внутри которой сформирован антициклон, неустойчивое. Слабые осадки могут выпадать и из подинверсионных облаков.

§ 6. Теории развития циклонов и антициклонов

Процесс образования и развития циклонов называется циклогенезом; процесс образования и развития антициклонов — антициклогенезом.

Существует немало теорий цикло- и антициклогенеза, но и к настоящему времени еще не создано сколь-нибудь удовлетворительной теории, объясняющей весь процесс развития циклонов и антициклонов. Каждая из существующих теорий основывается на каком-либо одном или нескольких факторах и не в состоянии объяснить все стороны этого сложного процесса.

Очевидно, что теория циклогенеза должна быть теснейшим образом связана с теорией изменения давления, но одних заключений об изменении давления недостаточно для объяснения возникновения циклонов.

Циклон — это не просто область низкого давления, это особая форма циркуляции атмосферного воздуха, это комплекс погодных условий, меняющихся в

довольно широких пределах.

Точно также первопричиной антициклогенеза является рост давления над определенной территорией, но не всякий рост давления может привести к образованию антициклона с вполне определенной формой циркуляции и комплексом погодных условий.

Таким образом, вопрос о возникновении циклонов и антициклонов более сложный, чем вопрос об изменении давления.

Чтобы иметь представление о современном состоянии вопроса о цикло- и антициклогенезе, рассмотрим в исторической последовательности некоторые из наиболее известных теорий, которые в той или иной степени могут быть использованы в практической работе.

§ 7. Конвективная теория

Авторами этой теории были Мон (Норвегия) и Феррель (США).

По теории Мона и Ферреля началом развития циклонов является прогрев воздуха над ограниченной территорией. При прогреве возникают конвективные вертикальные токи, обуславливающие конденсацию водяных паров. Скрытая теплота конденсации поддерживает вертикальные токи, что и приводит к формированию циклонов.

Движение циклонов рассматривалось ими как образование новых центров низкого давления там, где наиболее интенсивны вертикальные токи, а следовательно, и процессы конденсации. Интенсивная конденсация, по мнению авторов, наблюдается в восточной части циклона, поэтому в восточном направлении смещается центр.

Исходя из идей Мона и Ферреля невозможно объяснить движение циклонов к северо-востоку и, тем более, к северу или северо-западу. Не объясняется развитие и движение так называемых "сухих" циклонов, т.е. областей низкого давления, с которыми не связаны облачность и осадки.

Несостоятельность конвективной теории состоит в том, что основной причиной развития циклонов в ней считается конденсация. Очевидно, что энергии конденсации совершенно недостаточно для развития циклона-вихря огромного размера. Опровержением этой теории является и то, что циклоны не перемещаются в сторону теплого сектора, где сосредоточено наибольшее количество влаги.

Конденсация играет некоторую роль в поддержании вертикальных токов, но это не означает, что конденсация определяет развитие циклонов.

§ 8 . Т е р м и ч е с к а я т е о р и я

Автором этой теории развития циклонов является Петр Иванович Броунов — великий русский метеоролог конца XIX и начала XX века.

В одной из первых своих работ "Поступательное движение циклонов и антициклонов в Европе и преимущественно в России" (1882 г.) Броунов писал: "причина поступательного движения циклона заключается в непрерывном уменьшении атмосферного давления, происходящем в его передней части вследствие замены более тяжелого воздуха более легким. Наибольшее уменьшение давления происходит там, где ветры дуют перпендикулярно изотермам и линиям равных влажностей".

Таким образом, движение циклона он рассматривал как результат возникновения новых вихрей в той его части, где наблюдается наибольшее падение давления.

В работе "Европейские бури и предсказание их" (1884 г.) Броунов рассматривает вопрос об образовании циклонов не в связи с движением, а специально. Здесь он говорит о двух причинах падения давления: нагревании у поверхности земли и растекании на высотах.

Для возникновения циклона, по его мнению, необходимо неустойчивое состояние воздуха. Неустойчивость может возникнуть в результате неравномерного нагревания поверхности земли и прилегающего к ней воздуха.

Если нагревание достаточно сильное и, если, в то же время, в окружающей атмосфере существуют условия неустойчивого равновесия, то развиваются восходящие движения воздуха. Восходящие движения служат причиной падения давления, так как движущиеся вверх воздушные массы приводят к накоплению воздуха в более высоких слоях и растеканию его в стороны, отчего вес столба воздуха уменьшается, и давление в данной местности понижается. Так образуется барометрический минимум. К образовавшемуся минимуму давления (у поверхности земли) стекается воздух, но под действием силы Кориолиса отклоняется вправо. Так возникает циклоническая циркуляция.

В этой же работе рассмотрен вид изобарических поверхностей над циклоном и путь частицы в циклоне. По мнению Броунова, внизу в циклоне изобарические поверхности вогнутые, а на верхних уровнях — выпуклые.

Доказательством выпуклости изобарических поверхностей на высотах является растекание воздуха от центра к периферии, о чем свидетельствует движение перистых облаков. Перистые облака по мере углубления циклона удаляются от центра его в переднюю часть.

Путь, проходимый частицей воздуха в циклоне, по Броунову, можно пред-

ставить таким: от периферии циклона частица движется к центру по кривой, близкой к логарифмической спирали, в средних частях она поднимается, продолжая вращаться. В верхних, вращаясь, удаляется от центра и приближается к периферии и, наконец, совершенно выходит из области циклона. Таким образом, в вихре участвуют все время новые частицы воздуха. Так как размеры циклонов огромные, то частица не делает нескольких оборотов в циклоне: полагают, что она совершает около четверти оборота.

В работе "Барометрические максимумы в Европе и их теория" (1887 г.), Броунов говорит о двух причинах образования циклонов и антициклонов: термической и динамической. Антициклоны, по его мнению, образуются двумя способами: 1) вследствие охлаждения земной поверхности от лучеиспускания, 2) вследствие накопления воздуха, выбрасываемого из циклонов. Первый способ называется термическим, второй — динамическим.

Механизм развития антициклонов за счет термических причин представляется так: пусть зимой температура над некоторой ровной поверхностью одинакова, тогда поверхности равных упругостей (т.е. давлений) будут параллельны земной поверхности. Пусть какая-то часть поверхности земли охлаждается за счет лучеиспускания. При этом охлаждается и прилегающий воздух, вследствие чего последний теряет часть своей упругости и сжимается до тех пор, пока упругость его не восстановится. От этого оседает весь находящийся над ним столб воздуха. Давление при этом не изменится, изменение его последует за оседанием. Оседание воздуха ведет к понижению поверхностей равных упругостей, более сильному на высоте и более слабому внизу. Поэтому наверху воздух устремляется к пункту, лежащему над охлажденным районом. Приток воздуха увеличивает давление внизу. Оседание воздуха приводит к рассеиванию облачности, что увеличивает лучеиспускание. Увеличение лучеиспускания приводит к новому охлаждению, новому оседанию и притоку воздуха, а следовательно, и росту давления.

Во втором случае образование антициклона происходит следующим образом.

Пусть вокруг некоторой области появились два или несколько циклонов. Наверху воздух от каждого циклона оттекает, скапливаясь над промежуточной областью. Скопление воздуха над ограниченной, промежуточной областью, приводит к росту давления. В области роста появляется замкнутая область высокого давления, от которой воздух начинает растекаться, но вследствие трения растекание не компенсирует подток воздуха, и давление продолжает расти. Так образуется промежуточный антициклон с нисходящим движением воздуха а, следовательно, ясной погодой. Такой процесс образования антициклонов Броунов

и называет динамическим.

Аналогичным образом между двумя или несколькими антициклонами может возникнуть циклон.

Броунов занимался не только изучением причин возникновения и развития циклонов и антициклонов, он много лет посвятил исследованию вопроса о перемещении барических образований. О его правилах перемещения циклонов и антициклонов мы будем говорить несколько ниже.

Заслуга Броунова состоит в том, что он обратил внимание на два очень важных фактора цикло- и антициклогенеза, а именно на термический и динамический.

Но все его суждения получены на основании эмпирических исследований, без глубокого теоретического обоснования. Кроме того, по его мнению, главным является термический фактор, в то время как циклоны в среднем холодные, антициклоны - теплые образования.

§ 9. Волновая теория развития циклонов

Основоположниками волновой теории развития циклонов являются представители бергенской школы синоптиков - В.Бьеркнес, Я.Бьеркнес, Сульберг, Т.Бержерон и Свобода. Отдельные мысли о фронтальной природе циклонов высказывались и раньше. В 1911 году Шоу впервые дал схему строения циклонов из трех воздушных масс - одной теплой и двух холодных. В 1923 году Экснер предложил заслоночную теорию развития циклонов на фронте. Суть этой теории состояла в том, что на арктическом фронте, расположенном примерно на широте 70° , под действием каких-либо причин может образоваться волна.

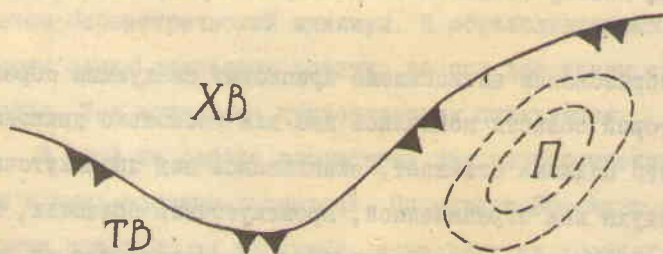


Рис. 4

В результате образования волны формируется язык холодного воздуха, который в дальнейшем служит барьером, задерживающим западный поток. За барьером уменьшится мощность воздушной массы, в результате чего давление понижается. Понижение давления может привести к развитию циклона (рис.4).

Ценной в теории Экснера является мысль о барьере, образующемся в результате накопления холодного воздуха. Возникновения циклонов за таким

барьером, конечно не происходит, но он может оказывать существенное влияние на движение циклонов. Мощные барьеры холодного воздуха циклонами не преодолеваются, а огибаются, в результате чего происходит резкое изменение траекторий движения циклонов.

Фронтальная природа циклонов была доказана В.Бьеркнесом в 1920 году. Несколько раньше были установлены стадии развития циклонов.

Сущность теории о фронтальной природе циклонов заключается в том, что все циклоны возникают из волны на фронте.

Волны, возникающие на фронте, могут быть устойчивыми и неустойчивыми.

Устойчивыми называются волны, амплитуда которых со временем уменьшается. Из устойчивых волн циклон развиваться не может.

Неустойчивыми называются волны, амплитуда которых со временем увеличивается, и волновые движения переходят в вихревые.

Причиной образования волны на фронте, по мнению представителей бергенской школы, может быть или орография, или импульсивное воздействие уже существующих волн и циклонов. Это является одним из существенных недостатков учения норвежской школы потому, что на практике часто наблюдаются случаи возникновения волн над ровной поверхностью, при отсутствии циклонов и волн в окружающих районах.

Вторым недостатком волновой теории циклонов является то, что нет убедительного аналитического обоснования ее.

Первая, относительно совершенная математическая теория фронтальных циклонов была дана академиком Н.С.Кочиним в 1931 году.

Кочиним рассмотрены возможные причины возникновения волн на фронте и дана теоретическая схема циклона. Теория этого вопроса относится к курсу динамической метеорологии, и мы на ней останавливаться не будем. Рассмотрим основные выводы из этой теории.

Существуют три силы, определяющие развитие волн на фронте: 1) сила тяжести, 2) сила сдвига, 3) сила инерции.

Сила тяжести обуславливает возникновение гравитационных волн на фронте. В результате развития гравитационных волн частицы испытывают постепенно затухающие колебательные движения. Гравитационные волны устойчивые и сами по себе не могут привести к развитию циклона. Они могут лишь накладываться на другие волны, усиливая или ослабляя их. Примером устойчивых гравитационных волн могут служить волны на поверхностях инверсий.

Сила сдвига возникает за счет неодинаковой скорости движения воздушных масс, разделяемых фронтом. Под действием силы сдвига на фронте возника-

ют неустойчивые волны, аналогичные волнам на поверхности моря.

При переходе через некоторый предел из волн сдвига развиваются циклоны.

Силами инерции являются сила Кориолиса и центробежная. Под влиянием сил инерции также могут возникнуть волновые движения на фронте. Волны инерции имеют длины и периоды, соизмеримые с длиной и периодом циклонической волны, но они устойчивы и сами по себе к развитию циклонов привести не могут.

Циклоны чаще всего возникают при совокупном действии всех трех перечисленных выше сил.

§ 10. К р и т е р и и н е у с т о й ч и в о с т и ф р о н т а л ь н ы х в о л н

На фронтальных поверхностях часто возникают волновые движения и инженеру-синоптику приходится решать вопрос о том, разовьются они в циклоны или нет, т.е. являются ли эти волны устойчивыми или неустойчивыми.

Представителями бергенской школы и Н.Е.Кочиним были сделаны попытки выведения критерия неустойчивости фронтальных волн.

По Бьеркнесу, неустойчивость волн определяется неравенством:

$$\Delta U > 3 \Delta T, \quad 1.$$

где ΔU - вертикальная разность скоростей ветра по обе стороны от линии фронта, ΔT - разность температур.

По Кочину критерием неустойчивости может служить неравенство

$$(\Delta U)^2 < \frac{g h}{2 T_m} \Delta T, \quad 2$$

где h - высота рассматриваемой части фронтальной поверхности над поверхностью земли в километрах, T_m - средняя температура.

Тот и другой критерии на практике оправдываются редко, поэтому определенных и точных критериев неустойчивости пока не существует.

Наблюдения показывают, что динамическая устойчивость волны связана:

а) с длиной волны, б) с углом наклона фронта, в) со скоростью движения волны и г) с состоянием воздушных масс, разделяемых фронтом.

Волны, имеющие длину более 1000 км, в большинстве случаев, неустойчивы. Неустойчивые волны чаще возникают на круто наклоненных поверхностях, поэтому на холодных фронтах неустойчивые волны более вероятны, чем на теплых. Малоподвижные волны обычно являются устойчивыми; фронтальные волны тем ус-

тойчивее, чем устойчивее стратификация воздушных масс.

Американские метеорологи рассматривают развитие атмосферных волн и критерии их неустойчивости, исходя из энергетического состояния атмосферы. Поскольку сумма кинетической, потенциальной и внутренней энергии потока в целом постоянна, а изменения внутренней и потенциальной энергии прямо пропорциональны, то зная изменение энергии в движущемся потоке, можно установить, за счет чего происходит развитие неустойчивых волн.

Если в потоке имеет место сдвиг скорости, то возмущения могут возникать за счет внутренней энергии. По мнению Фьортофта возмущения будут неустойчивыми в том случае, когда наибольший сдвиг имеет место в средней части потока и особенно, если сдвиг скорости происходит на одной линии (профиль скорости на рис. 5 "а" и "б").

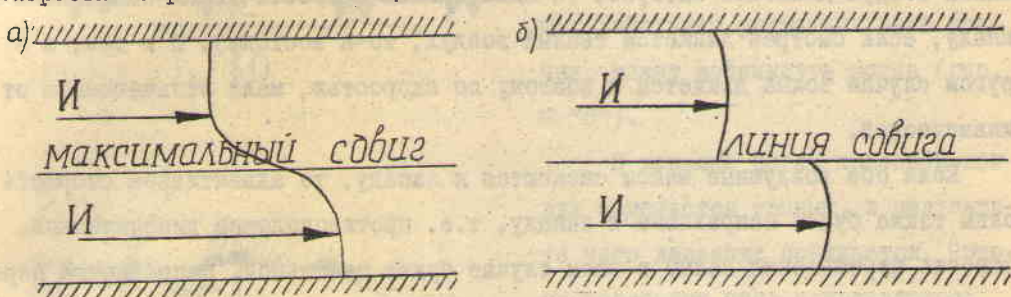


Рис. 5

Теория Фьортофта, выведенная для несжимаемой жидкости, с некоторым приближением может быть применена и к атмосферным потокам вблизи линии фронта.

Чарни считает, что волновые возмущения возникают за счет сдвига скорости потока не в горизонтальной, а в вертикальной плоскости. Источником возмущений в этом случае могут быть потенциальная и внутренняя энергия потока.

§ II. Перемещение фронтальных волн

Перемещение волны относительно земли состоит из двух слагающих: 1) перемещение по фронту, независимо от того как движутся воздушные массы (волновая или динамическая слагающая волны), 2) перемещение, вызванное общим движением воздуха вдоль фронта (адвективная слагающая движения волны). Динамическая слагающая движения волны в северном полушарии всегда направлена так, что холодный воздух остается слева от направления перемещения. При расположении холодного воздуха на севере эта слагающая всегда направлена на восток.

Адвективная слагающая скорости равна средней из скоростей обоих течений — теплого и холодного, т.е.

$$U_{ag} = \frac{U_T + U_x}{2},$$

где U_T — скорость движения теплого воздуха, U_x — скорость движения холодного воздуха.

В случае, когда холодный воздух расположен на севере и обе воздушные массы движутся к востоку, адвективная скорость совпадает с динамической и результирующая скорость волны может быть очень большой. Когда холодный воздух движется к западу, а теплый — к востоку, адвективная скорость волны будет небольшой и может быть направлена или к востоку, или к западу (если холодный воздух движется быстрее, то адвективная скорость волны направлена к западу, если быстрее движется теплый воздух, то к востоку). И в том, и в другом случае волна движется к востоку со скоростью, мало отличающейся от динамической.

Если обе воздушные массы смещаются к западу, то адвективная скорость волны также будет направлена к западу, т.е. противоположно динамической. Скорость перемещения волны в этом случае будет небольшой. Направление перемещения будет зависеть от соотношения величин динамической и адвективной скорости: если динамическая скорость больше адвективной, волна медленно перемещается на восток; если адвективная скорость больше динамической, волна медленно перемещается на запад.

Так как холодный воздух чаще всего располагается на севере, то большинство фронтальных волн смещается с запада на восток. В редких случаях (при движении воздушных масс к западу) волны могут смещаться и на запад, но скорость их перемещения при этом очень небольшая.

При аномальном расположении воздушных масс (холодные на юге, теплые на севере), фронтальные волны могут смещаться к западу со значительными скоростями.

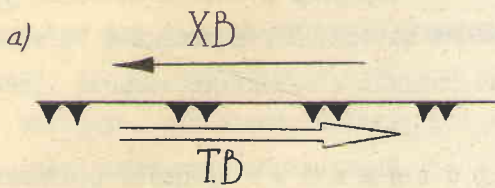
Если волна неустойчива, то динамическая слагающая скорости постепенно уменьшается. После окклюдирования, когда возмущение теряет волновой характер, динамическая слагающая становится равной нулю. После этого возмущение увлекается только общим воздушным течением. Этим объясняется то, что после окклюдирования движение циклонов становится очень медленным.

§ 12. Стадии развития циклонов по волновой теории

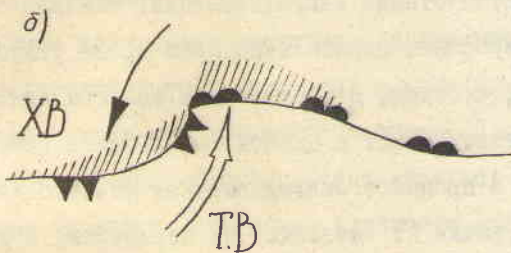
Представителями волновой теории рассматривались стадии развития циклонов у поверхности земли. Ими не анализировались стадии развития антициклонов и не рассматривались высотные процессы при развитии циклонов.

В развитии циклонов было выделено три стадии: 1) стадия волны, 2) стадия молодого циклона и 3) стадия окклюдирования.

1. Стадия волны. Пусть стационарный фронт разделяет хо-



лодную массу, расположенную на севере и теплую, расположенную на юге (рис. 6 "а"). На таком фронте, под действием указанных выше причин, может возникнуть волна (рис. 6 "б").



В вершине волны холодный воздух замещается теплым, в результате чего давление понижается. Потoki воздушных масс искривляются: теплый воздух приобретает северную слагающую движения, холодный - южную. Передняя часть волны приобретает характер теплого фронта, пото-

Рис. 6

тому, что здесь теплый воздух перемещается в сторону холодного. Тыловая часть волны становится холодным фронтом, т.к. здесь холодный воздух перемещается в сторону теплого. Перед теплым фронтом, за счет адвекции, давление падает, за холодным фронтом - растет.

Холодный фронт в стадии волны чаще имеет характер фронта второго рода, поэтому с ним связана узкая зона осадков. Перед теплым фронтом зона осадков значительно шире, чем при стационарном положении фронта.

Если волна устойчивая, то на этой стадии ее развитие заканчивается. Волна без изменения амплитуды может длительное время (1-2 дня) перемещаться вдоль фронта. Фронт приобретает характер квазистационарного. Давление в вершине волны понижается мало поэтому в барическом поле волна оформляется или одной главной замкнутой изобарой, или лишь промежуточной изобарой.

2. Стадия молодого циклона. (рис.7). В случае неустойчивости волна может перейти в стадию молодого циклона. Барическое

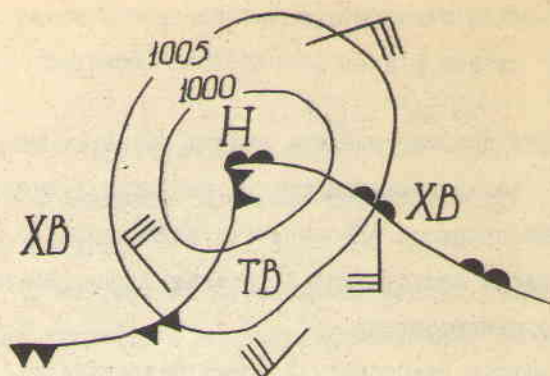


Рис. 7

ки фронта имеют выпуклость в направлении потока. Перед теплым и за холодным фронтами наблюдается широкая зона осадков и замкнутые области падения и роста давления соответственно.

3. Стадия окклюдирования. В процессе развития циклона холодный фронт догоняет теплый и сливается с ним. С этого момента начинается стадия окклюдирования.

Вначале окклюдирования циклон некоторое время углубляется, а затем, с уменьшением теплового сектора, давление растет и циклон заполняется (рис. 8).

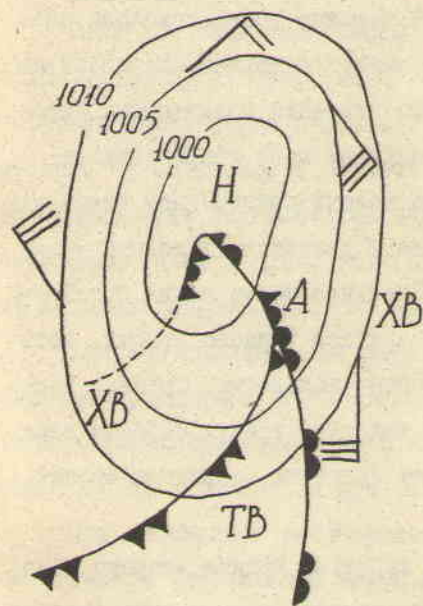


Рис. 8

понижения давления, которые наблюдаются при развитии циклона.

Остается невыясненной причина более быстрого перемещения холодного участка фронта, не объясняется почему в начале окклюдирования давление продолжает понижаться. Наконец, не подтверждается положение о возможности неоднократного окклюдирования циклона, которое выдвигалось основоположниками этой теории.

поле оформляется несколькими замкнутыми изобарами. Теплый воздух, а следовательно, и вершина волны, смещаются далеко к северу от своего начального положения. Холодный воздух смещается к югу. Оформляется теплый сектор и хорошо выраженная циклоническая циркуляция (движение против часовой стрелки). Теплый и холодный участ-

ки фронта оказываются холодным.

4. Недостатки волновой теории. Внешне эта теория правильно описывает процесс развития циклонов, но она не объясняет причины зарождения и последовательности развития циклонов.

Причиной понижения давления и развития волны в циклон считается адвекция, но одной адвекцией нельзя объяснить те значительные

§ 13 . А д в е к т и в н о - д и н а м и ч е с к а я т е о р и я р а з в и т и я ц и к л о н о в и а н т и ц и к л о - н о в

Первые идеи о значении динамического фактора в развитии циклонов были высказаны П.И. Броуновым, а затем Михелем и Шерхагом (1932 - 34 г.г.). Идея заключалась в том, что на высоте существуют области сходимости и расходимости потоков, а у земли, в соответствии с этим, возникают области роста и падения давления. Наличие областей сходимости и расходимости потоков впервые обнаружил Михель, после чего Шерхаг высказал мысль, что все циклоны возникают под дельтой высотной фронтальной зоны. Дальнейшие наблюдения показали, что не все циклоны возникают под областью расходимости потоков. Это означало, что одним динамическим фактором нельзя объяснить возникновение всех барических образований.

С 1939 года принцип Михеля начали применять советские ученые Погосян и Таборовский. Анализ карт барической топографии привел их к мысли о совокупном действии адвективного и динамического факторов, и 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 и т.д.

В 1947 году Таборовским была разработана теория этого вопроса, результатом чего явилась формула адвективно-динамического изменения давления

$$\frac{\partial p}{\partial t} = K T_y^2 \left[2 H_{ns} \cos 2\varepsilon - H_{nn} \sin 2\varepsilon + \frac{H_n}{z} \sin 2\varepsilon \right], \quad 3$$

где K - коэффициент пропорциональности, z - радиус кривизны, ε - угол адвекции. Другие обозначения прежние.

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

Погосяном и Таборовским впервые в истории синоптики была доказана единая природа циклонов и антициклонов - этих прямо противоположных барических образований.

Возникновение циклонов объясняется следующим образом. Все циклоны возникают на стационарных фронтах, поэтому в момент зарождения их изогипсы прямолинейны и проходят примерно параллельно фронту (рис.9). Поскольку в этом случае $H_{ns} = 0$, $z = \infty$, то кривизна и сходимость не могут быть

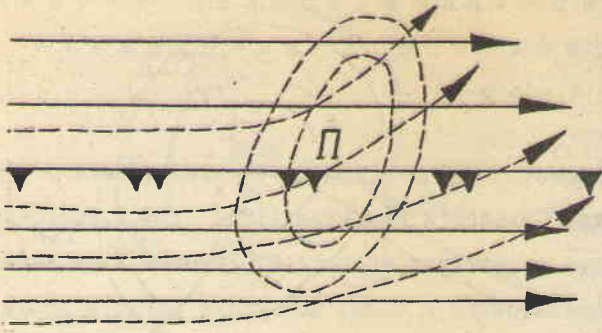


Рис. 9

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

4

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

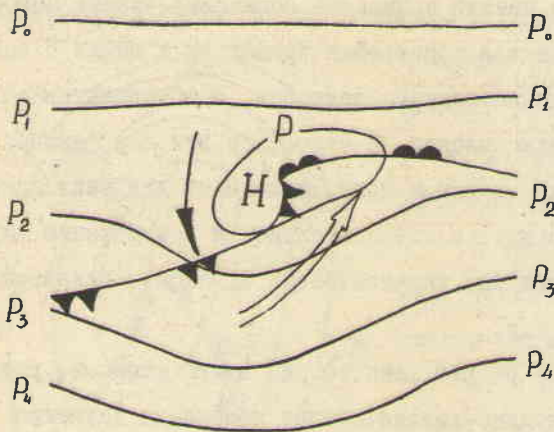


Рис. 10

результате циклонической циркуляции воздуха появляется волна на фронте (рис.10).

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 из волн на фронте, имеет место до тех пор пока существуют условия, обеспечивающие падение давления.

По волновой теории, наоборот, сначала возникает волна на фронте, а за-

причиной изменения давления. Изменение давления в начальный момент определяется сгущением и разрежением изогипс (H_{nn}) и характером адвекции (знаком и величиной ε). Величина и знак изменения давления характеризуется формулой

фронта, т.е. в зоне больших значений T_y .

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

тем, 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 во всей толще нижней тропосферы, т.е. дана пространственная структура барических образований на протяжении всей истории их существования.

Характеристика стадий развития хорошо изложена в работе Таборовского "Гидродинамическая теория бароклинной атмосферы" (1947 г.). Мы здесь не будем останавливаться на анализе этих стадий, потому что они в основном сходны со стадиями развития циклонов и антициклонов с точки зрения современной теории, которая излагается ниже.

§ 14. Современная теория цикло- и антициклогенеза

Во всех рассмотренных выше теориях развитие циклонов и антициклонов так или иначе отождествлялось с изменением давления во времени. Но даже очень сильное понижение (повышение) давления, имеющее одинаковое значение над большими пространствами, не может привести к возникновению циклона (антициклона). Обязательным условием возникновения замкнутых областей низкого и высокого давления, с присущей им циркуляцией воздуха, является неравномерность изменения давления. Неравномерность изменения давления приводит к прогибу изобарических поверхностей, что аналитически характеризуется изменением лапласиана геопотенциала во времени, т.е. величиной и знаком $\frac{\partial}{\partial t} \Delta H$. Поэтому для выявления факторов цикло- и антициклогенеза можно также использовать уравнение вихря скорости.

В предшествующей главе было показано, что без учета относительно малых членов, и в предположении геострофичности движений, для H любой изобарической поверхности p можно записать

$$\frac{\partial \Delta H_p}{\partial t} = -\frac{1}{L} (H, \Delta H)_p - L^2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)_p$$

Подставляя в левую часть 5 вместо ΔH_p его значение из формулы

$$\Delta H_p = \Delta H_{p_0} + R \ln \frac{p_0}{p} \Delta \bar{T}, \quad 6$$

получим

$$\frac{\partial \Delta H_{p_0}}{\partial t} = -\frac{1}{L} (H, \Delta H)_p - l^2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)_p - R \ln \frac{p_0}{p} \frac{\partial \Delta \bar{T}}{\partial t}, \quad 7$$

где p_0 - давление на изобарической поверхности, расположенной вблизи поверхности земли, p - давление на выше расположенной изобарической поверхности, \bar{T} - средняя температура в слое от p_0 до p , $\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)_p$ - дивергенция вектора ветра на уровне p .

Из формулы 7 следует, что в первом приближении цикло- и антициклогенез в локальной точке у поверхности земли определяется тремя факторами:

- 1) адвекцией вихря скорости $\left[\frac{1}{L} (H, \Delta H)_p \right]$ на уровне p ,
- 2) дивергенцией вектора ветра на уровне p - $\left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right]_p$
- 3) изменением во времени лапласиана средней температуры слоя от p_0 до p $\left[R \ln \frac{p_0}{p} \frac{\partial \Delta \bar{T}}{\partial t} \right]$

Формула 7 является приближенной потому, что в ней влияние агеострофической составляющей ветра учтено только во втором члене и совершенно не учтено влияние турбулентного трения, вертикальных токов и стратификации атмосферы. Поэтому все нижеизложенные выводы применимы лишь для качественной оценки цикло- и антициклогенеза и не пригодны для количественных расчетов.

Рассмотрим влияние каждого из перечисленных выше факторов.

I. Адвекция вихря $(H, \Delta H) = H_n \frac{\partial \Delta H}{\partial S}$ будет положительной, если в направлении потока S происходит увеличение положительного или уменьшение отрицательного лапласиана геопотенциала. В этом случае изменение лапласиана в локальной точке будет отрицательным $\left(\frac{\partial}{\partial t} \Delta H < 0 \right)$, что определяет антициклогенез. Если в направлении потока S происходит уменьшение положительного или увеличение отрицательного лапласиана давления, то $\frac{\partial}{\partial S} \Delta H < 0$, а, следовательно $\frac{\partial}{\partial t} \Delta H > 0$. В локальной точке в этом случае будет иметь место циклогенез.

О знаке изменения лапласиана давления вдоль потока можно судить по конфигурации изогипс. Если в направлении потока возрастает антициклоническая кривизна изогипс или убывает циклоническая, то $\frac{\partial}{\partial S} \Delta H < 0$; если в направлении потока возрастает циклоническая кривизна изогипс или убывает антициклоническая, то $\frac{\partial}{\partial S} \Delta H > 0$. Поэтому наиболее благоприятные условия для циклогенеза имеют место в передней части высотной ложбины и в тыловой части высотного гребня. Наиболее благоприятные условия для антициклогенеза

- в передней части высотного гребня и в тыловой части высотной ложбины. Интенсивность цикло- и антициклогенеза зависит как от степени изменения кривизны вдоль потока, так и от градиента геопотенциала H_n . В связи с тем что большие значения H_n наблюдаются во фронтальной зоне, более интенсивное изменение вихря скорости во времени, а следовательно, и наиболее интенсивный цикло- и антициклогенез наблюдается под ВФЗ.

2. Влияние дивергенции ветра на цикло- и антициклогенез определяется вторым членом формулы 7. Знак этого члена отрицательный, поэтому дивергенция вектора ветра на вышележащих уровнях (например, на уровне 700 или 500 мб) приводит к антициклогенезу у поверхности земли, а конвергенция - к циклогенезу.

3. Влияние термического фактора определяется членом $-R \ln \frac{p_0}{p} \frac{\partial}{\partial t} \Delta \bar{T}$, где $\Delta \bar{T}$ лапласиан средней температуры слоя от p_0 до p . Очевидно, что в термической ложбине $\Delta \bar{T} > 0$, в термическом гребне $\Delta \bar{T} < 0$, а $\frac{\partial}{\partial t} \Delta \bar{T} > 0$ - означает усиление термической ложбины или ослабление термического гребня. $\frac{\partial}{\partial t} \Delta \bar{T} < 0$ - усиление термического гребня или ослабление термической ложбины.

Поэтому возникновение или усиление термического гребня на картах относительной топографии способствует циклогенезу у поверхности земли; возникновение или усиление термической ложбины на картах относительной топографии - антициклогенезу у поверхности земли.

Формула 7 справедлива не только для уровня p_0 , расположенного вблизи поверхности земли, но и для любого другого уровня.

Из этого следует, что адвекция вихря и дивергенция ветра на уровне P вносят одинаковый вклад в изменение вихря скорости на любом выше- и ниже расположенном уровне. Вклад термического фактора на разных уровнях различный.

В самом деле, если $p_0 > p$, то $\ln \frac{p_0}{p} > 0$ и при $\frac{\partial}{\partial t} \Delta \bar{T} > 0$,

$$\ln \frac{p_0}{p} \frac{\partial}{\partial t} \Delta \bar{T} > 0$$

если же, при том же знаке $\frac{\partial}{\partial t} \Delta \bar{T}$, $p_0 < p$, то $\ln \frac{p_0}{p} \frac{\partial}{\partial t} \Delta \bar{T} < 0$. При $p_0 = p$

$$\ln \frac{p_0}{p} = 0 \quad \text{и} \quad \ln \frac{p_0}{p} \frac{\partial}{\partial t} \Delta \bar{T} = 0$$

Это означает, что при развитии термического гребня на картах $OT_{p_0}^p$ происходит усиление циклонической циркуляции у земли и антициклонической - на всех уровнях, расположенных выше уровня p .

При развитии термической ложбины на картах $OT_{p_0}^p$ у земли должна усиливаться антициклоническая циркуляция, а на высотах - циклоническая.

На уровне поверхности p влияние термического фактора не сказывается на изменении интенсивности циркуляции.

§ 15. Стадии развития циклонов

Развитие циклонов от момента зарождения до полного исчезновения в настоящее время условно делят на четыре стадии: 1 - стадия волны, 2 - молодой циклон, 3 - циклон, достигший максимального развития, 4 - заполняющийся старый циклон.

Стадия волны. У поверхности земли циклон оформлен одной замкнутой изобарой. Фронт имеет вид волны.

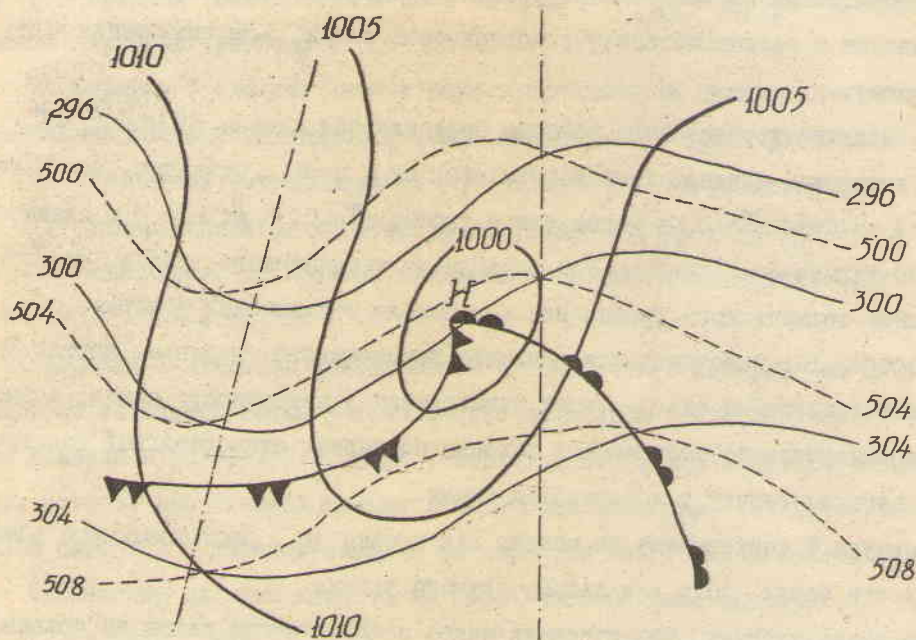


Рис. II

На всех картах барической топографии, включая и карту поверхности 850 мб, замкнутых изогипс нет.

На высотах циклону соответствует хорошо выраженная высотная фронтальная зона с наибольшими контрастами температуры вблизи центра. Высотное барическое и среднее термическое поле нижней тропосферы имеют волнообразный изгиб. Позади приземного центра расположена ложбина барического поля, несколько впереди - гребень. И ложбина и гребень выражены слабо. Ложбина термического поля также расположена позади приземного центра, а гребень - впереди, причем термическое поле несколько отстает от барического. Позади приземного центра имеет место адвекция холода, впереди - адвекция тепла (см. рис. II, на котором жирными сплошными линиями даны изобары у земли, тонкими сплошными линиями - изогипсы AT_{700} , пунктирными - изогипсы $OT_{\frac{500}{1000}}$ и пунктирами с точкой - оси ложбин и гребней на карте AT_{700}).

Термическое и барическое поле этой стадии способствует углублению циклона. В самом деле, почти над центром приземного циклона располагается высотный гребень, который должен усиливаться вследствие значительной адвекции тепла впереди и адвекции холода — в тылу волнового циклона. Развитие термического гребня способствует усилению циклонической циркуляции у поверхности земли и антициклонической — на высотах. Таким образом, термический фактор в этой стадии способствует углублению циклона.

При указанном положении барической ложбины и гребня циклоническая кривизна в направлении потока уменьшается, сменяясь антициклональной кривизной. Поэтому перенос вихря также способствует углублению циклона.

Восходящие потоки не очень интенсивны, поэтому они не приводят к резкому снижению температуры слоя и заметному росту давления.

Адвективное падение давления расположено под областью наибольшей адвекции тепла, т.е. перед приземным теплым фронтом. Адвективный рост давления наблюдается под областью наибольшей адвекции холода, т.е. за холодным фронтом.

Область падения давления, обусловленная вихревым фактором, всегда расположена между осью гребня и осью ложбины барического поля нижней тропосферы. Т.к. в первой стадии ось барического гребня расположена несколько впереди приземного центра, а ось барической ложбины — позади, то вихревое падение давления отмечается в центральной части приземного циклона.

В передней части циклона вихревое падение давления накладывается на падение, обусловленное термическим фактором, поэтому здесь наблюдается область наибольшего падения, в сторону которого и перемещается циклон у земли. В тыловой части наблюдается наложение вихревого падения на термический рост давления, поэтому небольшие отрицательные тенденции, здесь постепенно сменяются положительными.

С т а д и я м о л о д о г о ц и к л о н а . Во второй стадии у поверхности земли циклон оформлен несколькими замкнутыми изобарами. Иногда замкнутые изогипсы наблюдаются и на карте поверхности 700 мб.

Теплый и холодный участки фронта сближены, поэтому у земли хорошо выражен теплый сектор циклона (рис.12).

На высоте циклону также соответствует фронтальная зона, но наибольшие контрасты температуры смещены к юго-западу относительно приземного центра. Это смещение вызвано тыловой адвекцией холода в предыдущей стадии развития. Фронтальная зона как в термическом, так и в барическом поле в этой стадии испытывает еще больший волнообразный изгиб так, что отдельные участки

фронтальной зоны приобретают меридиональное направление.

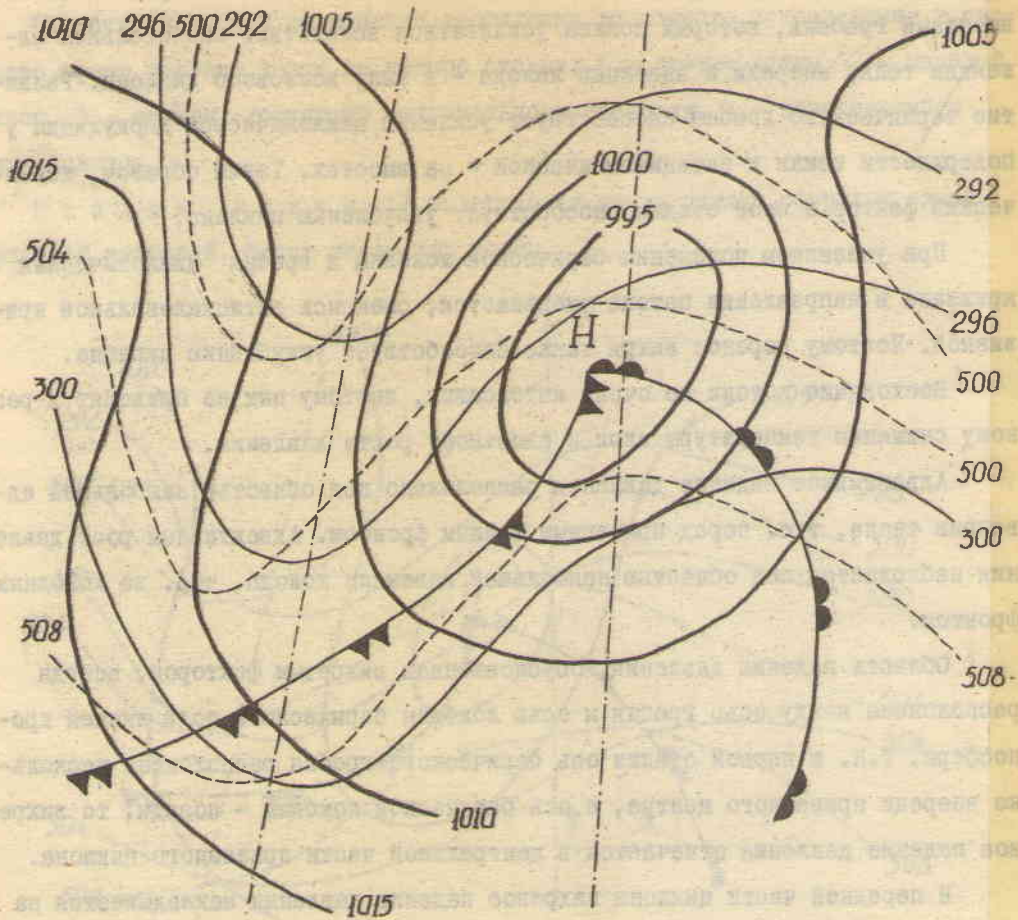


Рис. 12

Барический и термический гребни расположены почти над центром циклона и выражены лучше, чем в первой стадии.

Позади приземного центра расположены ложбины термического и барического полей, причем в этой стадии они расположены ближе к центру, чем в первой стадии. Взаимное положение термического и барического полей сохраняется, вследствие чего сохраняется и характер адвекции. И термический, и вихревой факторы обеспечивают дальнейшее углубление циклона.

В этой стадии сказывается влияние вертикальных токов. Так как циклон как замкнутая область прослеживается до средних высот, то в этой стадии лучше развиты восходящие токи, которые приводят к понижению температуры в центральной части циклона. Понижение температуры при восходящих токах несколько ослабляет понижение давления за счет адвекции температуры и вихря скорости.

Стадия наибольшего развития циклона
Эта стадия соответствует моменту наибольшего углубления циклона у земли, после которого обычно начинается его заполнение.

У поверхности земли циклон характеризуется большим числом замкнутых изобар и большими барическими градиентами. Холодный и теплый участки фронта сближены и смыкаются между собой, т.е. происходит окклюдирование циклона.

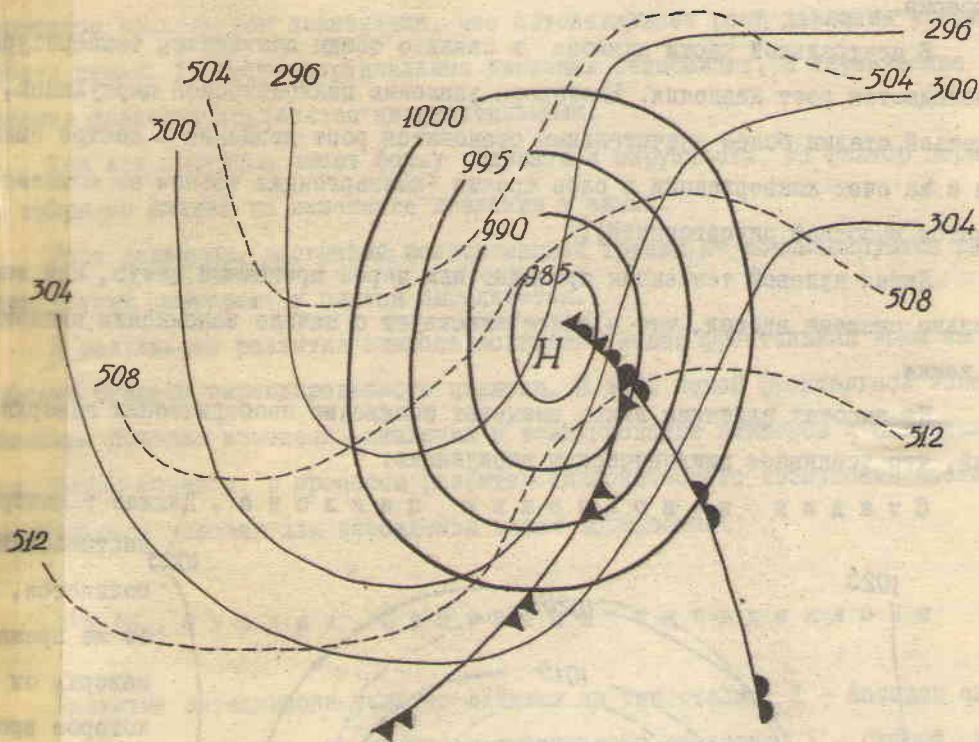


Рис. 13

Замкнутая циклоническая циркуляция в этой стадии обнаруживается как на поверхности 700 мб, так и на поверхности 500 мб, где центр циклона смещен несколько к западу или северо-западу по отношению к приземному. На более высоких уровнях приземному циклону соответствует ложбина барического поля.

Фронтальная зона на картах АТ₅₀₀ и АТ₇₀₀ еще больше сдвинута относительно приземного циклона в его теплую южную часть. Температура воздуха над приземным центром циклона ниже, чем в предыдущей стадии. Снижение обусловлено как адвекцией, так и восходящими токами.

Гребень тепла становится более узким и смещается на северо-восточную периферию. Ложбина холода располагается близко к центру приземного циклона.

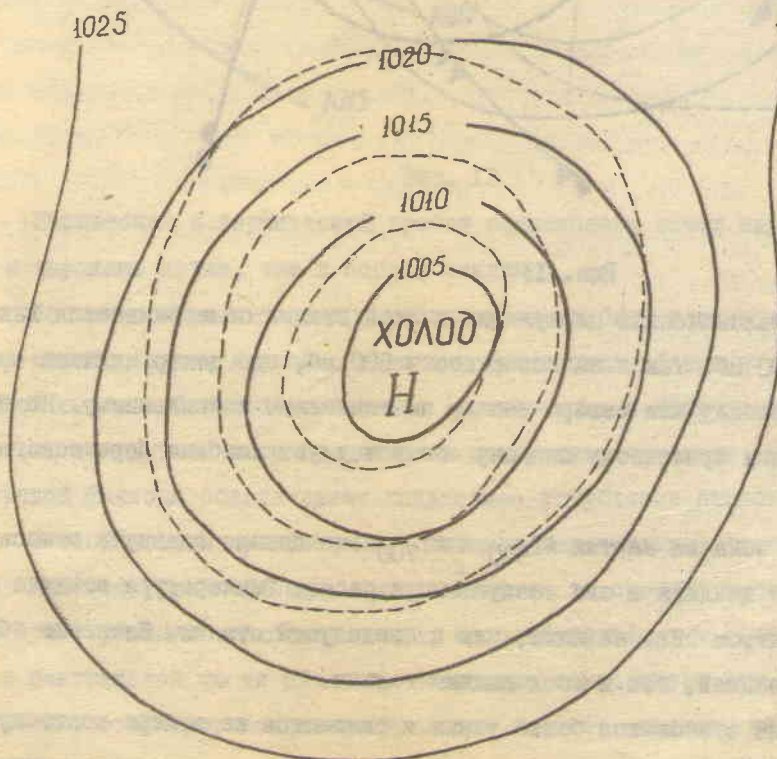
Тыловая граница падения давления, вызванного переносом вихря, расположена вблизи центра циклона, что обуславливает сближение приземного и высотных барических центров. Интенсивность падения давления в центре циклона в связи с ослаблением потоков на высотах уменьшается. Фактор переноса вихря дает значительное падение давления у точки окклюзии, где проходит фронтальная зона и наблюдаются наиболее значительные скорости ветра. Области наибольших адвективных изменений температуры также смещены на периферию.

В центральной части циклона в связи с общим понижением температуры наблюдается рост давления. Благодаря усилению циклонической циркуляции, в третьей стадии более значительным становится рост давления в центре циклона и за счет конвергенции в слое трения (конвергенция трения не компенсируется высотной дивергенцией).

Линия нулевой тенденции проходит или через приземный центр, или несколько смещена вперед, что и свидетельствует о начале заполнения циклона у земли.

На высотах адвекция вихря вызывает понижение изобарических поверхностей, что усиливает циклоническую циркуляцию.

Стадия заполнения циклона. Циклон у поверхности земли за-



ности земли заполняется, в то же время наверху он некоторое время еще развивается. Холодные массы воздуха занимают всю центральную часть циклона и постепенно происходит почти полное совмещение приземного и высотного барических центров

Рис. 14

с центральной частью области холода. Циклон становится высоким холодным барическим образованием.

Циклонический вихрь выражен до больших высот и часто распространяется на нижнюю часть стратосферы. На уровне поверхности 500 мб циклон выражен лучше, чем у земли.

Изогипсы и изотермы проходят почти параллельно, и адвективные изменения температуры и давления в области циклона весьма малы.

В начальный период этой стадии продолжается понижение температуры, вызванное восходящими движениями, что обуславливает рост давления у поверхности земли. Но затем вертикальные движения ослабевают, и термические изменения давления становятся незначительными.

Так как изогипсы имеют форму близкую к окружности, то фактор переноса вихря не влияет на изменение давления у земли.

Рост давления, вызванный конвергенцией трения, не компенсируется влиянием других факторов и циклон заполняется.

В результате развития циклона возникает новая фронтальная зона на периферии старого оклюдированного циклона. В этой новой фронтальной зоне возможны большие изменения давления и возникновение циклонов и антициклонов. Таким образом, в процессе развития циклонического возмущения постепенно создаются условия для зарождения новых возмущений.

§ 16 . С т а д и и р а з в и т и я а н т и ц и к л о н а

Развитие антициклона условно делится на три стадии: 1 - молодой антициклон, 2 - антициклон, достигший максимального развития, 3 - старый, разрушающийся антициклон.

С т а д и я м о л о д о г о а н т и ц и к л о н а . (рис. 15). У поверхности земли область высокого давления оформлена в виде гребня, возникшего в тылу циклона, часто на северной периферии старого теплого антициклона.

Фронт у земли проходит значительно южнее гребня.

На высотах над гребнем проходит хорошо выраженная фронтальная зона с большими градиентами температуры непосредственно над осью гребня.

С высотой антициклон затухает, и на АТ₇₀₀ ему соответствует лишь волнообразная форма изогипс и изотерм.

Высотные гребни термического и барического полей расположены позади приземного, при этом термический гребень несколько отстает от барического. В соответствии с этим в передней части вновь возникающего антициклона

наблюдается адвекция холода, в тыловой — адвекция тепла.

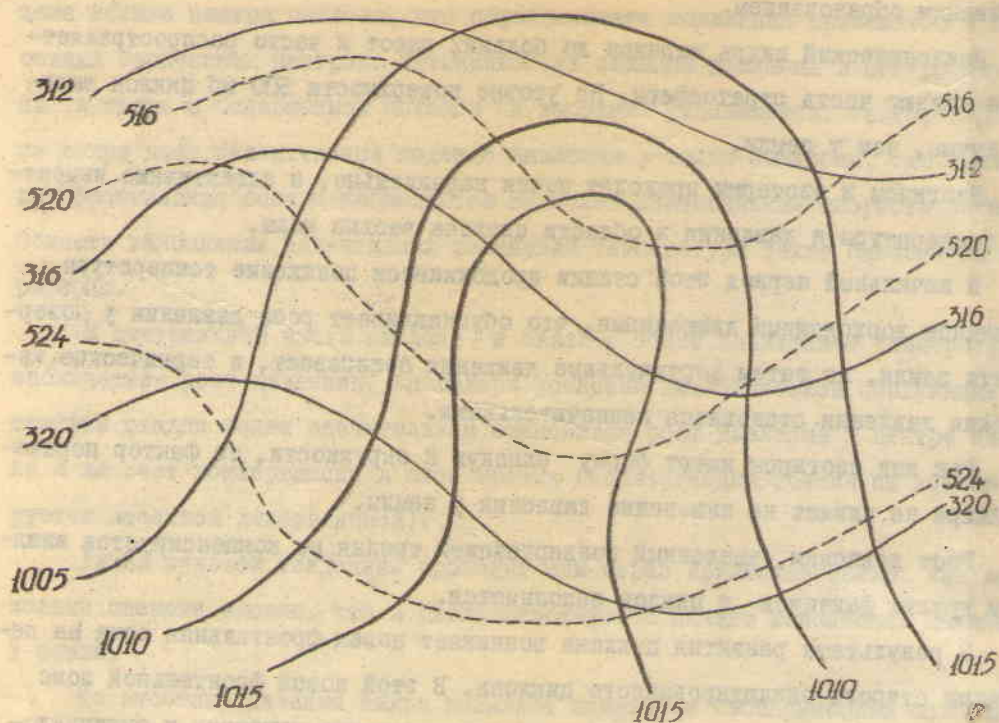


Рис. 15

Впереди приземного гребня располагается барическая ложбина, усиливающаяся за счет адвекции холода. Поэтому за счет термического фактора происходит увеличение выпуклости нижних изобарических поверхностей. Антициклон усиливается. В верхней части тропосферы увеличивается циклонический прогиб изобарических поверхностей или ослабевает антициклональный.

Так как в направлении потока антициклональная кривизна, уменьшаясь, сменяется циклонической, то перенос вихря также способствует усилению антициклона. Рост давления, вызванный переносом вихря, распространяется почти на все пространство занятое гребнем. Термический рост давления наблюдается в передней части антициклона, в результате здесь отмечается наибольший рост. Сюда, в переднюю часть и смещается вновь возникший гребень у земли.

Стадия максимального развития. (рис. 16)
У поверхности земли антициклон очерчивается несколькими замкнутыми изобарами. В нижних слоях тропосферы антициклон по-прежнему располагается в массе холодного воздуха.

Нисходящие движения становятся значительными и обуславливают заметное повышение температуры над антициклоном и сдвиг зоны наибольших температурных контрастов на его периферию. В соответствии с этим, тыловой гребень тепла располагается ближе к центру антициклона, а ложбина холода становится

более узкой и оттесняется от центра антициклона вперед. Горизонтальные контрасты температуры на высотах над антициклоном заметно уменьшаются.

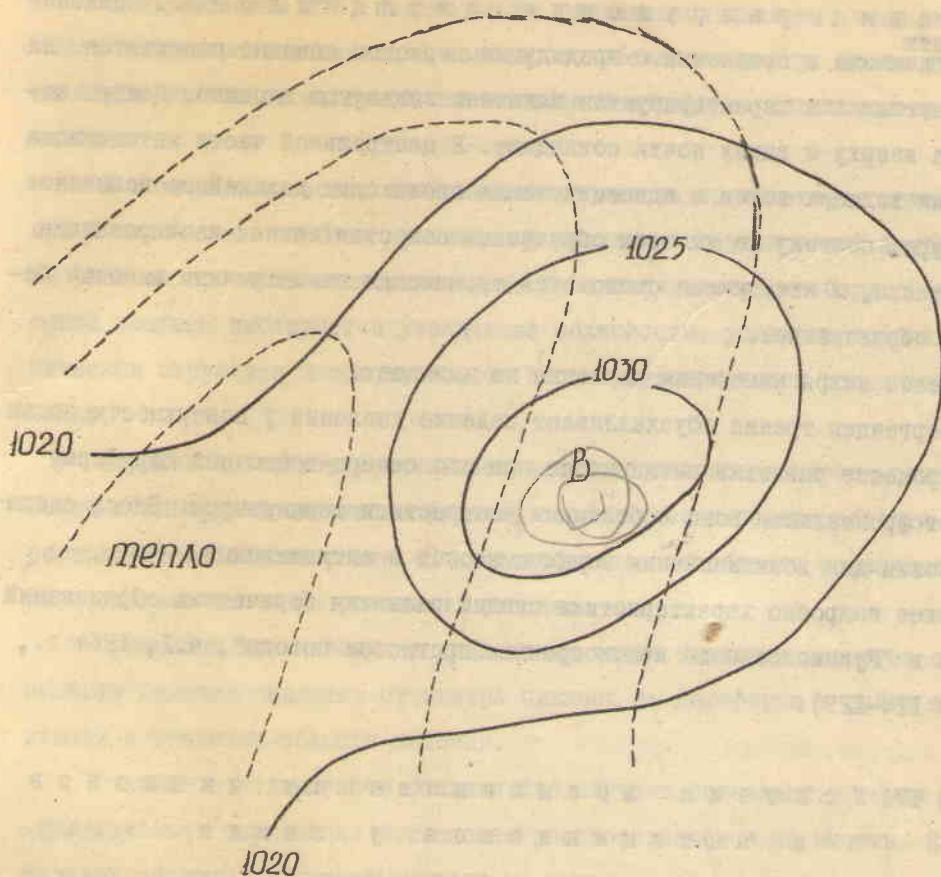


Рис. 16

Высотный гребень и ложбина барического поля сдвинулись вперед по отношению к антициклону у поверхности земли и усилился. Его ось лишь незначительно смещена в тыловую часть антициклона. Ось термического гребня смещена по отношению оси барического гребня. Градиенты давления над антициклоном уменьшились.

В передней части антициклона поперекнему наблюдается адвекция холода и термический рост давления. Над центром антициклона температура повышается за счет нисходящих движений. Это вызывает падение давления. В тылу антициклона наблюдается адвективное падение давления.

Перенос вихря обуславливает рост давления в центральной части антициклона, но линия нулевого вихревого изменения давления сближается с центром циклона.

Рост давления, вызванный переносом вихря, существенно не превышает величины падения, обусловленной термическим фактором. Приземная дивергенция трения также вызывает падение давления. Поэтому в центре антициклона созда-

ются условия для понижения давления.

Стадия разрушения антициклона. Давление ^{анти} в центре циклона в сравнении с предыдущим периодом заметно понижается. На высотах антициклон характеризуется наличием замкнутых изогипс. Центры антициклона вверху и внизу почти совпадают. В центральной части антициклона за счет нисходящих токов и адвекции тепла происходит дальнейшее повышение температуры, поэтому на высотах образуется самостоятельная изолированная область тепла, и антициклон становится термически симметричным высоким барическим образованием.

Перенос вихря изменения давления не вызывает.

Дивергенция трения обуславливает падение давления у поверхности земли. В процессе развития антициклона на его северо-восточной периферии возникает фронтальная зона с большими контрастами температуры. Здесь создаются условия для возникновения новых циклонов и антициклонов.

(Более подробно характеристика стадий развития барических образований изложена в "Руководстве по краткосрочным прогнозам погоды", ч. I, 1964 г., страницы II4-II9).

§ 17. У с л о в и я в о з н и к н о в е н и я ц и к л о н о в и а н т и ц и к л о н о в у з е м л и

Циклоны у поверхности земли возникают на стационарных и холодных фронтах, а также вблизи точек окклюзии старых циклонов. На теплых фронтах циклоны возникают очень редко.

Большая часть циклонов возникает на фронтах, хорошо прослеживающихся во всей толще тропосферы. Если фронты прослеживаются на всех высотах, но выражены слабо, то циклоны на них возникают редко, а возникшие циклоны не достигают большой глубины. На приземных фронтах возникают только устойчивые волны. Если фронты слабо выражены у земли, но хорошо — на высотах, то на них могут возникать циклоны, в зоне конвергенции которых фронты обостряются и у земли.

Фронтам, на которых развивается циклоническая деятельность, на высоте соответствует хорошо выраженная фронтальная зона. Контрасты температуры в ней обычно превышают $8-12^{\circ}$ на 1000 км. Возникновению циклона у земли предшествует волнообразный изгиб ФВЗ, причем новые циклоны возникают в передней части высотной ложбины или тыловой части гребня, под зоной циклонически искривленных расходящихся изогипс, кривизна которых убывает по течению

Вероятность возникновения новых циклонов возрастает, если в тылу ложбины наблюдается интенсивная адвекция холода, ослабевающая к югу.

К образованию ВФЗ, под которыми развиваются циклоны, чаще всего приводит односторонняя адвекция холода, ослабевающая к югу. Новые циклоны чаще всего возникают на южной или восточной периферии интенсивного залива холода.

У поверхности земли возникновению циклона предшествует развитие вытянутой ложбины со слабыми градиентами давления. Внутри такой ложбины иногда удается провести замкнутую, хотя бы промежуточную, изобару. Если внутри такой ложбины наблюдается увеличение облачности, усиление осадков и циклоническая структура потоков, то все это служит признаком возникновения циклонов.

Хорошим признаком возникновения новых циклонов является падение давления в зоне малоподвижного фронта, особенно если позади области падения расположится область роста. Но изаллобарические области появляются лишь за несколько часов до развития циклона.

Признаком возникновения циклонов у точки окклюзии является смещение области падения давления от центра циклона на периферию в район точки окклюзии и усиление области падения.

Циклоны в подавляющем большинстве случаев возникают у земли и затем циклоническая циркуляция постепенно распространяется на высоты. В редких случаях циклоны возникают сначала на высотах, затем циклоническая циркуляция охватывает и приземный слой. Такие циклоны очень быстро становятся малоподвижными.

Антициклоны также возникают под хорошо выраженными высотными фронтальными зонами. У поверхности земли антициклоны возникают не на фронте, а, как правило, позади холодных фронтов. Ввиду приземной дивергенции потоков приземные фронты прослеживаются лишь на периферии антициклонов.

Развитию антициклона у земли предшествует развитие гребня с разреженными изобарами. Внутри такого гребня формируется хорошо выраженная область роста давления.

При развитии антициклона у земли на высотах отмечается волнообразный изгиб изогипс, причем, приземный гребень располагается в тылу высотной ложбины или впереди высотного гребня.

Над областью вновь возникающего антициклона, или несколько впереди его, должна быть адвекция холода на среднем уровне и сходимости антициклонически искривленных потоков при уменьшении антициклонической кривизны вдоль потока.

§ 18. Эмпирические методы расчета скорости и направления движения циклонов у поверхности земли

В настоящее время существует большое число эмпирически установленных правил для определения скорости и направления перемещения барических образований. Каждый из методов основан на каком-либо одном факторе и не учитывает всю совокупность факторов, влияющих на движение циклонов и антициклонов. Поэтому в практической работе необходимо применять все правила и сопоставлять результаты, полученные на основании использования всех методов. В случае совпадения выводов, полученных из всех правил прогноз перемещения циклонов и антициклонов трудностей не вызывает.

В случаях, когда из разных правил получаются противоречивые результаты, путем физического анализа необходимо установить, какие закономерности управляют развитием данного барического образования и после этого применять соответствующее правило.

Некоторые из правил в отдельных случаях могут быть неприменимы по причине отсутствия фактора, на котором базируется это правило. Например, правило ведущего потока неприменимо в случаях, когда на высотах имеет место замкнутая циркуляция.

В последующих разделах излагаются известные в настоящее время и применяемые на практике методы прогноза направления, а в некоторых случаях и скорости перемещения барических образований.

1. Метод формальной экстраполяции

При прогнозах на небольшой срок (например, на 6-12 часов) можно считать, что все барические образования в последующий период будут смещаться так же, как они смещались в предыдущие сутки. Т.е. можно экстраполировать и скорость, и направление смещения барических центров.

Экстраполяция может быть как прямолинейной, так и криволинейной, с учетом и без учета ускорения.

При прямолинейной экстраполяции без учета ускорения достаточно иметь карту за один предшествующий срок. По положению центра циклона (антициклона) в исходный и текущий срок определяется его движение в предшествующий период и далее считается, что в последующий период циклон (антициклон) будет смещаться в том же направлении и с той же скоростью.

При криволинейной экстраполяции с учетом ускорения необходимо иметь несколько предшествующих карт, по которым строятся траектории смещения центров, затем эти траектории экстраполируются на срок прогноза. При этом

учитывается, что в местах резкого искривления траекторий скорость смещения центров уменьшается, а на прямолинейных участках — увеличивается. На



Рис. 17

рис. 17 пунктиром показано будущее смещение центров.

2. Правило изотермы.

Правило изотермы было предложено Броуновым в работе "Поступательное движение циклонов и антициклонов в Европе и преимущественно в России" (1882 г.). Броунов установил, что: "барометрический минимум у земли в течение суток движется близко к направлению изотерм, линий равных отклонений и линий равных абсолютных влажностей, проходящих вблизи его центра утром данного дня, притом так, что область тепла, с большим содержанием пара остается справа". Далее он уточнил указанное правило, учитывая поворот всех указанных линий в течение суток в направлении циклонической циркуляции. Окончательно правило изотермы можно сформулировать так: циклон в течение суток перемещается в направлении утренней изотермы, проходящей через его центр, или отклоняется от нее влево в пределах 30°

3. Правило изаллобар

Правило изаллобар также было предложено Броуновым. Согласно этого правила, циклон перемещается в направлении линии, соединяющей центры областей роста и падения давления.

В атмосфере всегда имеются не только замкнутые области высокого и низкого давления, но и замкнутые области роста и падения давления — изаллобарические пары. Причем изаллобарические пары перемещаются с большей устойчивостью, чем циклоны и антициклоны, поэтому перемещение их можно экстраполировать с большей точностью, чем перемещение барических центров.

Имея изаллобарические пары за текущий и предшествующий моменты, путем экстраполяции можно установить их будущее положение. Зная будущее положение области падения давления, можно определить направление перемещения циклона. Циклон перемещается в направлении центра области падения.

4. Правило ведущего потока

В 1930 году Троицкий, а в 1940 году Кибель доказали, что в атмосфере существует ведущий поток, т.е. поток, управляющий движением синоптических шаблонов у поверхности земли. После этого была высказана мысль, что все циклоны и антициклоны перемещаются в направлении ведущего потока.

В работах И.А. Кибеля было показано, что ведущим чаще всего является

поток на уровне 700 мб, но в отдельных случаях это может быть поток на уровне поверхностей 850 или 500 мб, а иногда и на более высоких уровнях.

Поэтому, чтобы пользоваться правилом ведущего потока, сначала нужно установить на какой высоте он находится. Это можно сделать с помощью карт АТ и ОТ.

Ведущий поток характеризуется устойчивым направлением не только на данном, но и на всех вышележащих уровнях. В зоне ведущего потока изогипсы и изотермы почти параллельны.

Если на карте АТ₇₀₀ изогипсы параллельны средним изотермам, и если ветер от карты АТ₇₀₀ к карте АТ₅₀₀ мало меняется по направлению, то поток на карте АТ₇₀₀ можно считать ведущим.

Если изогипсы карты АТ₇₀₀ не параллельны средним изотермам, то изотермы нужно сопоставить с изогипсами карты АТ₅₀₀.

Если ведущий поток располагается выше уровня АТ₅₀₀, то направление и скорость его можно определить с помощью карт АТ₅₀₀ и ОТ₁₀₀₀⁵⁰⁰. Для этого достаточно сложить вектор ветра на АТ₅₀₀ с вектором термического ветра, снятым с карты ОТ₁₀₀₀⁵⁰⁰. Это положение можно сформулировать проще: если изотермы отклонены от потока, то в ту же сторону, но на меньший угол отклоняется и направление смещения барического образования у земли. Или, что то же самое, барическое образование при своем перемещении отклоняется от направления потока на АТ₇₀₀ в ту же сторону, в которую вращается ветер в слое 700-300 мб.

При перемещении циклонов по ведущему потоку нужно учитывать, что и скорость, и направление ведущего потока с течением времени изменяются. Для того, чтобы учесть последующие изменения в направлении и скорости потока, необходимо определить будущий поворот изогипсы и изменение градиента в его зоне. Перестройка высотного поля зависит от тех же факторов, что и изменение высоты изобарической поверхности, а именно: от переноса вихря вдоль потока, от адвекции температуры и от дивергенции скорости. Степень перестройки зависит от неравномерности влияния указанных факторов над различными районами и тесно связана с характером и интенсивностью эволюции барических образований у земли. Она тем больше, чем сильнее углубляется циклон или усиливается антициклон. Поэтому о характере изменения высотного барического поля можно судить и по стадиям развития приземных барических центров. В первой и последней стадиях изменение высотного поля происходит медленно, и ведущий поток в течение следующих суток можно считать таким же, как в исходный момент. Во второй стадии направление и скорость потока могут меняться очень быстро. Не учитывая эти изменения, можно допустить большие

ошибки.

Перестройка может наблюдаться и в тех случаях, когда происходит усиление адвекции холода в тылу или адвекции тепла - в передней части циклона.

При использовании правила ведущего потока необходимо учитывать и то, что барические образования не всегда перемещаются в направлении потока, даже если учтена его перестройка. Эмпирически установлено, что совпадение направления смещения барических центров с ведущим потоком тем больше, чем больше скорость ведущего потока. Так при скорости ведущего потока в 60 км/час, более чем 90% циклонов смещается в направлении потока, а при скорости в 20 км/час - лишь 55%. Можно пользоваться и обратным правилом: быстро движущиеся циклоны почти всегда перемещаются по потоку, медленно движущиеся - часто отклоняются от направления потока.

§ 19. Теория связи перемещения приземных барических центров с потоком в средних слоях тропосферы

Пусть H_0 - геопотенциал изобарической поверхности, расположенной вблизи поверхности земли, тогда для центров барических образований, где

$$\frac{\partial H_0}{\partial x} = \frac{\partial H_0}{\partial y} = 0$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial H_0}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial H_0}{\partial x} \right) + u_c \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H_0}{\partial x} \right) + v_c \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H_0}{\partial x} \right) = 0$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial H_0}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial H_0}{\partial y} \right) + u_c \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H_0}{\partial y} \right) + v_c \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H_0}{\partial y} \right) = 0 \quad 8$$

или

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial H_0}{\partial x} &= -u_c \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial H_0}{\partial x} - v_c \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial H_0}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial H_0}{\partial y} &= -u_c \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial H_0}{\partial y} - v_c \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial H_0}{\partial y} \end{aligned} \quad 9$$

где u_c и v_c - составляющие скорости смещения приземного центра.

В левую часть соотношения 9 подставим

$$H_0 = H_p - R \ln \frac{p_0}{p} \bar{T},$$

где p - давление на любой вышележащей поверхности, тогда

$$-\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial H_p}{\partial x} + R \ln \frac{p_0}{p} \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} = u_c \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial H_0}{\partial x} + v_c \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial H_0}{\partial x}$$

$$-\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial H_p}{\partial y} + R \ln \frac{p_0}{p} \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} = u_c \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial H_0}{\partial y} + v_c \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial H_0}{\partial y}$$

На изобарической поверхности p выберем систему координат так, чтобы ось x проходила в направлении касательной к изогипсе, а ось y - в направлении нормали в сторону низких значений геопотенциала. Обозначим скорость смещения приземного барического центра через C , тогда из соотношения 10 получим

$$C_s \frac{\partial^2 H_0}{\partial S^2} = R \ln \frac{P_0}{P} \frac{\partial}{\partial S} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial S} \frac{\partial H_p}{\partial t} - C_n \frac{\partial^2 H_0}{\partial S \partial n} \quad \text{II}$$

$$C_n \frac{\partial^2 H_0}{\partial n^2} = R \ln \frac{P_0}{P} \frac{\partial}{\partial n} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial n} \frac{\partial H_p}{\partial t} - C_s \frac{\partial^2 H_0}{\partial S \partial n}, \quad \text{I2}$$

где C_s - составляющая движения приземного барического центра в направлении потока на поверхности p , C_n - составляющая движения приземного барического центра в направлении нормали к потоку на уровне p .

Из формулы II видно, что составляющая движения в направлении потока на уровне p (C_s) зависит от трех факторов;

1. От градиента средних изаллотерм слоя $P_0 - P$ в направлении потока S

$(R \ln \frac{P_0}{P} \frac{\partial}{\partial S} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t})$. Приземный циклон ($\frac{\partial^2 H_0}{\partial S^2} > 0$) смещается туда, где средняя температура слоя повышается больше, или в ту сторону, где средняя температура понижается меньше. Антициклон ($\frac{\partial^2 H_0}{\partial S^2} < 0$) смещается в сторону наибольшего понижения или наименьшего повышения средней температуры слоя.

2. От градиента изаллогипс поверхности p в направлении потока S

$$\left(-\frac{\partial}{\partial S} \frac{\partial H_p}{\partial t}\right)$$

Циклон смещается в ту сторону, где H_p уменьшается быстрее или увеличивается медленнее. Антициклон смещается в сторону наибольшего повышения или наименьшего снижения поверхности p .

3. От степени эллиптичности приземных изогипс $(-C_n \frac{\partial^2 H_0}{\partial S \partial n})$

Влияние этого фактора, как правило, слабее влияния первых двух факторов и им можно пренебречь.

Из формулы I2 следует, что приземные барические центры могут иметь и составляющую движения в направлении нормали к изогипсам поверхности

p (C_n). Опыт показывает, что величина $\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial t}\right)$ мала, поэтому C_n определяется в основном вторым и третьим членами формулы I2.

Если

$$\frac{\partial}{\partial n} \frac{\partial H_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial H_p}{\partial n}\right) < 0$$

это означает, что со временем градиент геопотенциала $\frac{\partial H_p}{\partial n}$ над приземным центром уменьшается. Тогда, если $\frac{\partial^2 H_0}{\partial n^2} > 0$ (циклон), то $C_n > 0$ - центр циклона смещается в направлении нормали n , т.е. в сторону высокого давления

(вправо от потока). В антициклоне $\frac{\partial^2 H}{\partial n^2} < 0$, поэтому при уменьшении градиента геопотенциала над приземным антициклоном он смещается в сторону низкого давления, т.е. влево от потока на уровне p .

Если градиент геопотенциала со временем растет $-\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial H_p}{\partial n} \right) > 0$, то центр приземного циклона отклоняется влево, а центр приземного антициклона - вправо от потока на поверхности p .

Поскольку C_s всегда > 0 , то знак C_n в зависимости от второго фактора $\left(C_s \frac{\partial^2 H_0}{\partial s \partial n} \right)$ определяется формулой

$$C_n = -C_s \frac{\partial^2 H_0}{\partial s \partial n} : \frac{\partial^2 H_0}{\partial n^2}.$$

Если $\frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\partial H_0}{\partial n} \right) \geq 0$ и $\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{\partial H_0}{\partial n} \right) \geq 0$, то $C_n < 0$, т.е. центр приземного барического образования отклоняется влево от высотных изогипс.

Если $\frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\partial H_0}{\partial n} \right) \leq 0$, а $\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{\partial H_0}{\partial n} \right) \geq 0$, то приземный центр при своем движении отклоняется вправо от высотных изогипс.

Лишь в тех случаях, когда приземное барическое образование оформлено круговыми изобарами, а изменение давления в них пропорционально адвекции температуры, центры их смещаются в направлении высотного потока.

При практическом расчете нормальной к потоку составляющей движения приземных центров можно считать, что

$$C_n \approx - \frac{\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial H_p}{\partial n}}{\frac{\partial^2 H_0}{\partial n^2}} \quad 13$$

Если изменение градиента геопотенциала $\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial H_p}{\partial n}$ выразить в геопотенциальных декаметрах на 1000 км за сутки, а производную $\frac{\partial^2 H_0}{\partial n^2}$ заменить через $\frac{\partial^2 p_0}{\partial n^2}$ и выразить в $\frac{мб}{(500 км)^2}$ (вычисляя через конечные разности давления в точках, отстоящих от центра на 500 км), то рабочая формула для C_n будет иметь вид:

$$C_n = -312 \frac{\frac{\partial^2 H_p}{\partial t \partial n}}{\frac{\partial^2 p_0}{\partial n^2}} \quad км/сутки \quad 14$$

Для барических образований, диаметр которых составляет 500 и менее километров, при расчете производной $\frac{\partial^2 p_0}{\partial n^2}$ нужно брать давление на расстоянии 250 км от центра циклона, тогда коэффициент в рабочей формуле 14 будет равен 78.

При применении формулы 14 прогноз смещения барических центров рекомендуется вести двумя этапами.

Сначала по исходной и прогностической картам (АТ₇₀₀ или АТ₅₀₀) строится траектория смещения центра в предстоящие сутки (аналогично тому, как строится траектория смещения частицы) и затем для средней точки траектории проводится расчет C_n . Величина C_n откладывается в соответствующую сторону по нормали к траектории в конечной ее точке.

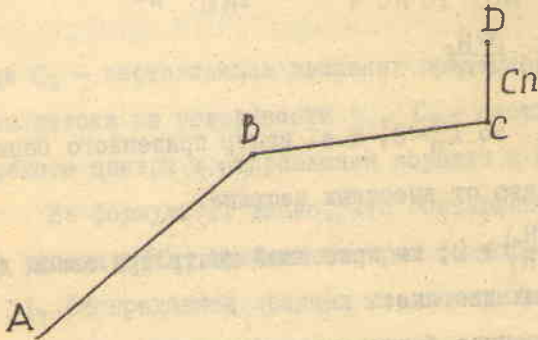


Рис. 18

лежать правее точки С.

Скорость смещения приземных барических центров чаще всего принимается равной 0.8 от скорости фактического или геострофического ветра на уровне поверхности 700 мб, и 0.6 от скорости на уровне поверхности 500 мб. Коэффициенты 0.8 и 0.6 являются средними значениями, фактическая величина этих коэффициентов зависит от скорости ветра на соответствующем уровне. Величина на коэффициента пропорциональности между скоростью смещения центра циклона и скоростью потока тем больше, чем меньше скорость потока. Эмпирически установлено, что соотношение между скоростью на уровне 700 мб и значением коэффициента можно характеризовать таблицей I.

Таблица I

Скорость потока на уровне поверхности 700 мб в км/час :	30	:	30-40	:	50	:	60
Значение коэффициента	1.5		1.0		0.8		0.7

Для антициклонов такой зависимости не найдено. Поэтому при прогнозе смещения антициклонов коэффициент пропорциональности между скоростью движения центра антициклона и скоростью на АТ₇₀₀ берется равным 0.8.

§ 20. Метод Рафаиловой Х. Х.

Рафаилова предложила метод вычисления скорости и направления перемеще-

ния барических образований с помощью карт аномалий средней температуры слоя 500 - 1000 мб.

На карты аномалий температуры, которые составляются ежедневно, около каждого пункта наносятся разности между фактическим значением $OT_{\frac{500}{1000}}$ и его средним значением. Фактические значения берутся с текущей карты, а средние значения - из работы "Трехдневные нормы $OT_{\frac{500}{1000}}$ ", изданной в 1958 г.

На карте аномалий $OT_{\frac{500}{1000}}$ проводится нулевая изаномала и все изаномалы, кратные четырем, в результате чего оформляются обширные области положительных и отрицательных аномалий температуры, т.е. области тепла и холода.

Теория метода Рафаиловой основана на том, что при увеличении положительной аномалии средней температуры слоя или уменьшении отрицательной давление у земли понижается. При увеличении отрицательной и уменьшении положительной аномалии средней температуры слоя давление у земли растет.

Нулевая изаномала лежит между областями холода и тепла и соответствует районам с наибольшими контрастами температур. Поэтому формирование и развитие барических образований в подавляющем большинстве случаев происходит вблизи особой точки нулевой изаномалы.

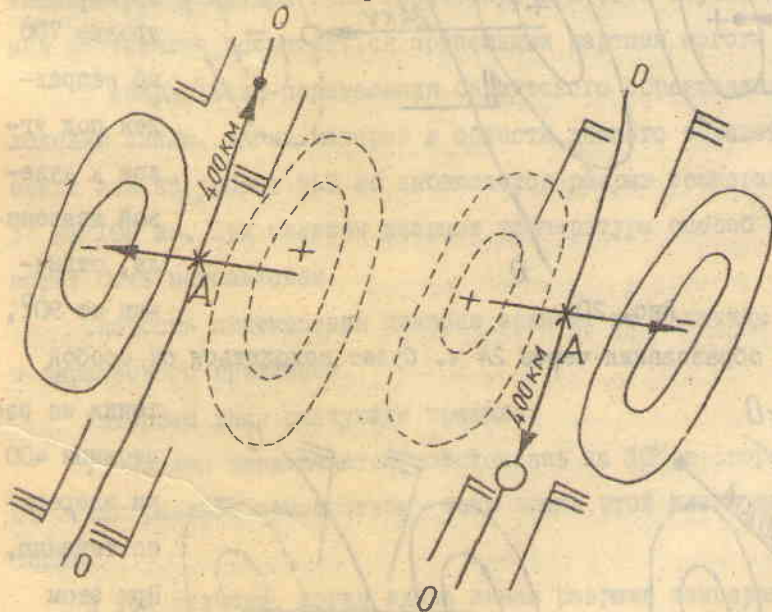


Рис. 19

Особой называется точка пересечения нулевой изаномалы с линией, соединяющей центры соседних очагов аномалии противоположного знака (точка А, рис.19). В случае, когда интенсивность очагов аномалии не одинакова, особая точка располагается не на нулевой

изаномале, а смещена от нее в сторону очага большей интенсивности на величину, равную полуразности значений аномалии в центрах очагов.

Рафаиловой дано несколько правил перемещения центров циклонов. Приведем некоторые из них¹⁾.

¹⁾ все правила можно найти в работе Х.Х.Рафаиловой

1. Если в районе особой точки поток на уровне 700 мб параллелен нулевой изаномале, то центр барического образования у поверхности земли через 24 ч. будет находиться на этой нулевой изаномале на расстоянии около 400 км от особой точки по течению (рис.19).

2. Если в районе особой точки поток на уровне 700 мб перпендикулярен нулевой изаномале, то центр циклона у поверхности земли через 24 ч. будет находиться на нормали к нулевой изаномале, направленной от особой точки в сторону очага положительной аномалии (рис.20) на расстоянии от особой точки, равном $24KV$, где V - скорость ветра в км/час на уровне AT_{700} , K - коэффициент.

Значения коэффициента "К" зависят от скорости ветра на уровне 700 мб. Эта зависимость дана в ниже следующей таблице:

V	30	40	50	60	70	80	90	100 км/час
K	0.71	0.74	0.75	0.77	0.82	0.85	0.87	0.92

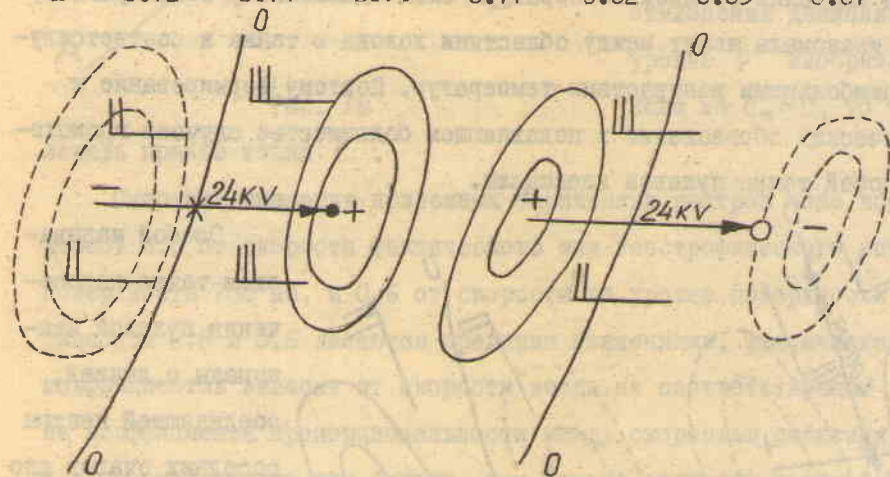


Рис. 20

то центр барического образования через 24 ч. будет находиться от особой

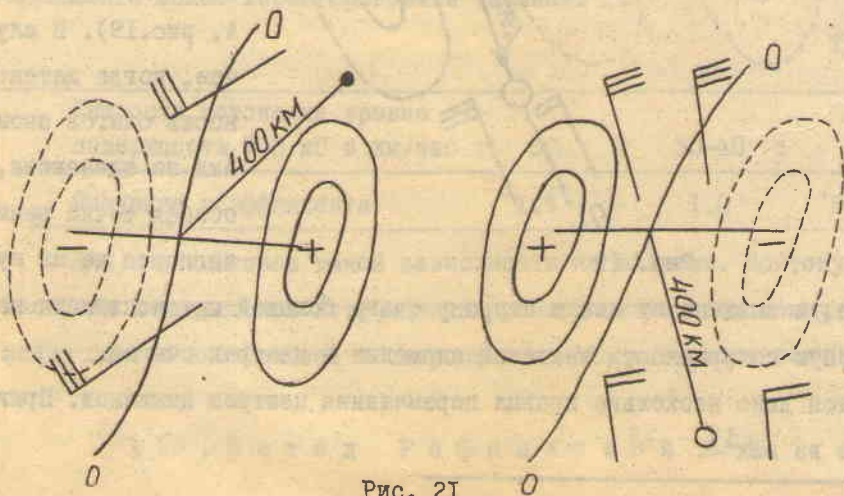


Рис. 21

3. Если в районе особой точки поток на уровне 700 мб направлен под углом к нулевой изаномале, отличным от 90° ,

то центр барического образования через 24 ч. будет находиться от особой точки на расстоянии 400 км впереди по течению. При этом циклоны будут отклоняться от нулевой изаномалы в сторону положи-

тельного очага аномалии, а антициклоны - в сторону отрицательного очага аномалии на угол, равный 45° (рис. 21.)

Проверка правил Рафаиловой на процессах, определяющих погоду равнинного Казахстана, показала хорошую оправдываемость. Эта проверка была проведена студентом КазГУ Кенжебаевым Н. под руководством автора данной работы.

§ 21. Метод Кашина и Гриценко М.В.

По Кашину и Гриценко, изменения давления у поверхности земли определяются изменениями температуры в слое атмосферы между землей и ближайшим уровнем нулевого изменения давления. Высота, на которой в данный момент находится уровень нулевого изменения давления, зависит от величины изменения температуры во времени. Чем сильнее изменяется температура, тем ниже лежит уровень нулевого изменения давления.

Таким образом, при больших контрастах температуры воздуха изменения давления у поверхности земли определяются, главным образом, изменениями температуры в нижнем слое тропосферы и в этом случае для прогноза давления достаточно пользоваться приземными картами погоды и картами АТ₈₅₀.

О направлении перемещения барического образования можно судить по положению линии, вдоль которой в области данного образования у поверхности земли или на уровне 850 мб наблюдается разрыв температуры не менее, чем в 3° на 100 км. При меньшем разрыве температуры способ Кашина и Гриценко не может быть использован.

Скорость перемещения циклона зависит от величины разрыва температуры и барического градиента.

Авторами даны следующие правила:

1. Циклон перемещается отклоняясь на 30° в сторону холодного воздуха от линии разрыва температуры, если вдоль этой линии наблюдается адвекция тепла.

В тех случаях, когда вдоль линии разрыва температуры наблюдается двухсторонняя адвекция тепла и холода, циклон перемещается в направлении совпадающем с этой линией.

При наличии в области циклона двух или трех линий разрыва, берется первая из них, если смотреть в сторону, противоположную направлению движения воздуха.

Длина пути, который пройдет циклон за сутки, определяется по графику, который получен эмпирическим путем (рис. 22).

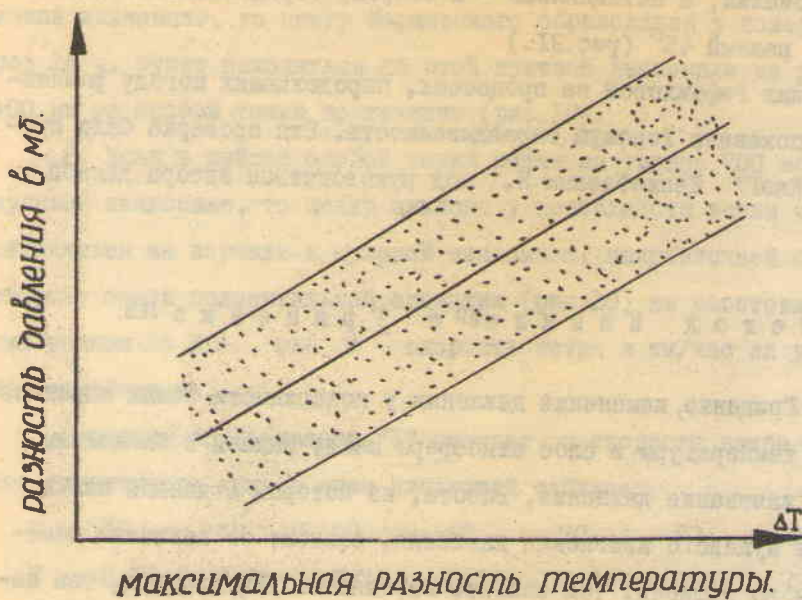


Рис. 22

На графике по оси X отложена величина максимальной разности температуры, наблюдающейся вдоль линии разрыва у поверхности земли или на уровне 850 мб на расстоянии 400 км (по 200 км в ту и другую сторону от линии разрыва), а по оси ординат

— длина пути циклона за сутки, выраженная в миллибарах. Циклон перемещается в ту точку (вдоль линии разрыва или отклоняясь от нее на 30°), в которой в данный момент давление отличается от давления в центре на величину, найденную по графику. Таким образом, циклон переместится на тем большее расстояние, чем меньше барические градиенты в его передней части.

2. Если путь циклона, найденный согласно правилу I, должен пересечь область адвекции холода, наблюдающейся у поверхности земли или на уровне 850 мб где-то впереди циклона, то последний переместится вдоль найденного пути только до места встречи с адвекцией холода.

3. Антициклон перемещается на линию разрыва температуры, вдоль которой наблюдается адвекция холода. Центр антициклона через 24 ч. будет находиться на линии разрыва на середине отрезка, соединяющего точки с максимальным и минимальным давлением на этой линии.

При наличии в области антициклона двух или трех линий разрыва, берет-ся первая из них, если смотреть в сторону, противоположную направлению движения воздуха.

4. Если в области антициклона у поверхности земли или на уровне 850 мб контрасты температуры настолько малы, что линию разрыва провести трудно, то в случаях, когда:

- а) в передней части антициклона наблюдается адвекция тепла, он становится малоподвижным;
- б) в передней части антициклона наблюдается адвекция холода, а адвекция

тепла в его тыловой части отсутствует, антициклон становится малоподвижным и одновременно расширяется по площади.

5. Если найденный согласно правилу I путь циклона оказывается параллелен изобарам, то циклон смещается со скоростью ветра на уровне 850 мб.

Нужно иметь в виду, что правила Кашина и Гриценко не учитывают влияние гор. Поэтому, если на пути движения имеются горы, правила не применимы.

§ 22 . Расчетный метод Гандина Л.С. - - Синельниковой КК

Для вычисления скорости и направления перемещения барических образований Гандин и Синельникова использовали формулы Петерсена

$$u = - \frac{\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t}}{\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}}, \quad v = - \frac{\frac{\partial^2 P}{\partial y \partial t}}{\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}}$$

Поскольку давление P является непрерывной функцией горизонтальных координат x и y , то эту функцию можно разложить в ряд Тейлора для любой точки, в том числе и для центра циклона, т.е.

$$P = P_c + \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)(x - x_c) + \frac{\partial P}{\partial y}(y - y_c) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}\right)(x - x_c)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}\right)(y - y_c)^2 + \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y}\right)(x - x_c)(y - y_c) + \dots, \quad 15$$

где x_c и y_c - координаты центра циклона. Совместим начало координат с центром циклона, тогда при $x_c = y_c = 0$

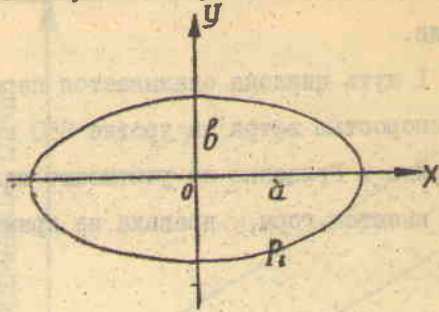
$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y} = 0.$$

Поэтому, если ограничиться вторыми членами разложения, то из 15 будем иметь

$$P = P_c + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}\right) x^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}\right) y^2 \quad 16$$

Возьмем вблизи центра одну расчетную изобару P_1 и проведем оси координат так, чтобы начало координат совпало с центром, ось x - с большой, ось y - с малой осью эллиптической изобары. Пусть длина большой оси эллипса - a , длина малой оси - b (рис. 23). Координаты точки А будут $(\frac{a}{2}, 0)$, а точки В $(0, \frac{b}{2})$. Точки А и В лежат на изобаре, поэтому координаты их

должны удовлетворять уравнению 16, поэтому



$$P_1 = P_c + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right) \frac{a^2}{4} \quad (\text{для точки A})$$

$$P_1 = P_c + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) \frac{b^2}{4} \quad (\text{для точки B}),$$

откуда находим

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{(P_1 - P_c) 8}{a^2}, \quad \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = \frac{(P_1 - P_c) 8}{b^2}$$

Рис. 23

Найденные значения вторых производных

подставим в формулы Петерсена

$$u = - \frac{a^2 \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t}}{8(P_1 - P_c)}, \quad v = - \frac{b^2 \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial t}}{8(P_1 - P_c)}, \quad 17$$

где $\frac{\partial P}{\partial x} \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right)$ и $\frac{\partial P}{\partial y} \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right)$ есть составляющие градиента изаллобар. На синоптических картах дается изотенденция, т.е. величина изменения давления за 3 часа. Если вычисляется скорость перемещения циклонов за сутки, то вместо $\frac{\partial P}{\partial t}$ необходимо брать изменения давления за 24 часа. В грубом приближении можно положить, что изменение давления в течение суток равно восьмикратной величине изотенденции. Поэтому для скорости перемещения циклона за сутки формулы 17 примут вид

$$u = - \frac{a^2 \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t}}{(P_1 - P_c)}, \quad v = - \frac{b^2 \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial t}}{(P_1 - P_c)} \quad 18$$

Из формул 18 можно сделать один очень важный вывод о направлении перемещения циклонов и антициклонов.

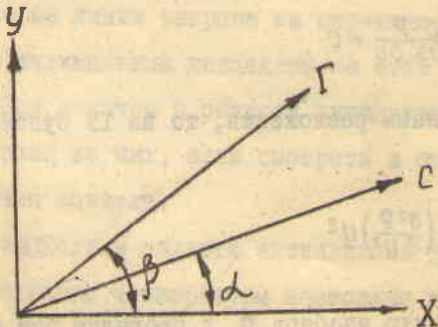


Рис. 24

Пусть Γ - градиент суточной изаллобары, C - направление перемещения барического центра (рис. 24).

Тогда

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v}{u}, \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t}}{\frac{\partial^2 P}{\partial y \partial t}},$$

где α и β углы, составляемые векторами C и Γ с осью x .

Из формул 18 следует, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{b^2 \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t}}{a^2 \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial t}}$$

Откуда

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{b^2}{a^2} \operatorname{tg} \beta \quad 19$$

Если изобары имеют круговую форму, то $a = b$ и $\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \beta$.

В этом случае центр циклона движется в сторону падения давления вдоль градиента изаллобар, т.е. вдоль линии, соединяющей центры области падения и роста давления. Центр антициклона перемещается в направлении изаллобарического асцендента.

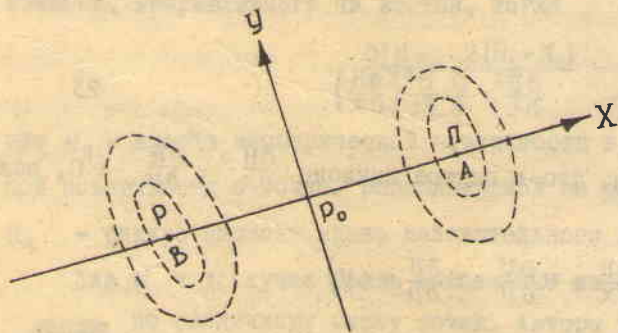
Если $\frac{b}{a} < 1$, то $\operatorname{tg} \alpha < \operatorname{tg} \beta$ и, следовательно, $\alpha < \beta$

Если изобары, оформляющие циклон, имеют эллиптическую форму, то центр циклона в течение суток перемещается в направлении между изаллобарическим градиентом и большой осью эллиптической изобары и тем ближе к оси, чем больше вытянут эллипс.

Если антициклон имеет эллиптические изобары, то центр его в течение суток перемещается между изаллобарическим асцендентом и большой осью.

§ 23 . М е т о д К л ю ч а р ё в а С.С.

Ключарёв С.С. считает, что при использовании формул Петерсена ось x следует направлять не вдоль большой оси эллиптической изобары, а через центры областей падения и роста давления (рис. 25), совмещая начало координат с экстремальной точкой в поле давления (экстремальная точка не обязательно будет находиться в центре циклона или антициклона, она может быть на оси ложбины или гребня).



После выбора осей определяются точки максимального падения и роста давления

(А и В) и для них отсчитываются величины тенденций $\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)_1$ и $\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)_2$, и величины давления P_1 и P_2 . Затем измеряется расстояние между точками А

Рис. 25

и В.

Тогда, исходя из I-й формулы Петерсена, можно записать

$$u = - \frac{\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)_1 - \left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)_2}{AB[(P_1 + P_2) - 2P_0]} \quad 20$$

По формуле 20 определяется скорость и направление перемещения точки P_0 . Если точка P_0 располагается вблизи центра, то ее скорость и направление смещения будут совпадать с таковыми для центра.

§ 24. Метод Бурцева АИ и Леонова НГ

Один М.И. предложил использовать для расчета составляющих перемещения циклонов и антициклонов формулы:

$$u_c = \frac{l^2 u'}{\partial^2 H} \quad , \quad v_c = \frac{l^2 v'}{\partial^2 H} \quad , \quad 21$$

где u' и v' — величины, пропорциональные отклонению ветра от геострофического, они определяются по начальному полю геопотенциала на нескольких уровнях. Бурцев и Леонов предлагают для прогноза перемещения циклонов использовать не агеострофические составляющие, а фактический ветер.

Уравнения движения берутся ими в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= - \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \tau \frac{\partial u}{\partial p} + \frac{g}{l} \frac{\partial H}{\partial x} - lv \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= - \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \tau \frac{\partial v}{\partial p} + \frac{g}{l} \frac{\partial H}{\partial y} + lv \right), \end{aligned} \quad 22$$

$\frac{\partial u}{\partial t}$ и $\frac{\partial v}{\partial t}$ считаются пропорциональными $\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)$ и $\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)$, а именно

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{g}{l} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right), \quad \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{g}{l} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right). \quad 23$$

Подставляя 23 в 22 и учитывая, что в центре циклона $\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\partial H}{\partial y} = 0$, получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial t} &= - \frac{l}{g} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \tau \frac{\partial v}{\partial p} + lv \right), \\ \frac{\partial^2 H}{\partial y \partial t} &= \frac{l}{g} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \tau \frac{\partial u}{\partial p} - lv \right). \end{aligned} \quad 24$$

Подставляя 24 в формулы Петерсена

$$u_c = \frac{\frac{1}{g} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \tau \frac{\partial v}{\partial p} + \tau v \right)}{\frac{\partial^2 H}{\partial x^2}}$$

$$v_c = \frac{\frac{1}{g} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \tau \frac{\partial u}{\partial p} + \tau u \right)}{\frac{\partial^2 H}{\partial y^2}}$$

25

Нелинейные члены в соотношении 25 составляют 10–15% расчетных значений u_c и v_c . Поэтому в первом приближении при расчете u_c и v_c можно использовать только линейные члены, тогда

$$u_c = \frac{1}{g} \frac{u}{\frac{\partial^2 H}{\partial x^2}}, \quad v_c = \frac{1}{g} \frac{v}{\frac{\partial^2 H}{\partial y^2}}, \quad 26$$

где u и v – составляющие скорости фактического ветра в центре циклона. Формулы 26 совпадают с формулами 21, так как в центре циклона фактические значения ветра u и v совпадают с отклонениями от геострофического.

По формулам 26 производится расчет перемещения центров циклонов на уровне АТ₈₅₀.

Величины $\frac{\partial^2 H}{\partial x^2}$ и $\frac{\partial^2 H}{\partial y^2}$ рассчитываются методами конечных разностей, поэтому очень важным является выбор шага по горизонтальным координатам. Авторы рекомендуют за горизонтальный шаг брать радиус циклона (расстояние от центра до крайней замкнутой изобары). Если циклон несимметричен, то величины $\frac{\partial^2 H}{\partial x^2}$ и $\frac{\partial^2 H}{\partial y^2}$ рекомендуется вычислять с помощью односторонних разностей. Например, при положительном u вычисление $\frac{\partial^2 H}{\partial x^2}$ производится вдоль радиуса циклона, направленного на восток, тогда

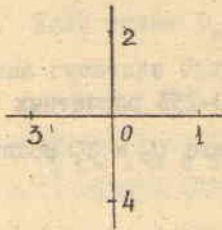
$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \frac{2(H_1 - H_0)}{R_x^2},$$

где H_0 – высота изобарической поверхности в центре, H – высота изобарической поверхности в точке, расположенной на расстоянии R_x от центра циклона, R_x – радиус циклона вдоль положительного направления оси x .

Для u и v лучше брать сглаженные их значения, полученные путем осреднения по различному числу точек. Авторы указывают, что можно проводить как простое осреднение, так и в предположении, что изменение u и v от точки к точке происходит линейно, число точек можно брать равным 9 и 25. Длину шага – 250, 500 км или радиус циклона.

§ 25 . М е т о д Л у ж н о й Н . П . д л я р а с ч е т а д в и ж е н и я ц е н т р о в а н т и ц и к л о н о в

Метод Лужной основан на использовании поля функции В на уровне 500 мб и учете перепада температуры в передней и тыловой частях антициклона.



Для прогноза по этому методу нужно иметь карту функций В, о которой мы говорили в предыдущей главе. Вычисление функции В по карте АТ₅₀₀ производится для сети точек, расположенных так, как показано на рисунке 26.

Расстояние между точками берется равным 500 км, и тогда

$$\text{Рис. 26} \quad B_0 = \frac{1}{4} (H_1 + H_2 + H_3 + H_4),$$

т.е. В является средней арифметической из значений высоты, взятой по четырем точкам.

Автор данного метода установил, что антициклон в течение суток перемещается вдоль изолинии В, которая проходит над центром антициклона у поверхности земли так, что низкие значения изолиний В остаются слева.

Скорость смещения антициклонов определяется перепадом температуры от передней и тыловой части антициклона на уровнях 850, 700 и 200 мб. Связь между скоростью и перепадом температуры определяется коэффициентом "К" в формуле

$$U_a = K U_B,$$

где U_a - скорость антициклона, а U_B - скорость, рассчитанная по картам функции В.

Перепад температуры вычисляется по формуле

$$\Delta t = t_b + t_c - 2t_a,$$

где t_a - температура воздуха на данном уровне в точке а, лежащей над центром антициклона у поверхности земли, t_b и t_c - температуры в точках б и с, находящихся на той же изогипсе, что и точка а, но с разных сторон от нее на 1000 км.

Так как на уровнях 500 и 300 мб перепад температуры, как правило, мал, то автор предлагает учитывать перепад температуры только на уровнях 850, 700 и 200 мб. Для этого рассчитывается величина

$$S = (t_b + t_c - 2t_a)_{850} + (t_b + t_c - 2t_a)_{700} + (t_b + t_c - 2t_a)_{200} \quad 27$$

Эмпирически было установлено, что если $S > 15^0$, то $K = 1$, при $2 \leq S \leq 14$ - $K = 0.5$ и при $S < 2$ - $K = 0$.

Если антициклон на карте MT_{850} очерчен замкнутыми изогипсами, то для определения точек a , b и c на этой карте берется первал незамкнутая изогипса в холодной стороне антициклона. Тогда пересечение этой изогипсы с осью ложбины холода на том же уровне и будет точкой a . Точки b и c берутся на той же изогипсе на расстоянии 1000 км по ту и другую сторону от точки a .

Если антициклон очерчивается замкнутыми изогипсами и на уровнях 700 или 200 мб, то величина S не рассчитывается, а перемещение антициклона рассчитывают только по изолиниям B_{500} . Считается, что в этом случае антициклон будет смещаться со скоростью U_b в случае, если эта скорость меньше 40 км/час и со скоростью $0.7U$, если скорость $U_b \geq 40$ км/час.

Метод Лужной не применим, когда на пути перемещения антициклона на уровне 500 мб располагается седловина с большими барическими градиентами на ее периферии, а также в тех случаях, когда на пути смещения антициклона на уровне 500 мб располагается узкая ложбина или гребень.

§ 26 . П е р е м е щ е н и е в ы с о т н ы х б а р и ч е с - к и х ц е н т р о в

Перемещение высотных барических центров, как правило, совпадает с перемещением соответствующих им приземных центров. Со временем происходит сближение приземных и высотных центров, что необходимо учитывать при прогнозе скорости смещения высотных центров.

При расчетах смещения высотных барических центров также применяются правило экstrapоляции, правило изаллогипс и учитывается направление и скорость высотного потока.

Высотные циклоны перемещаются в направлении между изаллобарическим градиентом и большой осью циклона. Высотные антициклоны перемещаются в направлении между изаллобарическим асцендентом и большой осью антициклона. Скорость перемещения барических образований в среднем равна скорости перемещения изаллобарических центров. Но если молодые циклоны перемещаются так же, как изаллобарические центры, то старые окклюдированные циклоны несколько отстают от движения области понижения высоты. Поэтому по взаимному положению высотного циклона и отрицательной изаллобарической области можно судить об изменении скорости движения центра циклона по сравнению со скоростью движения области падения.

Область роста постепенно отстает от центра высотного антициклона.

О скорости перемещения высотного центра можно судить по наклону оси

циклона: чем больше наклон оси, тем больше скорость. При вертикальной оси и приземный, и высотный центры становятся малоподвижными.

Ложбины и гребни перемещаются в основном так же, как центры циклонов и антициклонов. Но иногда перемещение ложбин и гребней может быть замедлено в сравнении с перемещением центров. Ложбины и гребни движутся тем быстрее, чем больше градиенты геопотенциала вдоль их оси. Поэтому при потоках, расходящихся к осям ложбин и гребней, скорости их смещения меньше, чем при сходящихся и параллельных изогипсах.

§ 27 . П е р е м е щ е н и е в ы с о т н ы х и а л л о - б а р и ч е с к и х о б л а с т е й

Эмпирически установлено, что замкнутые области изаллогипс перемещаются вдоль потока на том же уровне, на котором они располагаются. При этом области положительных изаллогипс отклоняются немного влево от потока, области отрицательных изаллогипс - вправо. Средний угол отклонения составляет 25° , но величина его возрастает с увеличением интенсивности изаллобарических областей.

Скорость перемещения изаллобарических центров в среднем равна 0.9 скорости потока. Но коэффициент меняется в зависимости от скорости; при малых скоростях он больше, при больших - меньше.

Коэффициент	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7
Скорость в км/час на АТ ₇₀₀	38	35-45	45-55	55-65	65-85	85-100

§ 28 . В л и я н и е г о р н ы х х р е б т о в н а д в и ж е н и е ц и к л о н о в

1. Если на пути движения циклонов лежат высокие горные хребты, то циклоны или, задерживаясь, заполняются перед ними, или огибают их. Задержка и заполнение циклонов иногда наблюдается, например, перед горной системой Алтая и Центрально-Азиатского горного массива. Чаше указанные горные системы вызывают резкое изменение траектории циклонов.

Циклоны, приближающиеся с запада к Фенноскандинавской горной стране, могут огибать ее с юга или с севера.

2. Невысокие горные хребты не оказывают существенного влияния на движение барических центров. Циклоны могут свободно переваливать через такие препятствия, особенно, если циклоны представляют из себя мощные по высоте образования. При переваливании отмечается небольшое заполнение перед

хребтом и небольшое углубление—за хребтом.

3. Горные хребты, расположенные перпендикулярно траектории циклонов, в некоторых случаях могут вызывать их раздваивание.

Сущность процесса раздваивания состоит в том, что циклон, приблизившись к хребту, останавливается и постепенно заполняется. Одновременно с этим за хребтом в направлении потока наблюдается развитие ложбины, в которой со временем возникает новый циклон.

Этот вновь возникший циклон, углубляясь, перемещается в направлении ведущего потока.

Возможность раздваивания циклонов под влиянием меридионально вытянутых хребтов была впервые теоретически доказана И.А.Кибелем. После выхода в свет работы Кибеля этот вопрос исследовался многими учеными. В результате было доказано, что раздваивание циклонов хотя и не частое явление, но может быть вызвано не только меридионально, но и широтно вытянутыми хребтами, если траектории движения циклонов перпендикулярны хребтам.

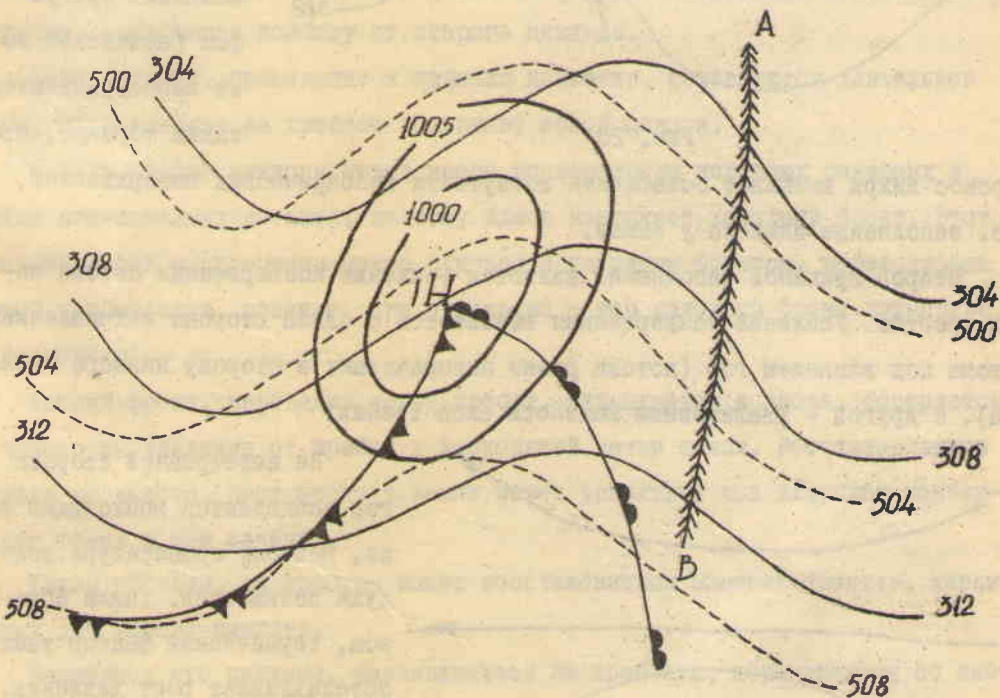


Рис. 27

Исходя из структуры термобарического поля атмосферы, влияние хребтов на движение циклонов можно пояснить следующим образом.

Пусть к горному хребту АВ приближается молодой циклон. Вне влияния гор циклону у земли на высоте соответствуют ложбины барического и термического полей несколько позади центра и гребни термического и барического полей—несколько впереди. На рис.27 представлено барическое поле и фронты у

земли, а также высотное термобарическое поле.

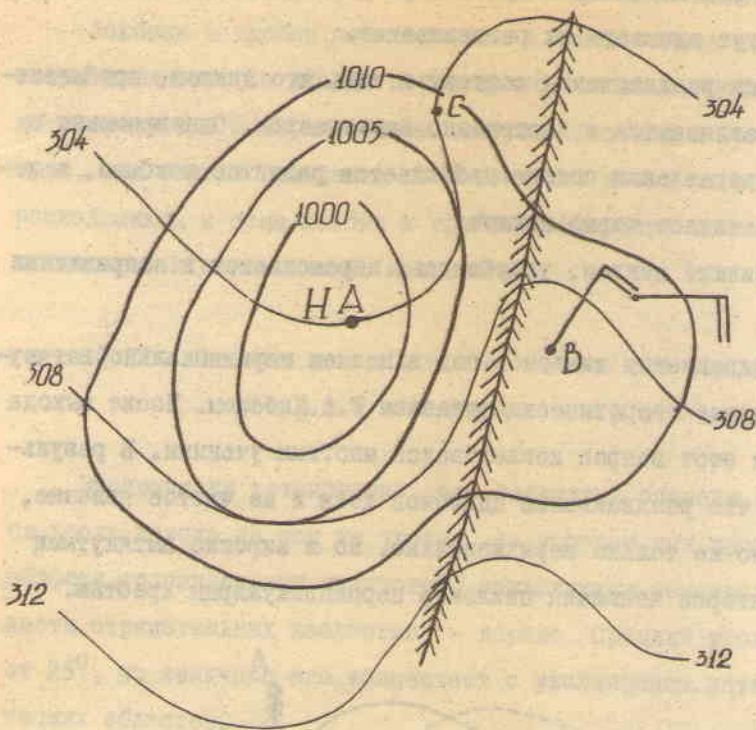


Рис. 28

Над хребтом всегда развивается орографический гребень, поэтому когда циклон находится у подножья гор, над ним в направлении потока отмечается увеличение циклонической кривизны изогипс (см. участок изогипс AC на рис. 28). Значит под влиянием орографии барическое поле перестраивается таким образом, что

перенос вихря вызывает ослабление вогнутости изобарических поверхностей, т.е. заполнение циклона у земли.

Второй причиной заполнения является усиление конвергенции потока перед хребтом. Усиление конвергенции вызывается с одной стороны искривлением потока под влиянием гор (потоки резко поворачивают в сторону низкого давления), с другой — увеличением мощности слоя трения.

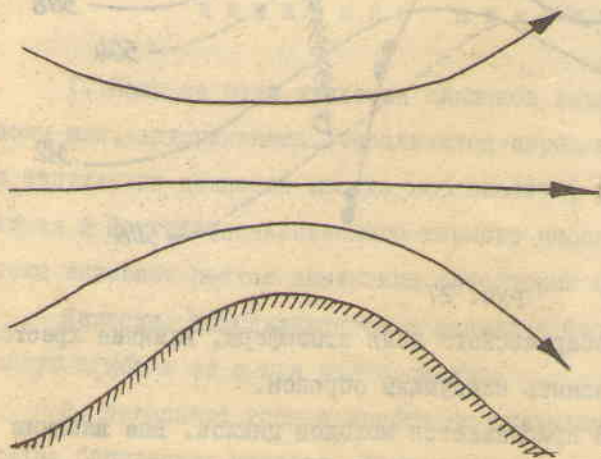


Рис. 29

На наветренной стороне гор наблюдаются восходящие токи, поэтому температура воздуха понижается. Таким образом, термический фактор также обуславливает рост давления.

Наконец, на наветренной стороне гор потоки искажаются так, что в вертикальной плоскости имеет место конвергенция (рис.29). Это является

четвертой причиной роста давления перед горами.

Таким образом, под влиянием переноса вихря, усиления конвергенции как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости и термического фактора, циклоны, приблизившись к горам, заполняются.

На подветренной стороне под влиянием нисходящих потоков воздух прогревается, что вызывает развитие термического гребня. Развитие гребня обусловливает усиление вогнутости нижних изобарических поверхностей, что приводит к падению давления за хребтом и развитию здесь ложбины. Второй причиной падения давления за хребтом является дивергенция потоков в вертикальной плоскости.

Наибольшее изменение давления как в сторону роста, так и в сторону уменьшения отмечается под высотной фронтальной зоной, т.е. в районе движения циклона.

Как только за хребтом появляется ложбина, на ее северной периферии развивается восточный перенос воздуха, который вблизи хребта под его влиянием резко поворачивает в сторону низкого давления, т.е. к югу (см. район точки В на рис. 28). Вследствие этого появляется перемычка повышенного давления, отсекающая ложбину от старого циклона.

Если причины, приводящие к падению давления, сохраняются длительное время, то в ложбине за хребтом возникает новый циклон.

В тылу нового циклона имеет место конвергенция холодных северных и теплых юго-западных потоков, поэтому здесь возникает холодный фронт. Этот холодный фронт со временем может слиться с холодным фронтом, перевалившим горный хребет (если, конечно, при опускании с гор холодный фронт полностью не размоется).

Теплый фронт, перевалив через хребет, размывается и вновь обостряется на некотором удалении от хребта в восходящей ветви токов. Восстановившись сначала на высоте, этот фронт у земли может усилиться под влиянием конвергенции токов и ее ложбины.

Таким образом, за хребтом может восстановиться система фронтов, характерных для любого циклона.

Замечено, что циклоны, развивающиеся за хребтами, перемещаются со значительными скоростями.

Описанный выше процесс раздваивания циклонов наблюдается под влиянием Скандинавского, Уральского, Бурейнского, Сихоте-Алиньского, Срединного и других меридионально вытянутых хребтов.

Раздваивание иногда наблюдается и под влиянием хребтов малой Азии. При движении циклонов с восточной части Средиземного моря на север новые

циклоны могут возникать над Черным морем, при движении на северо-восток — над Каспийским морем. В последнем случае циклон может очень сильно углубляться. Это наблюдается тогда, когда процессу раздваивания предшествовала сильная адвекция холода в районах Предкавказья. Холодный воздух, скопившийся перед хребтом, может быть охвачен циклонической циркуляцией нового центра, что при наличии очень теплого воздуха, перевалившего через горы, обуславливает большие контрасты температуры.

4. Широко вытянутые хребты иногда могут быть причиной возникновения новых циклонов. Если севернее хребта располагается старый окклюдированный циклон, то входящие в тылу его холодные массы скапливаются перед хребтом и здесь наблюдается рост давления (рис.30). На высоте между циклоном и областью роста воздуха возникает расходимость потоков¹⁾, которая может вызвать падение давления и возникновение нового циклона у земли. Возникновению циклона в этом случае способствует наличие высотной фронтальной зоны на юго-восточной периферии старого, окклюдированного циклона.

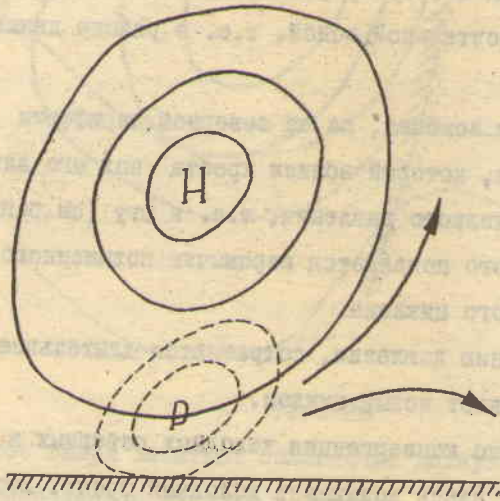


Рис. 30

§ 29 . Влияние сложных форм рельефа на движение циклонов

Сложные формы рельефа вызывают различного рода воздействия на движение воздушных масс, фронтов и барических образований. К настоящему времени достаточно хорошо изучено влияние Центрально-Азиатского массива на циркуляционные процессы атмосферы (Петросяниц).

Если над юго-востоком ЕТС устанавливается высокий, окклюдированный циклон, то западный поток его южной периферии под влиянием Центрально-Азиатского массива разделяется на два потока. Один из этих потоков имеет юго-западное, другой — северо-западное направление. Над горами формируется орографический гребень, в результате чего в северной ветви потока наблюдаются резко увеличенные градиенты давления. В южной ветви потока, наоборот, градиенты резко ослабевают.

¹⁾ на рисунке жирными стрелками даны потоки на высоте

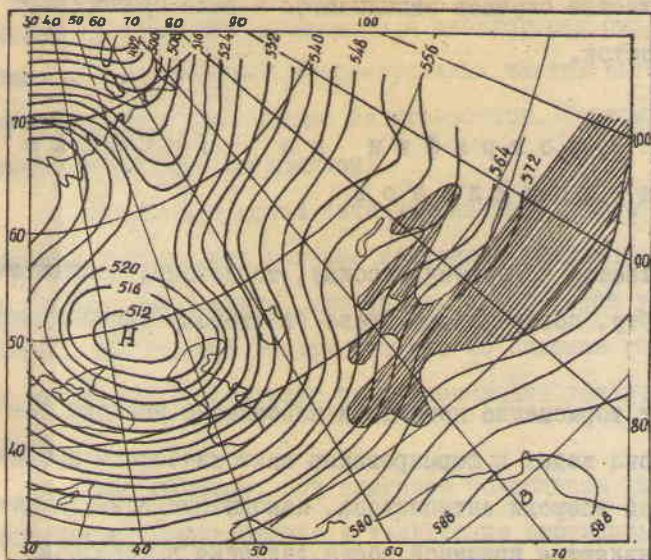


Рис. 31

В связи с усилением градиентов в северной ветви потока, над районами Средней Азии и Казахстана наблюдается интенсивная адвекция тепла. На юге, в Афганистане и Индии наблюдается резкое ослабление адвекции тепла и даже смена адвекции тепла адвекцией холода. Характер адвекции оказывает существенное влияние на развитие циклонов, если они здесь возникают.

Если циклоны возникают над Месопотамией или Персидским заливом и перемещаются на северо-восток, то под влиянием Копет-Дага наблюдается их раздваивание.

Новый циклон образуется в районах Мургаба и Теджена. Этот вновь возникший циклон попадает под влияние юго-западного высотного потока и с большими скоростями перемещается на северо-восток в районы Казахстана и юго-востока Западной Сибири. По пути движения обычно происходит сильное углубление циклона. Углублению способствуют большие контрасты температуры между теплым тропическим воздухом, перевалившим горы, и холодным воздухом, вошедшим в тыл циклона из северных широт. С этим циклоном обычно связана пасмурная дождливая погода.

Старый циклон, задержавшийся перед Копет-Дагом, медленно смещается на юго-восток. Так как в тылу его адвекция холода отсутствует, то циклон быстро заполняется. С ним обычно связана малооблачная погода.

В случае, когда циклоны перемещаются с запада на восток по районам Средней Азии, то при наличии северо-восточного потока они огибают хребты, но при этом, как правило, заполняются. Иногда заполнение происходит на западных склонах хребта. За хребтами циклоны в этом случае не прослеживаются, но облачность, связанная с фронтами этих циклонов, может наблюдаться и за хребтами, т.е. может наблюдаться дрейф облачности.

Замечено, что циклоны, перемещающиеся севернее 37 параллели, в большинстве случаев изменяют траекторию, приобретая северо-восточную составля-

ющую движения и реже заполняются перед горами. Циклоны, перемещающиеся южнее 33 параллели, в большинстве случаев заполняются и реже приобретают слагающую движения на юго-восток.

§ 30 . В л и я н и е о р о г р а ф и и н а д в и ж е н и е а н т и ц и к л о н о в

Если антициклон приближается к горному массиву, то потоки, направленные под большим углом к хребту, поворачивают влево (в сторону низкого давления).

В результате происходит торможение потоков и накопление воздуха перед горами. Искривление потока ведет к формированию циклонического прогиба изобарических поверхностей впереди антициклона. Накопление воздуха перед горами и перенос вихря являются причиной роста давления в передней части антициклона. Усиление трения и увеличение мощности слоя трения также приводит к накоплению воздушных масс и росту давления.

Таким образом, под влиянием трех перечисленных выше факторов перед горами наблюдается усиление антициклонов. Усилению способствуют вынужденные вертикальные движения, которые приводят к понижению температуры и уплотнению воздуха.

Некоторое усиление антициклонов наблюдается перед Скандинавскими горами и Уралом. Так как высота этих гор небольшая, то и воздействие их на антициклоны выражено слабо.

Заметное усиление антициклонов наблюдается перед горами Центрально-Азиатского массива и Кавказом. Антициклоны, смещающиеся на районы Средней Азии и Казахстана с севера и северо-запада, в подавляющем большинстве случаев резко усиливаются перед горами. Особенно заметное усиление наблюдается в зимнее время.

Иногда перед горами, несколько впереди антициклонов, перемещающихся с запада на восток по средним широтам, формируются новые ядра высокого давления. Такое развитие ядер высокого давления может наблюдаться под влиянием Кавказских гор. Здесь развитие нового антициклона чаще всего происходит при северо-восточных потоках.

Дополнительным фактором роста давления в этом случае является возникновение циклонического изгиба в направлении потока. Поэтому перенос вихря также способствует росту давления. Кроме того, циклонический изгиб ^{изогипс} приводит к возникновению конвергенции потоков.

В зимнее время заметное влияние на антициклогенез могут оказать плос-

когорья и котловины Центрально-Азиатского горного массива. Если антициклоны перемещаются на районы Центрально-Азиатского массива, то здесь происходит их усиление. Котловины и плоскогорья окружены высокими горными хребтами и отток воздуха от центральных частей антициклонов затруднен, отток может происходить только на юго-восток. Поэтому приземная дивергенция не может разрушать антициклон.

При тихой и ясной антициклональной погоде с поверхности, покрытой снегом, происходит сильное излучение. Радиационное выхолаживание приводит к уплотнению воздуха, что также способствует усилению антициклона. Кроме того, охлажденный воздух стекает со склонов гор, окружающих плоскогорья и котловины, вследствие чего происходит увеличение мощности холодного воздуха.

Таким образом, под влиянием ослабления дивергенции, интенсивного радиационного выхолаживания и увеличения вертикальной мощности холодного воздуха над Центрально-Азиатским массивом происходит усиление антициклонов, и они могут задерживаться здесь на длительное время.

Аналогичные условия, способствующие усилению антициклонов в зимнее время, наблюдаются и над районами Якутии.

Дополнительным фактором усиления антициклонов над Якутией является непрерывный подток арктического воздуха по долине р. Лены.

§ 31 . Эволюция высотных барических образований

При прогнозе эволюции барических образований на высотах необходимо в первую очередь провести тщательный анализ эволюции этих образований в предшествующий период и в исходный срок. Т.е. нужно выяснить факторы, определяющие углубление или заполнение циклонов, разрушение или усиление антициклонов в предшествующий период и возможность сохранения этих факторов на последующий период.

Важнейшим фактором эволюции барических образований на высотах является дивергенция скорости ветра. Величину и знак дивергенции необходимо рассчитывать методами, изложенными в предыдущей главе. Вторым важным фактором является адвекция температуры в верхних слоях тропосферы и в нижних слоях стратосферы (т.е. на уровне 300 и 200 мб). Адвекция вихря на каком-либо уровне не сказывается на эволюции барических центров этого уровня, но влияет на развитие процессов на выше и ниже расположенных уровнях. Поэтому необходимо учитывать суммарное влияние вихревого фактора согласно формуле

$$\frac{\partial H_p}{\partial t} = \frac{1}{2\pi} L^2 \int_0^p \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \left[\frac{1}{t} (H, \Delta H) + \beta \frac{\partial H}{\partial x} \right] M_2 z dz d\varphi dp'$$

Наряду с учетом дивергенции, адвекции и переноса вихря, необходимо использовать и эмпирические методы, основанные на использовании изаллобарических полей, на связи приземных и высотных процессов и т.д.

Если в районе высотного циклона располагается область отрицательных изаллогипс, то циклон будет углубляться. В процессе развития высотного циклона область отрицательных изаллогипс отходит от центра вперед, поэтому по взаимному положению центра циклона и центра области понижения высот можно судить о стадии развития циклона.

Наличие положительных изаллогипс в районе циклона свидетельствует о его заполнении. Если же над циклоном располагается область отрицательных изаллогипс, то это не значит, что циклон будет углубляться в течение всех суток. В течение суток область падения может смениться областью роста, соответственно углубление сменится заполнением. Чтобы учесть возможность такой смены, нужно провести расчет скоростей перемещения циклона и изаллобарических центров.

Если над центром антициклона располагается область отрицательных изаллогипс, то это значит, что антициклон будет разрушаться. Если же над антициклоном наблюдаются нулевые изаллогипсы, то это еще не свидетельствует о его разрушении в предстоящие сутки: антициклоны чаще, чем циклоны, стационарируют.

При анализе и прогнозе эволюции высотных барических центров необходимо учитывать эволюцию приземных барических центров. При углублении циклона у земли происходит углубление высотного циклона. В начале заполнения приземного циклона высотный еще некоторое время углубляется. При длительном заполнении приземного циклона заполняется и высотный.

При анализе эволюции высотных циклонов необходимо учитывать вертикальную структуру их. Известно, что большинство циклонов развивается от поверхности земли. Циклоническая циркуляция постепенно передается на высоты. Развитию циклона на высоте предшествует возникновение глубоких ложбин с малыми градиентами. Учет изменения высоты изобарических поверхностей особенно важен в таких малоградиентных областях.

Если перенос вихря, дивергенция и адвекция указывают на снижение высоты изобарической поверхности, то над областями малых градиентов абсолютно-го геопотенциала следует ожидать возникновения замкнутой области низкого давления.

При учете вертикальной структуры циклонов нужно обращать внимание на то, под какими высотными областями происходит развитие приземного циклона. Если приземный циклон возникает под высотной фронтальной зоной с большими градиентами, то распространение циклонической циркуляции на высоты происходит постепенно. Если же циклон у земли возникает под зоной с малыми градиентами, то он очень быстро может стать высоким.

Скорость распространения циклонической циркуляции на высоты зависит также от интенсивности снижения давления у земли. При сильном уменьшении давления в центре приземного циклона циклон очень быстро становится высоким.

Изменение высоты изобарических поверхностей вдоль осей ложбин и гребней зависит от тех же причин, что и изменение высоты в центрах барических образований, т.е. от переноса вихря, дивергенции скорости ветра и от адвекции на ниже и выше расположенных уровнях. При расходимости изогипс к оси, ложбина углубляется, при сходимости — заполняется. При сходимости изогипс к оси, гребень усиливается, при расходимости — разрушается.

Если в направлении ложбины циклоническая кривизна уменьшается, то ложбина углубляется; если циклоническая кривизна усиливается, то ложбина заполняется.

Изменение кривизны учитывается во всей зоне, занятой ложбиной. Обычно берется пространство на 500 км перед и в тыл ложбины.

Если перенос вихря, адвекция и дивергенция вызывают изменение высоты одного знака, то прогноз эволюции ложбин и гребней большого труда не представляет. Если влияние указанных факторов неоднозначно, то о будущем изменении высоты лучше судить путем экстраполяции. При этом экстраполяция производится по данным за последние несколько часов, а не за сутки.

§ 32 . Эволюция приземных барических образований

Для того, чтобы составить представление об эволюции приземных барических образований в последующие сутки, необходимо учитывать:

- 1) эволюцию барического образования в предшествующие сутки и особенно в последние часы перед прогнозом,
- 2) характер и эволюцию высотного барического поля,
- 3) знак изменения температуры в нижнем слое тропосферы,
- 4) положение и интенсивность приземных изаллобарических центров,
- 5) положение и интенсивность высотных изаллобарических центров,

- 6) пространственную структуру барических образований,
- 7) фронтальную структуру циклонов,
- 8) стратификацию атмосферы,
- 9) общую картину развития макросиноптических процессов над естествен-
но-синоптическим районом, а иногда и над всем полушарием.

Если в предшествующие сутки и в последние часы перед прогнозом циклон углублялся и причины, приводившие к углублению, сохраняются, то нужно рассчитывать на дальнейшее углубление по крайней мере в ближайшие 12 часов. Если антициклон усиливался и причины усиления сохраняются, то нужно рассчитывать на дальнейшее усиление.

Если циклон в последние часы заполнялся, то в подавляющем большинстве случаев он будет заполняться и в предстоящие сутки.

Циклоны углубляются, если над ними на карте АТ₇₀₀ расположена передняя часть ложбины с циклонически искривленными, расходящимися изогипсами. Антициклоны усиливаются, если они расположены в передней части гребня под сходящимися, антициклонально искривленными изогипсами.

Если над циклоном происходит понижение средней температуры нижнего слоя тропосферы, он заполняется, если происходит повышение средней температуры - углубляется.

Изменение температуры в нижнем слое тропосферы определяется характером адвекции, знаком трансформации, направлением и интенсивностью вертикальных токов.

Характер средней адвекции определяется путем переноса изотерм АТ₇₀₀ вдоль изогипс того же уровня. Если в передней части циклона отмечается адвекция тепла, а в тыловой - адвекция холода, циклон будет углубляться. Если адвекция холода занимает центральную или юго-восточную часть циклона, он будет заполняться.

Величина и знак трансформации температуры определяются величиной и знаком разности между температурой воздуха и температурой подстилающей поверхности. Интенсивность трансформации зависит от характера облачности и скорости ветра у поверхности земли.

Качественную оценку изменения температуры за счет восходящих и нисходящих движений следует проводить по картам вертикальных токов.

Если перенос вихря, дивергенция и изменение температуры в исходный момент приводят к изменениям давления одного знака, то в предстоящие сутки эволюция барических образований будет иметь тот же знак.

Если вклад каждого из указанных факторов разный, то для прогноза предстоящей эволюции нужно привлекать другие признаки, в частности, нужно

тщательно анализировать высотные и приземные изаллобарические поля.

Известны следующие эмпирические правила:

1. Циклон углубляется (заполняется), если в его центре наблюдаются отрицательные (положительные) тенденции.
2. Антициклон усиливается (ослабевает), если в его центре наблюдаются положительные (отрицательные) изотенденции.
3. Близкие к нулю отрицательные и положительные изотенденции в центре циклона свидетельствуют о его заполнении в ближайшее время.
4. При отрицательных изотенденциях в центре циклона углубление его будет проходить тем продолжительнее, чем дальше в тылу его находится нулевая изотенденция. При положительных тенденциях в антициклоне усиление его тем продолжительнее, чем дальше в тылу находится нулевая изотенденция.
5. Циклон углубляется, если в его теплом секторе барические тенденции отрицательные, и заполняется, если они положительны. Если в теплом секторе изотенденции близки к нулевым, давление в центре циклона существенно не изменяется.

Об эволюции приземных барических центров можно судить и по положению полусуточных изаллобарических областей на AT_{700} .

Если над центром приземного циклона находится центр положительной изаллобарической области на AT_{700} , то циклон будет заполняться, если центр отрицательной области, — довольно часто циклон углубляется. Если над антициклоном располагается центр положительной изаллобарической области, то антициклон усиливается, если центр отрицательной области, — разрушается.

Если центры барических и изаллобарических областей не совпадают, то об эволюции приземных барических центров можно судить по расстоянию между центрами и по их интенсивности.

Если интенсивность положительной и отрицательной изаллобарических областей одинакова и они находятся на одинаковом расстоянии от центра циклона, то предпочтение нужно отдавать положительной области; если интенсивность неодинакова, то нужно учитывать влияние той, интенсивность которой больше; если расстояние не одинаковое, нужно учитывать влияние ближе расположенной области.

Чем больше расстояние между барическими и изаллобарическими областями, тем меньше влияние последних на первые. Установлено, что на эволюцию циклонов оказывают существенное влияние только те области, которые удалены от центров циклонов не более, чем на 500 км. В случае антициклонов это удаление может составлять и 1000 км.

Углубление циклонов и усиление антициклонов прекращается после того, как они становятся высокими. Циклон заполняется, если его ось становится квазивертикальной. Если у антициклона ось становится квазивертикальной, то это еще не означает, что он будет разрушаться — антициклоны чаще стационарируют.

Хорошим признаком углубления циклона является наличие над его центральной частью гребня на $\text{от } \frac{500}{1000}$.

Чем больше длина волны в этом гребне, тем вероятнее, что циклон будет углубляться. Не окклюдированный циклон углубляется тем сильнее, чем быстрее движется холодный фронт по сравнению с теплым.

§ 33. Р е г е н е р а ц и я ц и к л о н о в

Регенерацией называется возрождение старых высоких окклюдированных циклонов или резкое усиление в развитии молодых низких циклонов.

В процессе регенерации наблюдается сильное падение давления в центральной части или на периферии старого циклона. В первом случае происходит углубление старого циклона, 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.

Все погодные условия, характерные для циклонов, при регенерации их резко обостряются: усиливается ветер, снижается и уплотняется облачность, усиливаются осадки (зимой метели), и т.д. Скорость движения циклонов возрастает, а направление смещения, резко изменяясь, совпадает с высотным потоком.

Прогноз регенерации циклонов — задача чрезвычайно трудная, и ее можно решить только путем совместного анализа приземных и высотных процессов.

У поверхности земли процесс регенерации чаще всего происходит при сближении окклюдированных полярно-фронтальных циклонов с арктическим фронтом. Циклоны при этом смещаются на северо-восток, а арктический фронт — с севера на юг. На арктическом фронте развивается волновое возмущение или молодой циклон, в тыл которого происходит интенсивный заток холода. Если адвекция холода у земли захватывает и тыловую часть старого циклона, то он регенерирует.

На высотах типичной для регенерации схемой термобарического поля является схема, представленная на рис. 32. На этой схеме сплошными линиями даны изогипсы AT_{500} , пунктирными — изотермы средней температуры или изогип-

сы σ_{500}^{1000} , • - положение центров приземных циклонов. Области, очерчен-

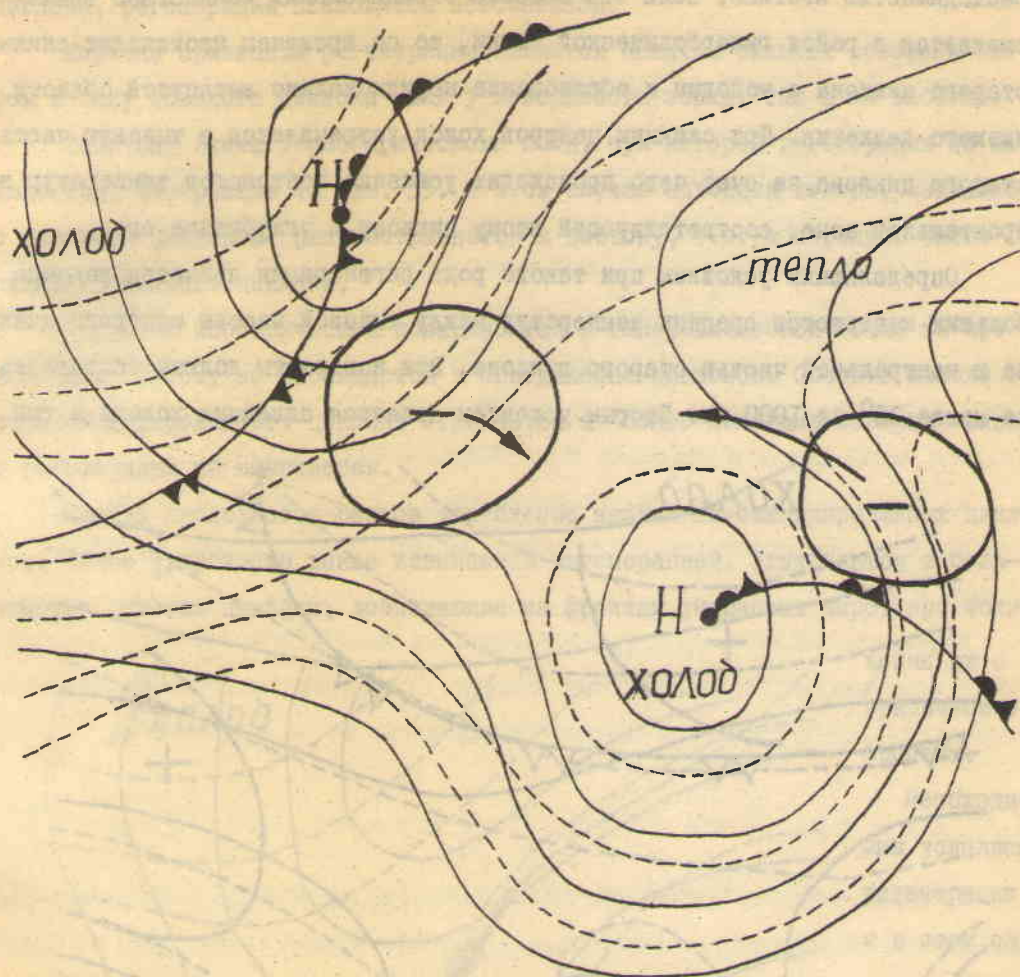


Рис. 32

ные жирной сплошной линией, указывают на районы, где отмечается снижение изобарических поверхностей.

Полярно-фронтальной циклон, как замкнутая область низкого давления прослеживается до уровня 500 мб. Центр высотного циклона совпадает с замкнутой областью холода на σ_{500}^{1000} , поэтому адвекция равна нулю, а фронтальная зона смещена на южную периферию циклона.

В передней части этого высокого циклона отмечается снижение изобарических поверхностей, вызванное переносом вихря и расходимостью циклонически искривленных изогипс. Эта область отрицательных изаллогипс, в соответствии с направлением высотных потоков, смещается в сторону гиперболической точки.

Циклон, возникающий на арктическом фронте, также высокий, но область холода располагается в тылу его, вследствие чего в тылу отмечается интенсивная адвекция холода. На южной периферии этого циклона также отмечается

снижение изобарических поверхностей, вызванное переносом вихря скорости и расходимостью изогипс. Если эта область отрицательных изаллогипс также смещается в район гиперболической точки, то со временем происходит слияние старого циклона с молодым и образование меридионально вытянутой области низкого давления. При слиянии центров, холод устремляется в тыловую часть старого циклона, за счет чего происходит усиление контрастов температур во фронтальной зоне, соответствующей этому циклону, и углубление его.

Определяющим условием при 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° на 1000 км. Вторым условием является адвекция холода в тыл

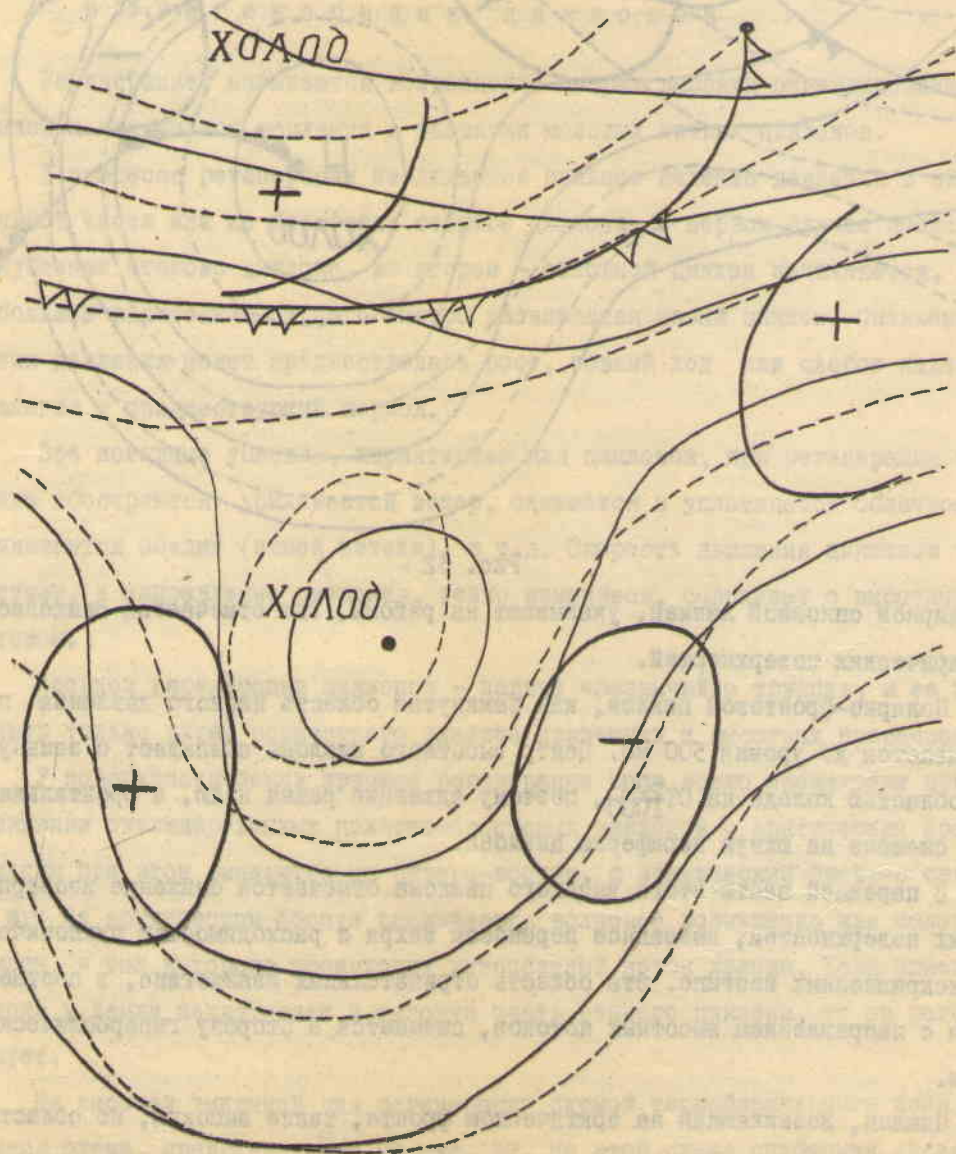


Рис. 33

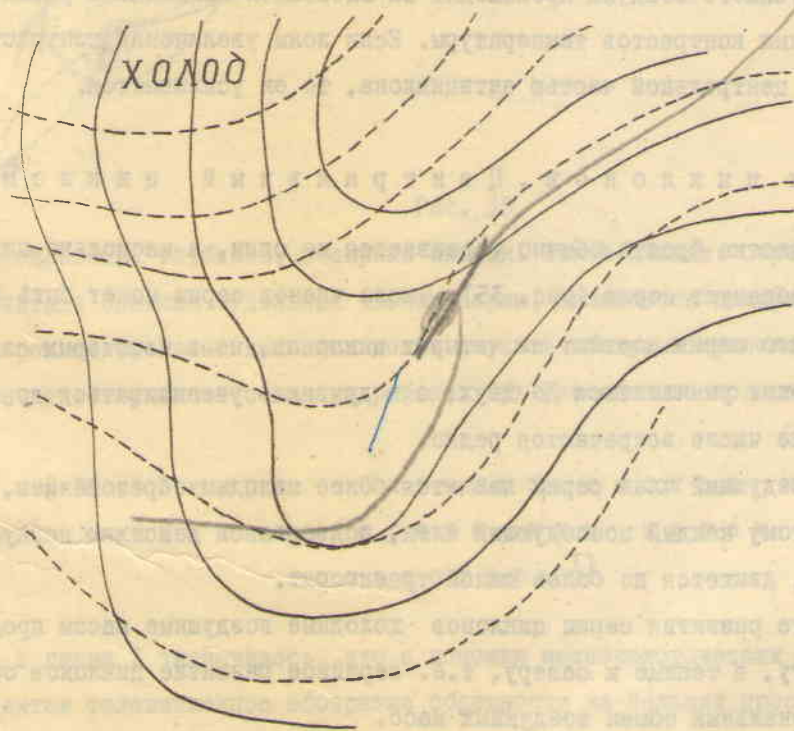
старого циклона. Если адвекция холода происходит в переднюю часть этого циклона, регенерация становится невозможной.

Хорошим признаком регенерации является наличие сильных северных ветров в тылу молодого циклона как у поверхности земли, так и на высотах.

Типичная схема термобарического поля, при которой регенерация не наблюдается, изображена на рис. 33. в этом случае адвекция холода, связанная с северным циклоном, распространяется к востоку, т.е. в переднюю часть окклюдированного циклона.

Снижение изобарических поверхностей в гиперболической точке не происходит, поэтому не наблюдается и объединение циклонов. Область холода в зоне окклюдированного циклона отсекается от более холодных северных масс, и регенерации не отмечается.

Иногда наблюдается резкое углубление низких не-окклюдированных циклонов. Такое углубление также называется регенерацией. Углубляются в большинстве случаев циклоны, возникающие на фронтах умеренных широт при сбли-



ении их с арктическим фронтом.

Необходимым условием регенерации и в этом случае является заток холодных арктических масс в тыл циклона и наличие условий для падения давления в передней части его. Типичная схема

Рис. 34

термобарического поля при углублении низких циклонов изображена на рисунке 34.

§ 34. Р е г е н е р а ц и я а н т и ц и к л о н о в

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

Процессы регенерации антициклонов изучены слабее. К настоящему времени имеются сведения о двух типах регенерации антициклонов.

I. Усиление старого, разрушающегося 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. Мощные вторжения арктического воздуха в тылу заключительного члена серии и приводят к регенерации антициклона.

II. Регенерация антициклонов отмечается и в тех случаях, когда в систему старого, разрушающегося антициклона происходит вторжение тропического воздуха с юга.

Вторжения теплого воздуха происходят на высотах и приводят к увеличению горизонтальных контрастов температуры. Если зоны увеличения контрастов оказываются над центральной частью антициклона, то он усиливается.

§ 35. С е р и и ц и к л о н о в . Ц е н т р а л ь н ы й ц и к л о н .

На одном участке фронта обычно развивается не один, а несколько циклонов, которые и образуют серию (рис. 35). Число членов серии может быть различным. Чаще всего серия состоит из четырех циклонов, но в некоторых случаях число их может уменьшиться до двух, а в других - увеличиваться до шести. Но крайние числа встречаются редко.

Каждый последующий член серии является более молодым образованием, чем предыдущий. Поэтому каждый последующий член, подвергаясь действию циркуляции предыдущего, движется по более южной траектории.

В результате развития серии циклонов холодные воздушные массы проникают далеко к югу, а теплые к северу, т.е. серийное развитие циклонов обеспечивает меридиональный обмен воздушных масс.

Первый член серии является самым старым, поэтому окклюдируется раньше других. После окклюдирования скорость его резко ослабевает, циклон становится малоподвижным.

Последующие члены, обладая большими скоростями, могут догнать первый и вливаться в него, поддерживая его существование длительное время. В случае такого слияния на месте стационарирования первого циклона, образуется

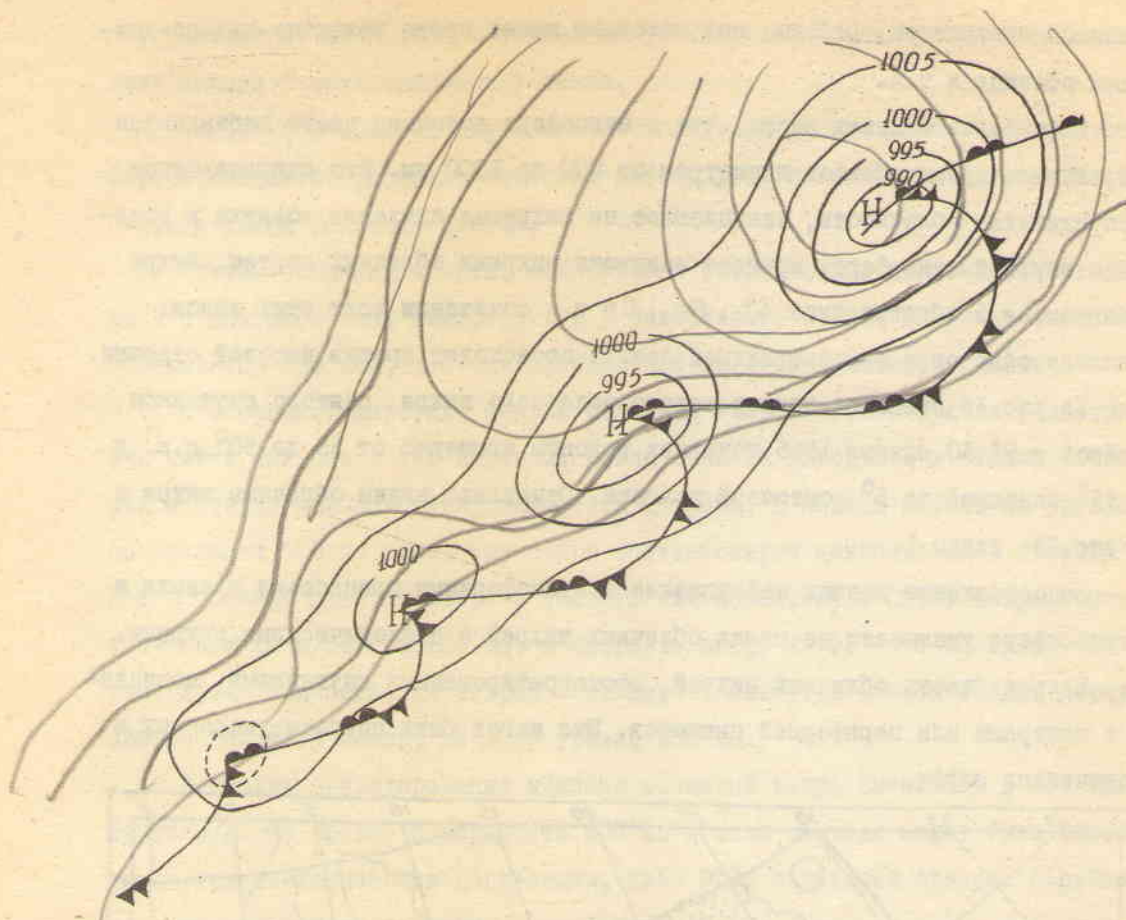


Рис. 35

малоподвижный, глубокий, обширный циклон. Такой циклон, образовавшийся в результате слияния отдельных членов серии, называется центральным циклоном. Примером центральных циклонов могут служить обширные циклоны, длительное время существующие в северных районах Обь-Енисейского водораздела.

§ 36 . Вихри облачных систем и их связь с барическим полем тропосферы I)

В главе I указывалось, что с помощью метеорологических спутников производится телевизионное обозрение облачности на больших пространствах атмосферы.

Исследование формы, количества и структуры облачного покрова позволяет судить о характере крупномасштабных атмосферных процессов. Например, с помощью спутников можно установить районы, над которыми наблюдается развитие внутримассовых кучевых облаков, районы, занятые сплошным покровом фрон-

I) этот параграф написан в основном по работам Л.С.Мининой

тальной облачности, районы, над которыми имеет место развитие кучево-дождевых облаков и т.д.

Нефоанализ показал также, что в атмосфере довольно часто наблюдаются спиральные полосы облаков диаметром от 800 до 1500 км. Это спиралевидное распределение облачности, указывающее на вихревые движения воздуха в средней и верхней атмосфере, принято называть вихрями облачных систем. Вихри наблюдаются в облаках типа St, Sc, Cb и в сочетании всех этих типов. Движение облаков в системе вихрей всегда происходит против часовой стрелки.

На рис.36 приведен пример такого облачного вихря, снятого спутником "Тайрос - 9" 30 января 1965 года над районом примерно от 35 до 50° с.ш. и от 35° западной до 5° восточной долготы. Отчетливо видны облачные вихри и на рис.23 главы I.

Сопоставление данных нефоанализа с атмосферными процессами у земли и в тропосфере указывает на связь облачных вихрей с циклоническими вихрями.

Большая часть облачных вихрей, сфотографированных спутниками, совпадает с центрами или периферией циклонов. Это могут быть циклоны умеренных и тропических широт.

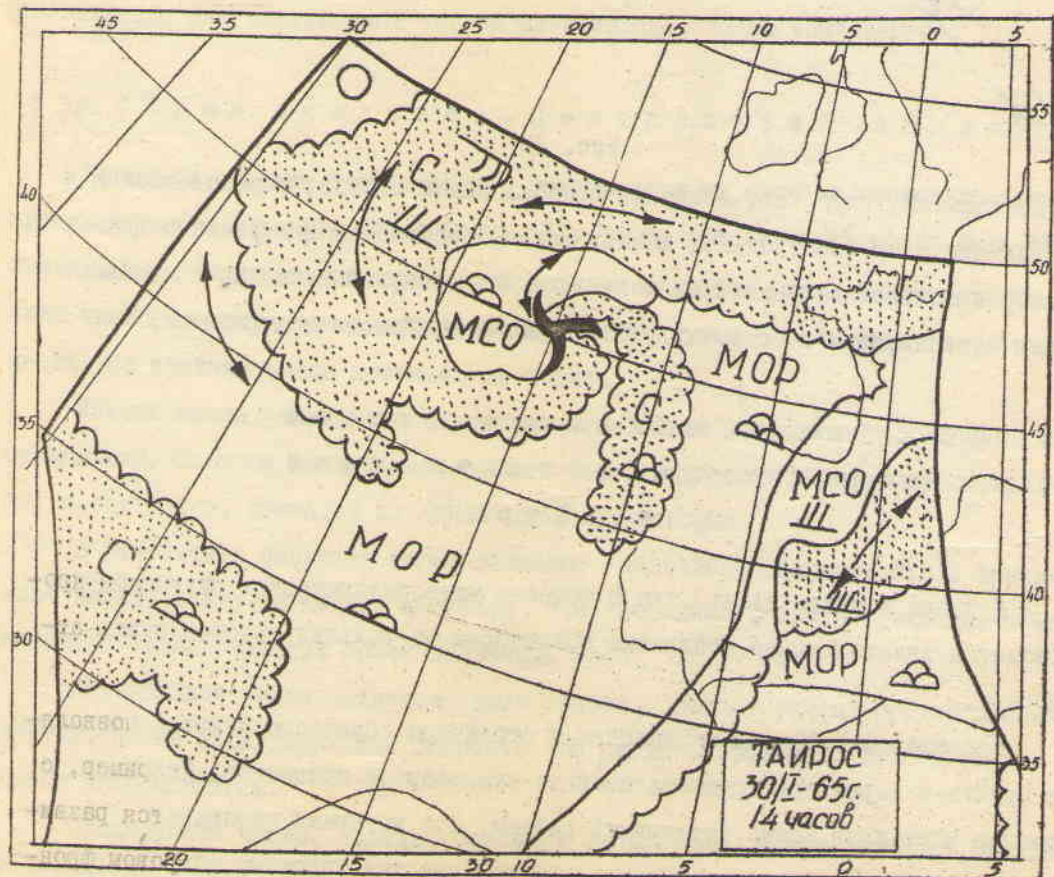


Рис. 36

Некоторые из облачных вихрей могут наблюдаться над размытыми барическими полями и антициклонами у земли.

Наконец, с помощью спутниковых наблюдений установлено, что в атмосфере наблюдается развитие высотных мезовихрей, с которыми также могут быть связаны вихри облачных систем.

Фокусы облачных вихрей, связанные с тропическими циклонами, совмещаются с центрами этих циклонов как у поверхности земли, так и на высотах. Объясняется это тем, что ось тропических циклонов квазивертикальна.

В умеренных широтах фокусы облачных вихрей проектируются в центральную часть циклона в тех случаях, когда циклоны находятся в стадии волны или в стадии молодого углубляющегося циклона. В первом случае на уровне поверхности 500 мб облачному вихрю соответствует циклоническая сторона ВФЗ с большим сдвигом ветра (бокового или по потоку). Сдвиг ветра обычно достигает 10 м/сек на 100 км, а скорость ветра во ФЗ — 40–60 м/сек. Во втором случае под облачным вихрем отмечается замкнутая циклоническая циркуляция не только у земли, но и на уровне 500 мб.

В стадии окклюдирования циклона облачный вихрь смещается в его тыловую часть. На уровне поверхности 500 мб в этих случаях может быть ложбина, замкнутая циклоническая циркуляция, либо ВФЗ, с которой связано струйное течение верхней тропосферы.

В тех случаях, когда облачный вихрь был связан с малоградиентным барическим полем у земли, на уровне 500 мб ему соответствовала резко выраженная ложбина, и фокус вихря был вблизи оси этой ложбины.

В области антициклона вихрь облачности всегда отмечается на периферии, когда здесь проходит холодный фронт. На уровне 500 мб в этом случае чаще всего наблюдается циклоническая сторона ВФЗ с большим сдвигом ветра. В некоторых случаях на этом уровне фокус облачного вихря совмещается с осью ложбины или замкнутой областью низкого давления.

В результате нефоанализа карт, построенных по данным метеорологических спутников, установлено, что в некоторых случаях наблюдаются хорошо выраженные облачные вихри при отсутствии циклонов у земли и на уровнях 850–500 мб. Оказалось, что эти облачные вихри связаны с мезовихрями в средней и верхней тропосфере. Мезовихри — это области пониженного геопотенциала с диаметром порядка 100–300 км и с циркуляцией в северном полушарии против часовой стрелки. Облачные вихри, соответствующие мезовихрям, имеют диаметр до 500–600 км, поэтому их трудно отличить от вихрей, соответствующих тропосферным циклонам.

Мезовихри возникают на циклонической стороне ВЭС на уровне поверхностей 300—400 мб. Им обычно соответствуют большие сдвиги ветра; часто это сдвиги на периферии струйных течений немного ниже оси максимального ветра. При тщательном анализе аэрологических данных верхней тропосферы мезовихри могут быть оформлены замкнутыми изогипсами.

Раньше мезовихри обнаруживались в виде петлеобразных движений аэростатов на периферии струйных течений, а с помощью спутниковых наблюдений было доказано, что эти вихри в верхней части тропосферы — явление нередкое. Природа их пока не выяснена. Установлено только, что они наблюдаются в виде завихрений верхней части облаков теплого и холодного фронтов. Иногда они наблюдаются на периферии облачных вихрей, связанных с тропосферными циклонами.

Даже краткий перечень результатов спутниковых наблюдений показывает, насколько при наличии данных этих наблюдений могут быть расширены исследования атмосферных процессов.

Уже первые спутниковые наблюдения позволили проследить тропические циклоны от стадии их зарождения в малоосвещенных метеоданными районах экватора до стадии исчезновения в более северных районах. Так тайфун "Ален" прослеживался по спутниковым данным в течение трех дней с 31 июля по 3 августа, в то время, как по наземным наблюдениям он был обнаружен лишь 4 августа. Таким образом, спутниковые наблюдения помогут увеличить срок прогноза выхода тропических циклонов на 2—3 дня.

С помощью нефоскопического анализа можно уточнять анализ приземных и высотных карт над малоосвещенными акваториями Атлантического и Тихого океанов. В некоторых случаях возможны уточнения в анализе карт и над территориями континентов.

Во всех случаях, имея спутниковые наблюдения, можно составить более четкую трехмерную схему тропосферных процессов.

Наконец, анализ и прогноз развития мезовихрей крайне необходим для прогноза болтанки самолетов в зоне струйных течений.