

АЛМА-АТА
1967 г.

КУРС ЛЕКЦИЙ
ПО СИНОПТИЧЕСКОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

З. П. КОЖЕХКОВА

КАЗАХСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. С. М. КИРОВА

ГЛАВА У

АТМОСФЕРНЫЕ ФРОНТЫ

§ I. Общие понятия об атмосферных фронтах

Атмосферным фронтом называется поверхность раздела между воздушными массами с разными свойствами.

Горизонтальная протяженность фронтов зависит от горизонтальной протяженности воздушных масс и может исчисляться тысячами километров. Вертикальная протяженность зависит от вертикальной мощности холодного воздуха. Иногда атмосферные фронты прослеживаются до тропопаузы, а иногда в пределах 2-3х километров.

Раздел между воздушными массами не является геометрической поверхностью, а имеет вид переходной зоны. Объясняется это тем, что в атмосфере всегда имеют место интенсивные турбулентные движения и при сближении воздушных масс на границе их раздела происходит смешивание воздушных частиц с различными свойствами. За счет этого и образуется не резкая граница раздела, а переходная зона (фронтальная зона). Ширина фронтальной зоны зависит от интенсивности конвергенции воздушных масс и от степени турбулентности.

Чем сильнее конвергенция тем уже переходная зона, чем интенсивнее турбулентное перемешивание, тем шире эта зона.

В приземном слое атмосферы, в областях пониженного давления, с которыми связаны фронты, всегда имеет место интенсивная конвергенция потоков за счет трения. Поэтому в приземном слое ширина переходной зоны может не превышать 100 км. Поскольку размеры воздушных масс исчисляются десятками тысяч километров, переходную зону шириной в 100 км и менее, можно принять за поверхность, а пересечение этой поверхности с землей, оформлять в виде линии. Линию пересечения фронтальной поверхности с земной поверхностью или поверхностями уровня, называют фронтом. Положение линии фронта на картах может быть определено с точностью, не превышающей 100 км.

При слабо выраженной конвергенции и сильной турбулентности, переходная зона между воздушными массами может иметь ширину до 1000 км. Такого рода переходные зоны называются фронтальными зонами. В трехмерном пространстве фронтальная зона условно ограничивается двумя поверхностями (рис. I),

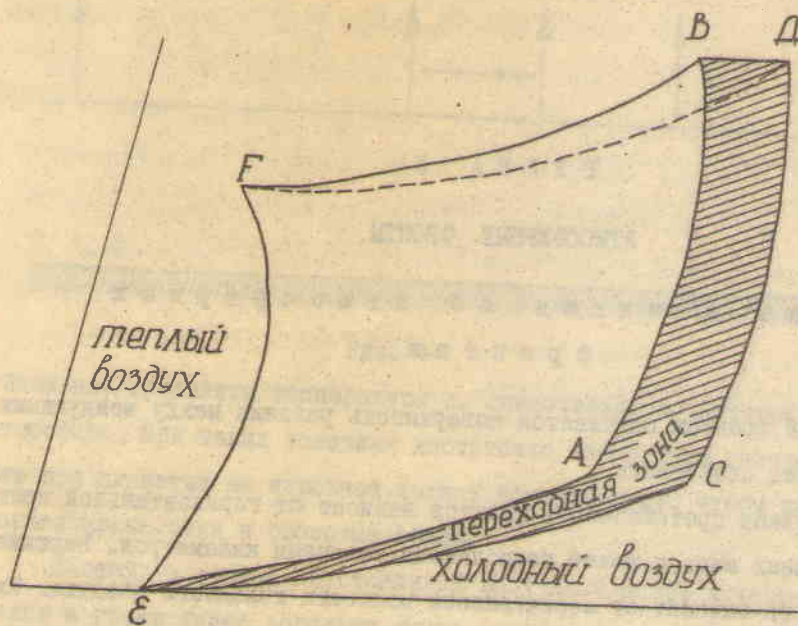


Рис. I

а в сечении с поверхностями уровня и с вертикальной плоскостью — двумя линиями (на рис. I линии АВ — СД и ЕА — ЕС соответственно).

С увеличением высоты усиливается ветер, а сле-

довательно и горизонтальное перемешивание воздуха. Наряду с этим, за счет уменьшения приземного трения, ослабевает конвергенция. Оба фактора приводят к тому, что ширина переходной зоны между воздушными массами увеличивается с высотой. Поэтому на картах барической топографии, особенно на картах топографии высоких уровней (например, на карте АТ₅₀₀) фронты не проводятся, а определяется положение фронтальных зон.

Иногда даже на уровне 850 мб ширина переходной зоны настолько значительная, что не имеет смысла проводить фронт в виде одной линии.

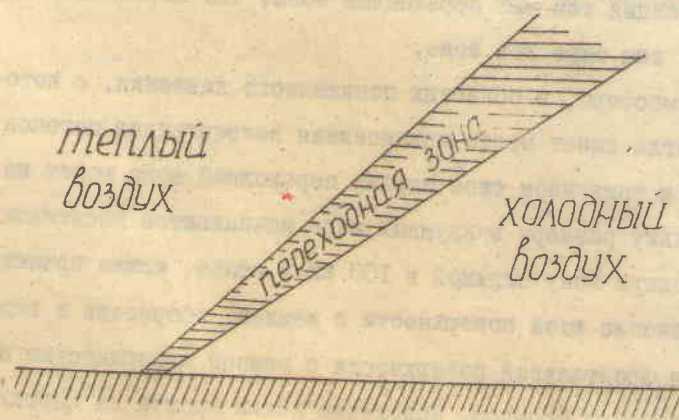


Рис. 2

Таким образом, на картах абсолютной барической топографии чаще встречаются фронтальные зоны, а не линии фронта.

Поскольку холодный воздух плотнее и тяжелее, чем теплый, атмосферные фронты всегда наклонены в сторону

холодного воздуха. Поэтому пересечение фронта с вертикальной плоскостью

имеет вид, изображенный на рисунке 2.

С атмосферным фронтом связано резкое изменение всех метеозаменителей, поэтому линия фронта и фронтальные зоны на приземных картах и на картах абсолютной топографии характеризуются большими горизонтальными контрастами метеозаменителей.

Большие значения горизонтальных градиентов (контрастов) температуры прослеживаются по крайней мере до высот 3-х километров. Часто значительные различия в температуре наблюдаются и на уровне 500 м. Поэтому на картах ⁵⁰⁰ фронтally соответствующая зона больших горизонтальных контрастов средней температуры. эту зону больших контрастов средней температуры и называют высотной фронтальной зоной (ФЗ). Изогипсы относительной топографии оформляющие ФЗ, проходят почти параллельно приземной линии фронта.

§ 2. Классификация атмосферных фронтов

Классификация атмосферных фронтов может быть проведена на основе учета географического района формирования фронта, величины контраста температуры, направления и скорости движения фронта, вертикальной его протяженности, направления вертикальной составляющей движения воздуха во время поворота, в зависимости от изменения контрастов метеозаменителей и погодных условий, связанных с фронтом.

1. В зависимости от типа воздушных масс, разлетаемых фронтом, различают арктические, полярные и тропические фронты. Арктический фронт разлетает арктический воздух и воздух умеренных широт; полярный фронт отделяет умеренный воздух от тропического и, наконец, тропический фронт - тропический воздух от экваториального. Погодные условия на территории Советского Союза определяются формированием и движением арктических и полярных фронтов.

2. В зависимости от степени выраженности в контрастах метеозаменителей и погодных условий, фронты делятся на главные и вторичные. Главными называются фронты, с которыми связаны значительные контрасты температуры у земли и на высотах, широкое зоны облачности и осадков, сильное ветры с различными направлениями по обе стороны от фронта. Вторичными называются фронты, которые слабо выражены в контрастах температуры и в направлении ветра, но с ними могут быть связаны неширокие зоны сильных осадков и значительный разрыв ветра. Они обычно наблюдаются в яглы циклонов и в передних

части антициклонов и только в приземном слое атмосферы.

Главными обычно являются те фронты, которые разделяют воздушные массы разных классов (АВ-УВ, УВ-ТВ). Вторичные фронты разделяют различные части одной и той же массы.

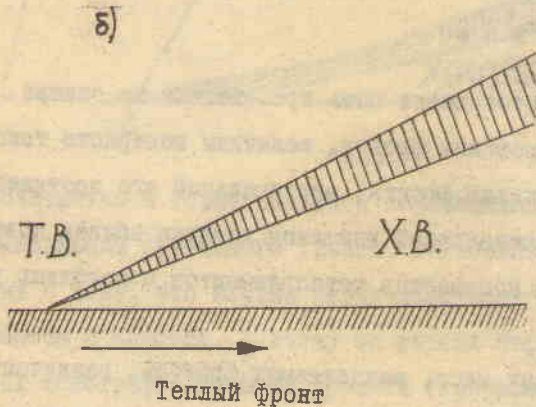
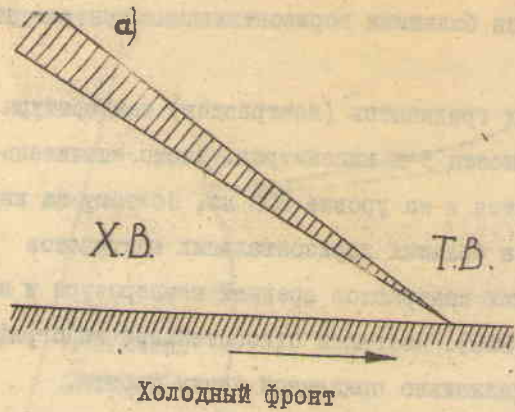


Рис. 3

3. В зависимости от направления и скорости движения фронты разделяются на теплые, холодные, малоподвижные.

Холодным называется фронт, движущийся в сторону теплого воздуха (рис.3"а"). Теплым называется фронт, движущийся в сторону холодного воздуха (рис.3"б").

4. В зависимости от вертикальной протяженности поверхности фронтов они делятся на тропосферные, приземные и верхние.

Тропосферными называются фронты, которые прослеживаются во всей толще тропосферы или, по крайней мере, в нижнем пятикилометровом слое. Приземными называются фронты, прослеживающиеся в тонком приземном слое (1-2 км). Верхними фронты называются в том случае, когда они

хорошо выражены на высотах и не отмечаются у поверхности земли.

5. В зависимости от направления движения теплого воздуха вдоль поверхности фронта они делятся на анафронты и катафронты. Анафронт, это фронт, вдоль всей поверхности которого теплый воздух поднимается вверх. Катафронт характеризуется нисходящим скольжением теплого воздуха вдоль большей части поверхности (рис.4).

6. В зависимости от характера изменения контрастов метеоэлементов и погодных условий, связанных с фронтом, фронты делятся на обостряющиеся и размывающиеся.

Обостряющимся фронт называется в том случае, когда с течением времени наблюдается увеличение контрастов всех метеоэлементов в его зоне, расширение зоны облачности и осадков, усиление ветра и т.д. Размывающимся фронт

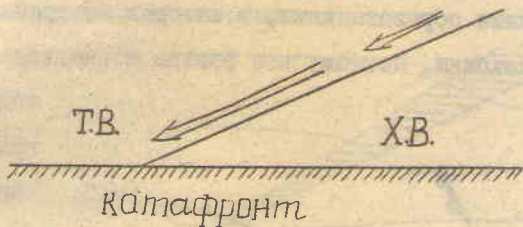


Рис. 4

ся фронты со временем могут размываться и т.д.

§ 3. Теплый фронт

1. Профиль поверхности теплого фронта. Движущийся воздух испытывает влияние трения о поверхность земли, в результате чего скорость горизонтального его движения возрастает с высотой.

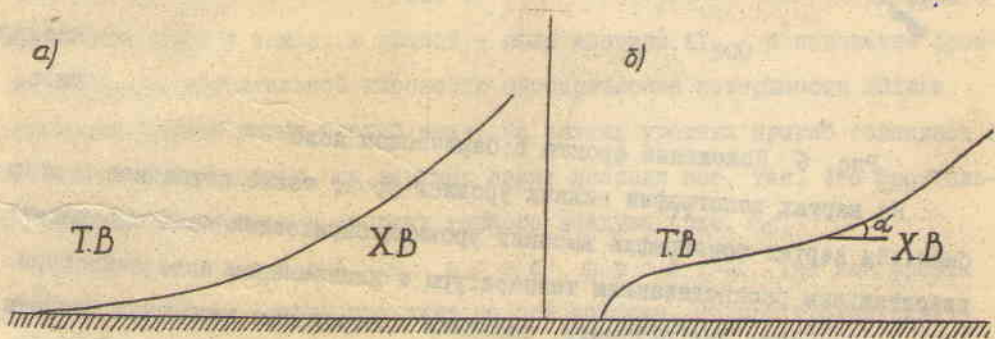


Рис. 5 Профиль поверхности теплого фронта

Поскольку частицы воздуха, прилегающие к поверхности земли, движутся медленнее, чем вышележащие, то профиль поверхности теплого фронта приобретает форму, изображенную на рисунке 5 "а".

Иногда впереди приземной линии фронта образуется пленка холодного воздуха. В этом случае нормальный для поверхности теплого фронта угол наклона

называется в том случае, когда с течением времени происходит ослабление всех явлений, связанных с фронтом, и уменьшение контрастов метеоэлементов.

Нужно иметь в виду, что данная выше классификация фронтов не является абсолютной. Это означает, что холодные фронты со временем могут становиться теплыми (при изменении направления смещения), тропосферные фронты со временем могут стать приземными и высотными и наоборот. Обострявшие-

α наблюдается на значительном удалении от приземной линии фронта (рис. 5"б"). Горизонтальная протяженность и вертикальная мощность пленки холодного воздуха зависят от степени шероховатости земной поверхности, скорости движения воздушных масс и от интенсивности турбулентного перемешивания. Зимой по причине устойчивой стратификации масс и слабой турбулентности, пленка наблюдается при движении почти всех теплых фронтов и имеет значительные размеры. Летом, из-за неустойчивости масс и сильного турбулентного перемешивания, образование пленки не наблюдается.

2. Барическое поле. Для возникновения и существования атмосферных фронтов необходима конвергенция (сходимость) различных по свойствам воздушных масс. Барическими образованиями, в которых воздушные массы конвергируют к оси, являются ложбины. Поэтому все фронты совпадают с осью

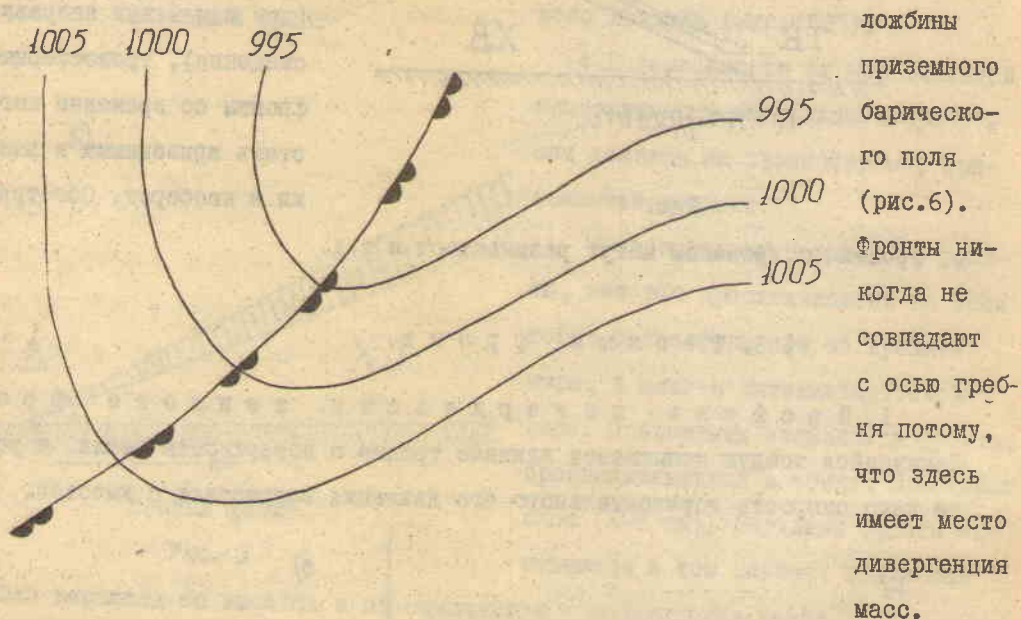


Рис. 6 Положение фронта в барическом поле

На картах топографии нижних уровней фронт также совпадает с осью ложбины. На картах топографии высоких уровней барическое поле определяется горизонтальным распределением температуры в нижележащем слое атмосферы. Ложбины формируются над районами, занятыми однородными холодными массами и линия фронта, разделяя теплую и холодную массы, не может являться осью ложбины холода. Поэтому на картах барической топографии высоких уровней фронт всегда смещен относительно оси ложбины.

Высота уровня, на котором фронт выходит из ложбины, зависит от степени выраженности барического поля у земли и от горизонтальных контрастов температуры. Если ложбина у поверхности земли выражена хорошо, а горизон-

тальные контрасты температуры в нижнем слое тропосферы небольшие, то фронт будет являться осью ложбины даже на уровне изобарической поверхности 500 мб. Если же ложбина у земли выражена слабо, а горизонтальные контрасты средних температур в нижних 1.5-2 километрах большие, то уже на уровне изобарической поверхности 850 мб фронт не будет совпадать с осью ложбины.

Анализ карт показывает, что на картах AT_{850} фронты в подавляющем большинстве случаев совпадают с осью ложбины, на AT_{700} - также иногда могут проходить по оси, на AT_{500} - чаще выходят из ложбины, а на картах AT_{300} , AT_{200} , AT_{100} они никогда не совпадают с осью ложбины.

На картах высоких уровней теплый фронт лежит в тыловой части ложбины, в зоне параллельных изогипс.

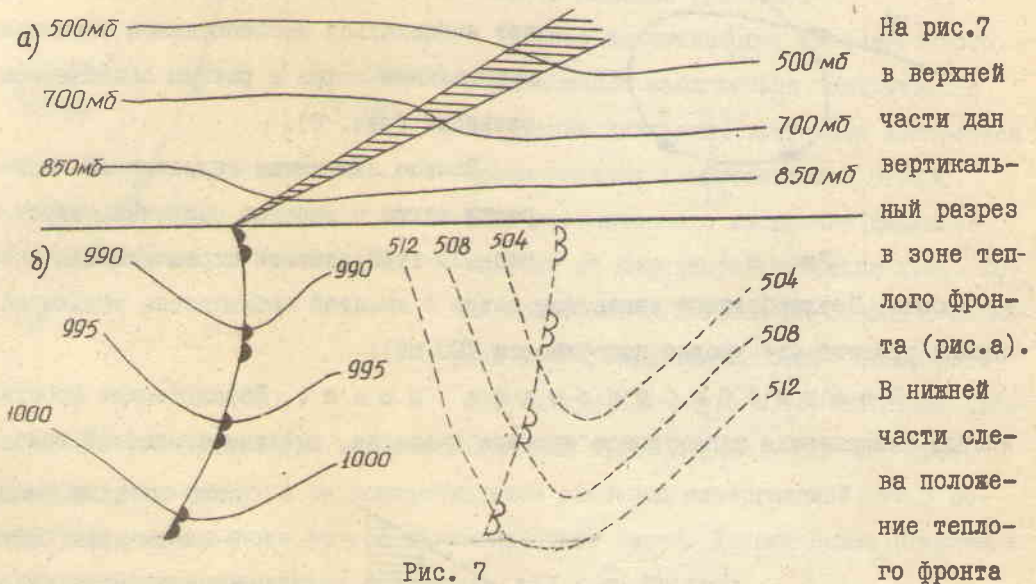


Рис. 7

и барическое поле у земли, в правой - поле изогипс AT_{500} и положение фронта на AT_{500} . В вертикальной плоскости изобарические поверхности вблизи поверхности фронта имеют прогиб вниз. На нижних уровнях прогиб совпадает с фронтальной поверхностью, на верхних лежит впереди нее, так, что фронтальная поверхность смещена в сторону теплого воздуха (рис. 7'а')

3. Поле ветра в зоне фронта. Так как фронты у поверхности земли всегда проходят по оси ложбины, то при прохождении всех фронтов через пункт наблюдений ветер поворачивает вправо. Например, при прохождении теплого фронта, изображенного на рисунке 7, ветер поворачивает с юго-западного перед фронтом, на северо-западный - за фронтом.

С приближением фронта к пункту наблюдений ветер усиливается вследствие того, что барический градиент возрастает в направлении оси ложбины.

На тех уровнях, на которых фронт совпадает с осью ложбины, ветер при

прохождении фронта поворачивает вправо и усиливается. На тех уровнях, где фронт выходит из ложбины, правый поворот ветра наблюдается перед теплым фронтом. При прохождении фронта направление ветра почти не меняется, а сила ветра резко возрастает в связи с увеличением барического градиента.

На картах от $\frac{500}{1000}$ фронтальная зона располагается впереди приземной линии теплого фронта. Поэтому впереди линии приземного фронта на карте от $\frac{500}{1000}$ наблюдаются большие скорости термического ветра.

В вертикальной плоскости в зоне теплого фронта имеет место правый поворот ветра с высотой, обусловленный адвекцией тепла. В отдельных случаях при переходе через фронтальный слой может наблюдаться петлеобразное изменение направления ветра с резким ослаблением скорости (рис. 8).

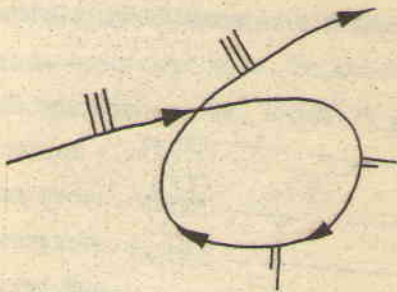


Рис. 8

Резкое изменение направления и скорости ветра с высотой свидетельствует о сильном турбулентном перемешивании в зоне фронта. Петлеобразное изменение ветра с высотой наблюдается только на низких уровнях (до уровня поверхности 700 мб).

4. И з а л л о б а р и ч е с к о е п о л е . Перед теплым фронтом всегда наблюдается адвективное падение давления, вызванное заменой холод-

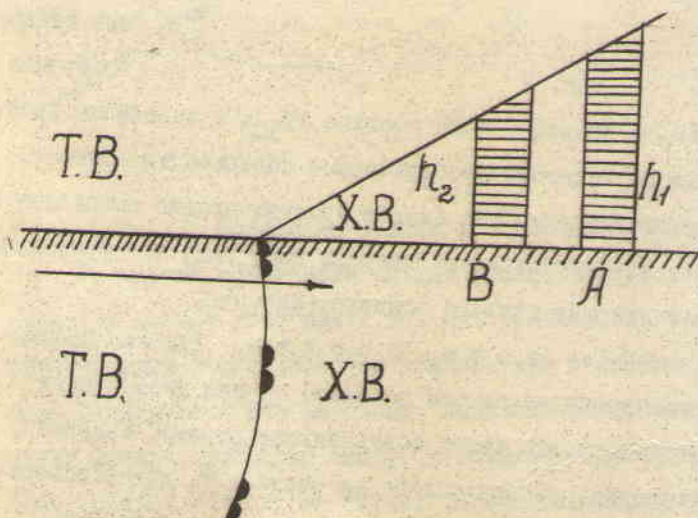


Рис. 9

ного воздуха теплым. В самом деле, если теплый фронт движется в направлении указанном стрелкой (рис.9), то, например, в пункте А столб холодного воздуха высотой h_1 со временем заменится столбом высотой h_2 . Адвективное падение давления будет равно разности весов

холодного и теплого воздуха в столбе с единичным сечением и высотой, равной $h_1 - h_2$. Если плотность теплого воздуха ρ_1 , а холодного ρ_2 , то изме-

нение давления за промежуток времени, в течение которого фронт пройдет расстояние АВ, будет равно:

$$\Delta P = (h_1 - h_2)(\rho_2 - \rho_1)g$$

Величина адвективного падения давления будет зависеть от разности температур теплого и холодного воздуха и от скорости смещения фронта. Чем больше разность температур и чем больше скорость, тем сильнее будет падать давление.

Замена холодного воздуха теплым наблюдается вдоль всей линии фронта, поэтому вдоль всей линии имеет место падение давления. Изогенденции оформляют замкнутую, вытянутую вдоль фронта, область падения (рис.10).

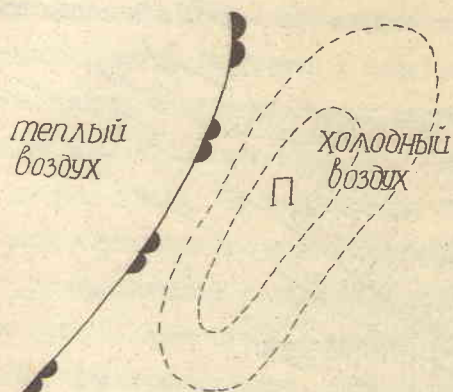


Рис. 10

Кроме адвективного, в зоне теплого фронта может наблюдаться динамическое изменение давления, вызванное изменением массы воздуха в вертикальном столбе. Знак динамического изменения давления зависит от характера vergence масс. Если приземная конвергенция потока с избытком компенсируется высотной дивергенцией, то масса воздуха в вертикальном столбе уменьшится и давление в области ложбины будет падать. Если наоборот, приземная конвергенция не компенсируется высотной дивергенцией, то у поверхности земли в зоне фронта давление будет расти. Динамическое изменение давления может наблюдаться как перед, так и за фронтом.

Наиболее часто перед теплым фронтом наблюдается область падения давления, но падение может быть и за фронтом. Иногда и перед и за фронтом может быть рост давления, но перед фронтом рост будет меньше, чем за фронтом.

5. Поле температуры в зоне фронта. У поверхности земли фронт характеризуется большими горизонтальными градиентами температуры, которые иногда сохраняются во всем слое тропосферы. При прохождении фронта температура может повыситься на 5-10, а иногда и на 15°C.

У поверхности земли на распределение температуры в зоне теплого фронта сильное влияние могут оказывать местные условия, характер облачности, ветер и другие погодные характеристики. Например, зимой до прихода теплого фронта на территорию ЕТС и Западной Сибири здесь может длительное время удерживаться ясная, тихая, морозная погода. У земли температура снижается

до $35-40^{\circ}\text{C}$. В то же время в нижнем слое атмосферы наблюдаются мощные инверсии температуры (на высоте 1-1.5 км температуры могут быть порядка $-20 -25^{\circ}$). При приближении теплого фронта натекает облачность и усиливается ветер. Ветер, перемешивая воздух, выравнивает температуру приземного слоя, облачность, задерживая земное излучение, обуславливает радиационное повышение температуры. Поэтому далеко впереди приземной линии теплого фронта может наблюдаться резкое повышение температуры. В гребне или антициклоне при ясной, тихой погоде температуры могут быть порядка $-40, -50^{\circ}\text{C}$, в районах, где наблюдается предфронтальная облачность и ветер, порядка $-20, -25^{\circ}\text{C}$., а за линией фронта, в теплом воздухе $-10, -15^{\circ}\text{C}$. Поэтому при

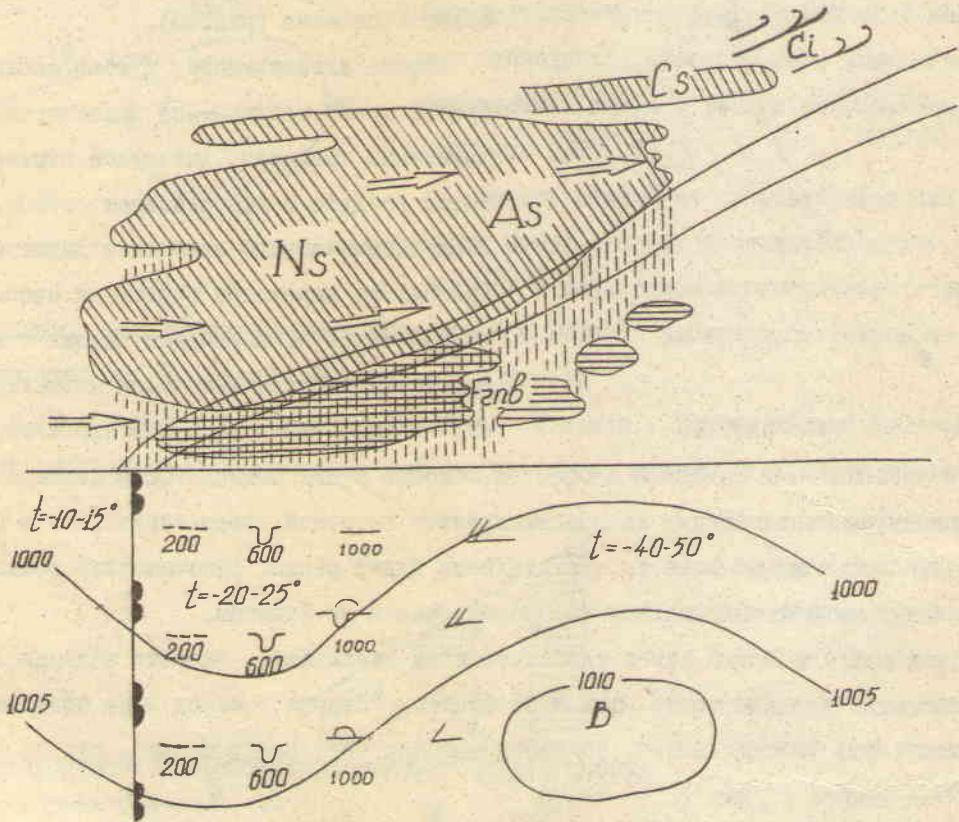


Рис. II

натекании облачности температура повысится на 20°C , а при прохождении фронта всего на 10° (рис. II). Неопытные инженеры-синоптики вместо настоящего фронта могут провести фронт по линии резкого изменения температуры. Такие фронты называются мнимыми (т.е. несуществующими). Мнимые фронты легко отличить от действительных, так как они не выражены ни в каких элементах, кроме температуры (облачность, осадки, ось ложбины, падение давления, поворот ветра - наблюдаются позади линии мнимого теплого фронта).

В теплую половину года различие температуры по обе стороны теплого фронта часто невелико. В отдельных случаях днем в предфронтальном континен-

тальном сухом воздухе, при малом развитии облачности в приземном слое температура может оказаться выше, чем в зафронтальной теплой влажной массе. При прохождении фронта у земли в этом случае температура может несколько снизиться, т.е. фронт в поле температуры будет замаскирован. Для того, чтобы отличить маскированный теплый фронт от холодного, необходимо проанализировать весь комплекс погодных условий, связанных с фронтом, рассмотреть суточный ход температуры (ночью маскировка фронта не наблюдается), и характер изменения температуры при прохождении фронта на высотах.

В свободной атмосфере при прохождении теплого фронта всегда наблюдается повышение температуры. Поскольку на высотах влияние подстилающей поверхности мало, то фронты в поле температуры на картах АТ часто выражены более четко, чем на приземных картах. Например, на карте АТ₈₅₀ главному фронту всегда соответствует зона сгущенных изотерм, а позади ТФ оформляется гребень тепла. На картах более высоких уровней также может прослеживаться зона сгущенных изотерм и гребень тепла.

Географическое положение линии приземного фронта совпадает с положением ВФЗ на карте $OT_{\frac{500}{1000}}$, причем наибольшие контрасты средней температуры нижнего пятикилометрового слоя тропосферы отмечаются впереди линии теплого фронта. Позади этой линии располагается гребень тепла.

Под одной ВФЗ на приземной карте может наблюдаться несколько фронтов. Это значит, что ВФЗ, соответствующие различным фронтам, могут сливаться. В таких случаях контрасты в них усиливаются. Слияние фронтальных зон особенно часто наблюдается в предгорных районах, т.к. здесь происходит резкое уменьшение скорости смещения фронтов.

Фронтальные зоны могут существовать и в стратосфере. Поэтому на картах относительной топографии нижней стратосферы (например, на $OT_{\frac{100}{200}}$) приземному фронту могут соответствовать зоны больших горизонтальных градиентов температуры. Направление горизонтального градиента температуры в стратосфере противоположно направлению градиента в тропосфере. Т.е. над тропосферными областями холода в стратосфере располагаются области тепла, а над областями тепла - области холода.

Смена направления градиента при переходе из тропосферы в стратосферу объясняется тем, что в холодной воздушной массе тропопауза лежит значительно ниже, чем в теплой (рис.12). Над тропопаузой холодной массы (слой h) температура с высотой не меняется ($\frac{\partial T}{\partial Z} = 0$), а в теплой продолжает понижаться ($\frac{\partial T}{\partial Z} < 0$).

Поэтому горизонтальный градиент температуры ($\frac{\partial T}{\partial Y}$) выше тропопаузы

стратосфера

холодной массы ослабевает и, если разрыв в положении тропопаузы велик, то он становится равным нулю, а выше меняет знак на обратный (рис.12).

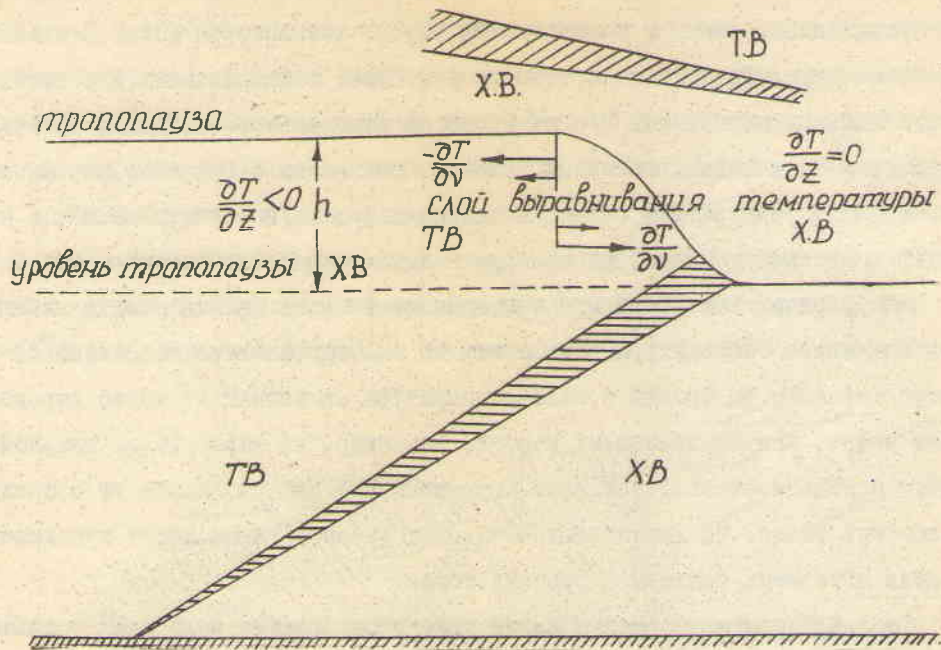


Рис. 12

Если фронтальная поверхность существует и в стратосфере, то она наклонена в обратную сторону по сравнению с тропосферной фронтальной поверхностью.

Очевидно, что не каждому тропосферному фронту соответствует стратосферный, кроме того, в стратосфере могут формироваться фронты, имеющие иную природу, чем тропосферные.

На вертикальных разрезах и эмаграммах теплomu фронту на нижних уровнях соответствует слой инверсии, на верхних - слой уменьшенных вертикальных градиентов температуры.

Слой инверсии большей частью наблюдаются только до высоты 2-х км. На больших высотах, за счет скольжения вверх вдоль поверхности фронта, теплый воздух охлаждается настолько, что становится холоднее нижележащего холодного воздуха. Поэтому вертикальные градиенты температуры здесь положительны, но величина их небольшая.

В слое инверсии, соответствующем теплomu фронту, имеет место увеличение удельной и относительной влажности. Поэтому на графике эмаграммы в зоне теплого фронта кривая точек росы сближается с кривой стратификации.

6. Облачность теплого фронта. При движении теплого фронта, теплый воздух вынужден подниматься вверх по клину холодного. Поднимаясь, воздух охлаждается и на некоторой высоте достигает состояния

насыщения. Высота, на которой воздух достигает состояния насыщения, называется уровнем конденсации. Выше уровня конденсации начинается развитие облачности. На нижних уровнях, где температура относительно высокая и влагосодержание воздуха большое, развиваются слоисто-дождевые облака. На более высоких уровнях, при низких температурах и малом влагосодержании, развиваются облака перистых форм (рис. 13).

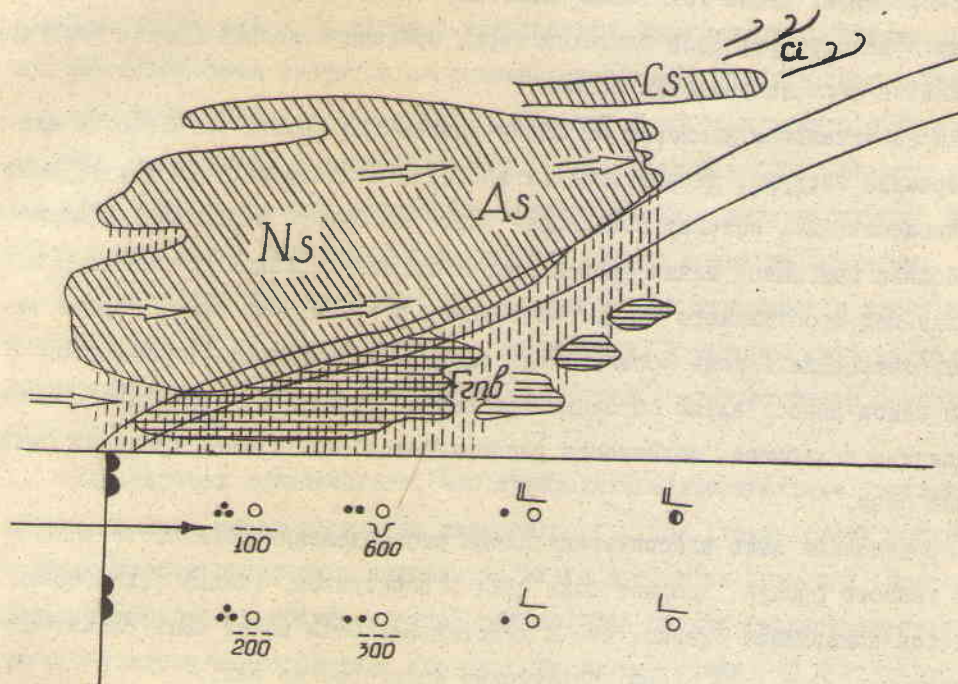


Рис. 13

При приближении фронта к пункту прогноза сначала появляются высокие облака перистых форм (Cs , Ci), со временем они сменяются более плотными облаками среднего (As), а затем нижнего ярусов (Ns). Непосредственно перед линией фронта наблюдаются дождевые облака, нижняя граница которых может колебаться от 50–100 м до 600–1000 м. По горизонтали ширина зоны облачности может достигать 1000 км, т.е. за сутки до прохождения теплого фронта через пункт прогноза могут появиться перистые облака с одной из сторон горизонта. Анализ синоптических карт показывает, что вначале развития циклона ширина зоны облачности небольшая: дождевые облака сменяются узкой зоной высоких облаков. По мере углубления циклона верхняя облачность (Ci , Cs) растекается далеко вперед, за счет чего происходит расширение зоны облачности. Растекание верхней облачности вызывается тем, что на высотах воздух имеет большие скорости, чем в нижних слоях.

Вертикальная мощность различных форм облаков не одинаковая. Ns могут проследиваться от нижней границы фронтальной зоны до высоты 6–8 км, и иногда и до тропопаузы. Мощность As не превышает одного километра, а $Сi$ образуют лишь тонкую пленку. Объясняется это тем, что вблизи приземной линии фронта вертикальные движения обусловлены нестационарностью горизонтальных потоков, приземным трением и разрывом ветра с высотой, характеризуются большими скоростями. Кроме того этим движениям способствует тепло конденсации. Поэтому в непосредственной близости перед приземной линией фронта развиваются мощные слоисто-дождевые облака.

На значительном удалении от линии приземного фронта уменьшается влагосодержание воздуха, ослабевают как восходящие движения, так и турбулентное перемешивание, поэтому облачность имеет небольшую вертикальную мощность.

Вблизи приземной линии фронта нижняя граница облаков совпадает с нижней границей фронтального слоя. Объясняется это тем, что здесь турбулентное перемешивание в зоне фронта очень сильное и облачность развивается внутри самой зоны. Далеко от линии приземного фронта, где турбулентное перемешивание ослаблено, облачность располагается над верхней границей фронтальной зоны.

14 Приведенная выше классическая схема распределения облачности вблизи линии теплого фронта, впервые была дана Т. Бергероном. Анализ атмосферных процессов показывает однако, что в действительности могут быть значительные отклонения от этой схемы. Перечислим некоторые из них.

а) Под слоем Ns очень часто наблюдаются разорванно-дождевые облака ($Fznb$). Образованию $Fznb$ способствует большое влагосодержание воздуха, обусловленное испарением выпадающих осадков, и охлаждение воздуха, вызванное расширением его в области сильного падения давления.

б) Зимой под слоем фронтальной облачности в холодном воздухе может быть развита сплошная слоистая или слоисто-кучевая облачность. В этих случаях фронтальная облачность с земли не видна и смена облаков на приземной карте не будет отражена.

в) Летом, при большой неустойчивости теплого воздуха и сильно развитой турбулентности во фронтальной зоне, вблизи приземной линии фронта могут развиваться кучево-дождевые облака, переходящие затем в слоисто-дождевые. Обложные осадки из слоисто-дождевых облаков в этом случае могут перейти в ливневые, сопровождающиеся грозой и градом.

г) Зимой внутри теплой устойчивой массы могут развиваться слоистые облака. В таких случаях слоисто-дождевая облачность постепенно сменяется сло-

истой и сплошной покров облачности наблюдается как перед, так и за фронтом.

Летом, при неустойчивой стратификации теплого воздуха, в нем могут развиваться внутримассовые кучевые облака.

д) Часто фронтальная облачность не образует сплошного покрова, так что над отдельными участками фронтальной зоны наступает полное прояснение. Такие прояснения могут быть следствием интенсивной сублимации облачных частиц на снежинках, попавших в облако из вышележащих слоев. Действие снежинок аналогично действию твердой углекислоты, "засеянной" в облако. Возможно, что прояснения являются следствием нисходящих турбулентных движений.

е) Между облаками различных ярусов или в облаках одного и того же яруса могут отмечаться безоблачные слои. Горизонтальная протяженность их может исчисляться сотнями километров, вертикальная - сотнями метров. Причины образования таких безоблачных слоев пока еще до конца не выяснены.

П.И.Смирнов предполагает, что теплый воздух поднимается вдоль поверхности фронта не по прямой линии, а по спирали, у которой есть восходящие и горизонтальные ветви. Горизонтальным участкам и соответствуют безоблачные слои.

Л.Т.Матвеев предполагает, что турбулентные вертикальные движения на разных уровнях имеют различную интенсивность. Под слоями слабо развитой турбулентности происходит накопление влаги и твердых примесей, поэтому здесь образуются наиболее плотные облака. Под слоями сильной турбулентности развиваются менее плотные облака, или вообще облака не развиваются.

ж) Если воздушные массы, разделяемые фронтом, имеют малое влагосодержание, то на поверхности фронта облака нижнего яруса не развиваются или фронт проходит вообще при ясной погоде. Такие "сухие" фронты над Западной Сибирью наблюдаются иногда в летний период при вторжении ТВ из районов Средней Азии и Казахстана. Над равнинными районами Казахстана без хорошо развитой облачности и осадков могут проходить как холодные фронты с севера на юг, так и теплые с запада на восток или с юго-запада на северо-восток.

7. О с а д к и . Перед теплым фронтом наблюдается широкая зона обложных осадков. Наибольшая интенсивность осадков отмечается в центре области падения давления. При неустойчивости и большом влагосодержании теплого воздуха при прохождении теплого фронта летом могут отмечаться ливни.

Зимой обложные предфронтальные осадки могут сменяться слабыми или моросящими внутримассовыми осадками теплой, устойчивой воздушной массы.

При устойчивом состоянии теплого воздуха и малом влагосодержании его фронты могут проходить без осадков.

8. О с о б ы е я в л е н и я . Мы уже говорили, что с теплыми фронтами могут быть связаны ливни, грозы, град.

Зимой при прохождении теплых фронтов в подавляющем большинстве случаев, отмечаются метели.

Наконец, перед теплыми фронтами могут наблюдаться туманы. Это фронтальные туманы, развитию которых способствует расширение воздуха при падении давления и большая влажность предфронтального воздуха.

Зимой и в переходные сезоны года за теплым фронтом могут наблюдаться адвективные туманы.

§ 4. П р и з н а к и п р о х о ж д е н и я т е п л о г о ф р о н т а ч е р е з п у н к т н а б л ю д е н и й

Наряду с анализом карт, вертикальных разрезов, аэрологических диаграмм, инженер-синоптик должен непрерывно следить за состоянием неба, характером ветра и осадков, видом термо-, баро- и гигрограмм.

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

Перистая облачность сменяется более плотными перисто-слоистыми, затем высокослоистыми облаками. За несколько часов до прохождения фронта появляется слоисто-дождевая облачность, и начинают выпадать осадки.

12 Одновременно с появлением облачности усиливается ветер и происходит постепенный поворот его вправо. На барограмме отмечается падение давления, усиливающееся по мере приближения фронта. Зимой натекание облаков сопровождается постепенным повышением температуры и влажности (абсолютной и относительной). Летом натекание облаков сопровождается постепенным понижением температуры, т.к. облака ослабляют радиационный прогрев.

13 Момент прохождения фронта совпадает с резким повышением кривой термограммы, резким поворотом ветра вправо, прекращением осадков, сменой падения на рост давления или ослаблением падения.

Летом момент прохождения фронта совпадает с полным прояснением неба, зимой довольно часто со сменой слоисто-дождевых облаков слоистыми.

После прохождения фронта кривые термограммы, барограммы и гигрограммы имеют вид ровных кривых, ветер постепенно ослабевает, облачность рассеивается.

На рисунке 14 дана картина смены погоды в пункте наблюдения и ход кривых давления (P), температуры (T) и влажности (F) при прохождении теплого

8. О с о б ы е я в л е н и я . Мы уже говорили, что с теплыми фронтами могут быть связаны ливни, грозы, град.

Зимой при прохождении теплых фронтов в подавляющем большинстве случаев, отмечаются метели.

Наконец, перед теплыми фронтами могут наблюдаться туманы. Это фронтальные туманы, развитию которых способствует расширение воздуха при падении давления и большая влажность предфронтального воздуха.

Зимой и в переходные сезоны года за теплым фронтом могут наблюдаться адвективные туманы.

§ 4. П р и з н а к и п р о х о ж д е н и я т е п л о г о ф р о н т а ч е р е з п у н к т н а б л ю д е н и й

Наряду с анализом карт, вертикальных разрезов, аэрологических диаграмм, инженер-синоптик должен непрерывно следить за состоянием неба, характером ветра и осадков, видом термо-, баро- и гигрограмм.

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

Перистая облачность сменяется более плотными перисто-слоистыми, затем высокостроистыми облаками. За несколько часов до прохождения фронта появляется слоисто-дождевая облачность, и начинают выпадать осадки.

12 Одновременно с появлением облачности усиливается ветер и происходит постепенный поворот его вправо. На барограмме отмечается падение давления, усиливающееся по мере приближения фронта. Зимой натекание облаков сопровождается постепенным повышением температуры и влажности (абсолютной и относительной). Летом натекание облаков сопровождается постепенным понижением температуры, т.к. облака ослабляют радиационный прогрев.

13 Момент прохождения фронта совпадает с резким повышением кривой термограммы, резким поворотом ветра вправо, прекращением осадков, сменой падения на рост давления или ослаблением падения.

Летом момент прохождения фронта совпадает с полным прояснением неба, зимой довольно часто со сменой слоисто-дождевых облаков слоистыми.

После прохождения фронта кривые термограммы, барограммы и гигрограммы имеют вид ровных кривых, ветер постепенно ослабевает, облачность рассеивается.

На рисунке 14 дана картина смены погоды в пункте наблюдения и ход кривых давления (P), температуры (T) и влажности (F) при прохождении теплого

фронта.

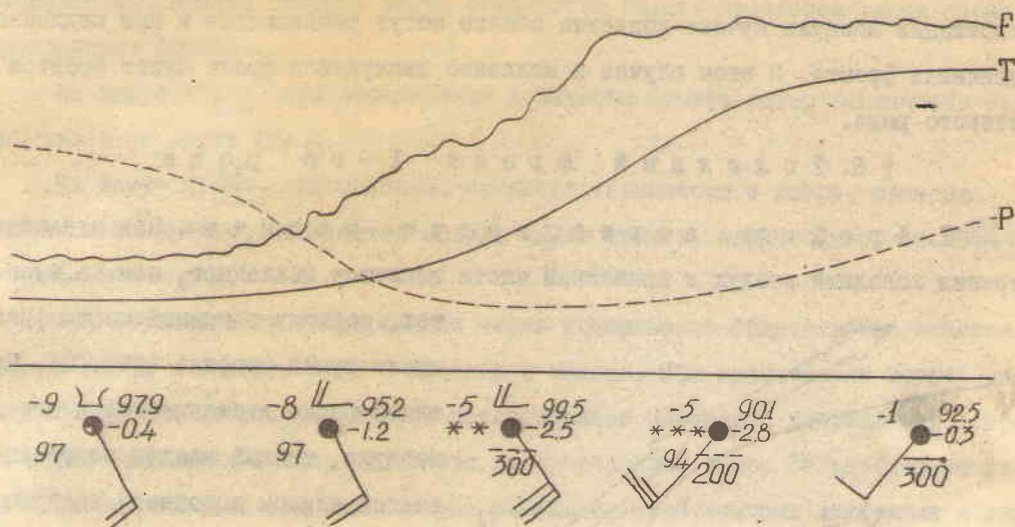


Рис. 14

В случае отклонений характеристик фронта от классической схемы некоторые из перечисленных признаков прохождения теплого фронта могут не наблюдаться.

§ 5. Холодный фронт

Холодные фронты делятся на фронты I и II-го рода. Холодными фронтами I-го рода называются фронты, с которыми связаны облачные системы *Ns*, *As*, *Cs*, *Si* и зафронтальные зоны обложных осадков. Это чаще всего медленно перемещающиеся фронты. Теплые массы, расположенные перед ними, стратифицированы устойчиво.

Холодными фронтами I-го рода являются те участки их, которые расположены вблизи центра циклона или на его крайней периферии, где малы нормальные к фронту составляющие ветра в холодном воздухе.

15 Холодными фронтами II-го рода называются те, с которыми связаны предфронтальные облака кучево-дождевых форм и предфронтальные зоны осадков. Это чаще всего быстро перемещающиеся фронты. Теплые массы, расположенные перед ними, стратифицированы неустойчиво.

Холодными фронтами II-го рода являются участки фронтов, расположенные в зоне сильных ветров, с большой нормальной составляющей скорости к линии фронта в холодной воздушной массе.

Скорость перемещения холодных фронтов не определяет их деления на фронты I-го и II-го рода. При устойчивой стратификации воздуха и быстро движущиеся фронты могут не сопровождаться развитием кучево-дождевых облаков. В

этом случае они будут фронтами I-го рода. Наоборот, при неустойчивой стратификации воздуха кучево-дождевые облака могут развиваться и при медленном движении фронта. В этом случае и медленно движущийся фронт будет фронтом второго рода.

§ 6. Холодный фронт I-го рода

1. Профиль поверхности фронта. Под влиянием трения холодный воздух в приземной части движется медленнее, чем на высотах, поэтому в нижней части фронт имеет тупой профиль (рис. 15). При такой форме движения холодного воздуха, теплый воздух подталкивается клином холодного воздуха вверх. Поэтому вблизи линии приземного фронта теплый воздух всегда имеет вертикальную составляющую движения, но при устойчивом состоянии теплого воздуха эти вертикальные движения не переходят в конвективные токи. Теплый воздух, получив толчок вверх, приобретает затем скользящее движение вдоль поверхности фронта.

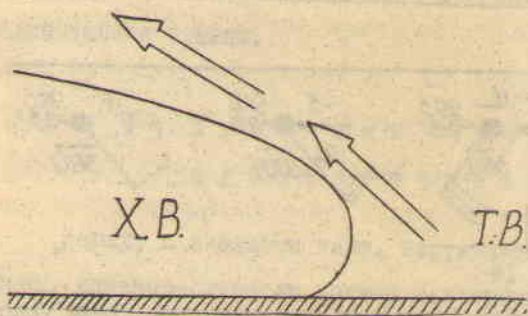


Рис. 15

Та, поэтому в нижней части фронт имеет тупой профиль (рис. 15). При такой форме движения холодного воздуха, теплый воздух подталкивается клином холодного воздуха вверх. Поэтому вблизи линии приземного фронта теплый воздух всегда имеет вертикальную составляющую

движения, но при устойчивом состоянии теплого воздуха эти вертикальные движения не переходят в конвективные токи. Теплый воздух, получив толчок вверх, приобретает затем скользящее движение вдоль поверхности фронта.

2. Барическое поле вблизи фронта. У поверхности земли и на уровне поверхности 850 мб фронт почти всегда проходит по оси ложбины.

При хорошо выраженной ложбине у поверхности земли и при малых горизонтальных контрастах температуры в нижних 3-х километрах, на уровне поверхности 700 мб фронт также проходит по оси ложбины.

При слабо выраженной ложбине и при больших горизонтальных контрастах температуры в нижних трех километрах, на уровне поверхности 700 мб фронт выходит из ложбины. Ложбина на АТ₇₀₀ располагается над холодным воздухом, а фронт проходит в зоне параллельных изогипс - в передней части ложбины. На карте АТ₅₀₀ фронт чаще всего выходит из ложбины в переднюю ее часть.

В вертикальной плоскости на нижних уровнях фронт проходит через точки максимального прогиба изобарических поверхностей. На высоких уровнях точки максимального прогиба изобарических поверхностей не совпадают с поверхностью фронта, а смещаются от нее в сторону холодного воздуха.

3. Поле ветра вблизи фронта. При прохождении фронта у поверхности земли и на АТ₈₅₀, в соответствии с барическим полем, ветер поворачивает вправо.

На карте АТ₇₀₀, если фронт выходит из ложбины, приближение и прохож-

дение фронта сопровождается усилением ветра, без заметного изменения его направления. Правый поворот ветра отмечается спустя некоторое время после прохождения фронта.

На карте АТ₅₀₀ при прохождении холодного фронта ветер изменяется так же, как и на карте АТ₇₀₀.

На карте ОТ₅₀₀¹⁰⁰⁰ максимальные скорости термического ветра, примерно параллельно²⁰ фронту, отмечаются позади линии фронта, перенесенной на ОТ₅₀₀¹⁰⁰⁰ с приземной карты.

При вертикальном зондировании через поверхность фронта ветер поворачивает влево в соответствии с адвекцией холода. При пересечении фронта на низких высотах иногда отмечается петлеобразное изменение направления ветра с резким ослаблением скорости ветра во фронтальной зоне. Петлеобразное изменение направления свидетельствует о больших турбулентных движениях в зоне фронта.

4. И з а л л о б а р и ч е с к о е п о л е в з о н е ф р о н -
т а . При прохождении холодного фронта происходит замена теплого воздуха холодным, поэтому наблюдается адвективный рост давления. Если имеет место динамическое изменение давления то оно накладывается на адвективные изменения. В этом случае фактическое значение давления будет определяться соотношением адвективного и динамического изменений.



Изотенденции образуют вытянутые вдоль линии фронта, замкнутые области изменения давления (рис. 16)

5. П о л е т е м п е р а т у р ы . При прохождении холодного фронта температура снижается на 5-10, а иногда и более градусов. Зимой более резкие изменения температуры отмечаются иногда не при прохождении фронта, а при прохождении границы фронтальных облаков. Здесь, далеко позади от фактического фронта, по температуре можно провести мнимый холодный фронт. Сопоставляя совокупность всех метеорологических элементов, мнимый холодный фронт легко отличить от фактического фронта.

Рис. 16

На картах абсолютной барической топографии температура при прохождении холодного фронта распределяется нормально: перед фронтом температура выше, чем за фронтом.

На картах абсолютной барической топографии температура при прохождении холодного фронта распределяется нормально: перед фронтом температура выше, чем за фронтом.

На карте ОТ₅₀₀¹⁰⁰⁰ холодный фронт, перенесенный с поверхности земли, располагается впереди высотной фронтальной зоны.

На аэрологических диаграммах поверхности холодного фронта соответствует слой инверсии или слой уменьшенных вертикальных градиентов температуры. Так же, как и у теплого фронта, в слое инверсии отмечается повышение удельной и относительной влажности, поэтому кривая точек росы на уровне поверхности фронта сближается с кривой стратификации.

6. О б л а ч н о с т ь холодного фронта I-го рода совершенно аналогична облачности теплого фронта. Отличие состоит лишь в том, что облачность наблюдается после прохождения холодного фронта у земли и смена ее происходит в обратном порядке: Ns , As , Cs , Ci (рис.17)

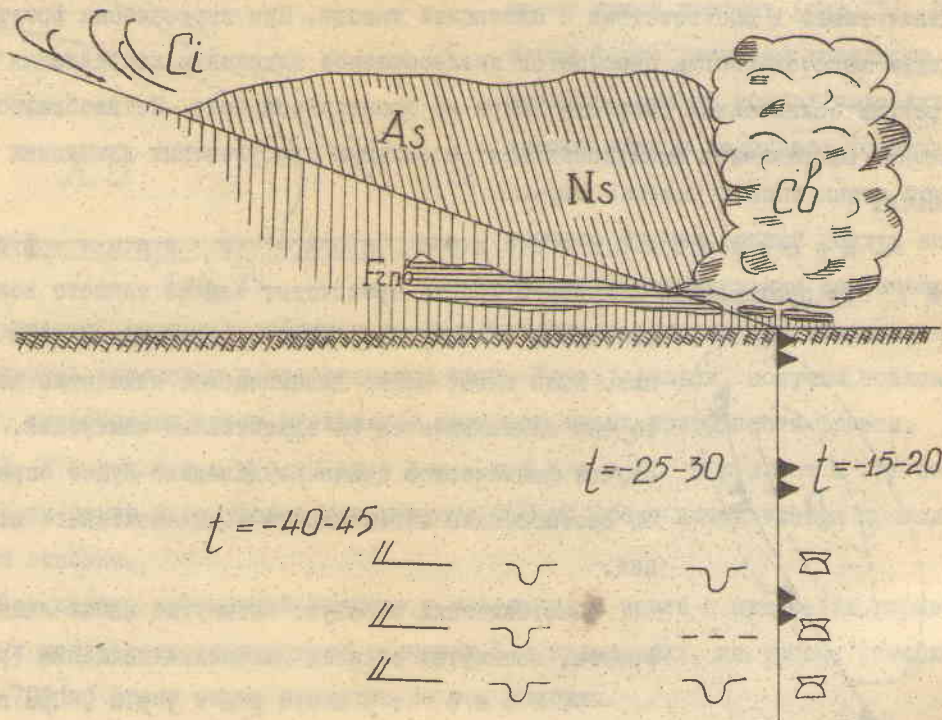


Рис. 17

Кроме всех перечисленных для теплого фронта отклонений от классической схемы облачности, при прохождении холодного фронта, в холодной массе летом могут развиваться внутримассовые кучевые облака, а при неустойчивой стратификации теплой воздушной массы — кучево-дождевые облака.

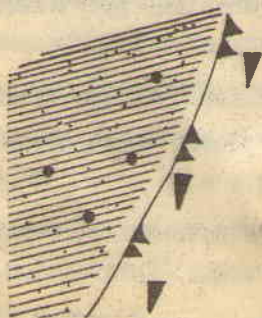


Рис. 18

7. О с а д к и . За холодным фронтом первого рода наблюдается широкая зона обложных осадков (рис.18). В некоторых случаях, наряду с обложными осадками, из кучево-дождевых облаков могут выпадать ливни, сопровождаемые грозой, а иногда и градом.

Кроме того, внутри холодного воздуха из

могут выпадать внутримассовые кратковременные ливни.

8. Особые явления. Кроме перечисленных выше явлений, при прохождении холодных фронтов зимой наблюдаются метели, летом — грозы.

§ 7. Холодный фронт II-го рода

В полях ветра, давления и температуры холодный фронт второго рода выражен более резко, чем фронт первого рода, т.е. с холодным фронтом второго рода связаны большие скорости ветра и более резко выраженный контраст температуры. Ветер часто носит порывистый характер.

Ниже излагаются сведения лишь о тех характеристиках холодного фронта II-го рода, по которым он отличается от фронта I-го рода.

Профиль поверхности фронта более крутой, чем у фронта I-го рода, поэтому теплый воздух при продвижении клина холодного, получает сильный толчок вверх. При неустойчивой стратификации теплого воздуха вынужденный подъем его приводит к развитию мощных конвективных токов и перед линией холодного фронта развивается мощная кучево-дождевая облачность.

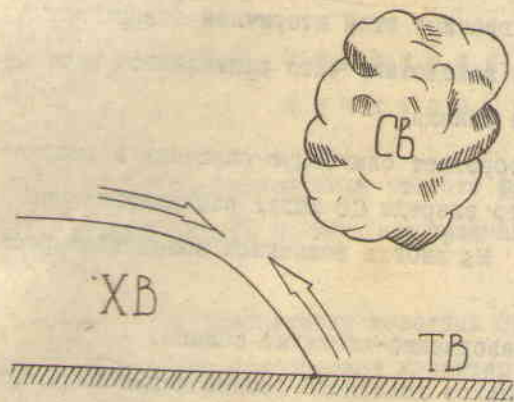


Рис. 19

При мощных восходящих токах перед линией холодного фронта, вдоль большей части поверхности фронта, теплый воздух вынужден скользить вниз (рис.19). Поэтому холодные фронты II-го рода являются поверхностями нисходящего скольжения.

При нисходящих движениях теплый воздух дополнительно прогревается, поэтому на аэрологических диаграммах с холодными фронтами второго рода чаще связаны слои инверсии температуры. В отличие от слоев инверсии теплого фронта и холодного фронта I-го рода, инверсии холодного фронта II-го рода характеризуются уменьшением удельной и относительной влажности. Малые значения относительной влажности объясняются тем, что опускающийся воздух удаляется от состояния насыщения. Уменьшение удельной влажности определяется тем, что воздух, опускающийся с высоких уровней, всегда имеет меньшее влагосодержание, чем воздух нижних уровней. На графике эмаграммы в зоне холодного фронта второго рода кривая точек росы удалена от кривой стратификации.

Облачность холодного фронта II-го рода развивается главным образом перед линией приземного фронта и имеет характер мощной кучево-дождевой облач-

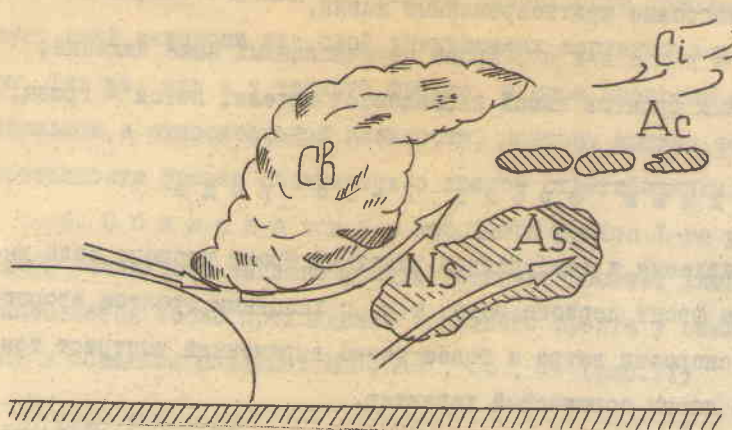


Рис. 20

ности (рис.20). В верхней части кучевая облачность растекается в направлении потока. Поэтому из верхних частей кучевых облаков образуются перистые, распространяющиеся далеко вперед по отношению к приземной линии

фронта. По характеру и положению перистых облаков, холодный фронт второго рода можно принять за теплый фронт.

Поток теплого воздуха, опускающегося вдоль поверхности фронта, на нижних уровнях встречается с потоком восходящего, а потому более холодного воздуха и в дальнейшем может подниматься по нему. Если опускающийся воздух по своим свойствам резко отличается от поднимающегося, то между ними может образоваться поверхность раздела. На границе этой вторичной поверхности раздела появляются волновые движения, вследствие чего развиваются высоко-кучевые, а иногда и перисто-кучевые облака.

Поднимающийся теплый воздух приобретает слагающую смещения в направлении движения фронта, вследствие чего впереди *Cb* могут развиваться все формы облаков (*Ns*, *As*, *Cs*, *Ci*). *Ns* иногда возникают вследствие растекания *Cb*.

Под *Cb* и *Ns* могут развиваться разорванно-слоистые облака.

Горизонтальная протяженность облаков холодного фронта может быть самой различной. В одних случаях облака наблюдаются в очень узкой зоне и не вдоль всего фронта, в других - ширина зоны облаков может достигать 500 км. Когда фронт проходит по углубляющейся ложбине облака развиваются не только впереди, но и за линией фронта.

Характер и ширина зоны облачности находятся в зависимости от времени суток и года. Днем облака более вероятны и имеют большую протяженность, чем ночью. Летом фронты выражены в кучевой облачности более резко, чем зимой.

Вертикальная протяженность кучевых облаков летом очень большая. Часто они простираются до тропопаузы. В холодную половину года вертикальная протяженность даже у *Cb* не превышает 2-4 км.

Основной формой осадков холодного фронта второго рода являются ливневые осадки, выпадающие перед линией фронта. Ширина зоны осадков в одних

случаях может быть узкой, так что ее трудно проследить по данным текущей погоды. В других случаях ливневые осадки из *Cb* сливаются с довольно широкой зоной обложных осадков из *Ns*. Иногда ливни и обложные осадки могут выпадать и перед и за фронтом. Так как ливневые осадки большой интенсивности выпадают при сильно развитой конвекции, то они часто сопровождаются шквалами (сильные вертикальные токи вызывают не менее сильные горизонтальные перемещения воздушных масс).

При значительном влагосодержании холодного воздуха за линией фронта летом, днем также могут выпадать кратковременные внутримассовые дожди ливневого характера.

Как внутримассовые, так и фронтальные ливни могут сопровождаться грозой и градом.

Так как явления, связанные с холодным фронтом второго рода, могут проходить узкой полосой, то для анализа процесса необходимо использовать данные о ливнях и грозах между сроками наблюдений. Кроме того, при прохождении этих фронтов необходимо анализировать суточный ход метеорологических элементов.

§ 8. Признаки прохождения холодных фронтов через пункт наблюдений

Если прохождение теплого фронта прослеживается почти за сутки, то холодные фронты по местным признакам можно заметить не более, чем за 2-3 часа.

16 При приближении холодных фронтов ветер, поворачивая вправо, усиливается и часто приобретает характер порывистого. При усилении ветра отмечается падение давления, правда оно более слабое, чем при приближении теплого фронта. При приближении холодного фронта первого рода усиление и поворот ветра не сопровождается натеканием облачности. При приближении холодного фронта второго рода, наряду с усилением ветра и падением давления, может появиться перистая или перисто-кучевая облачность. В этих случаях только с помощью синоптических карт холодный фронт можно отличить от теплого. Момент прохождения фронта совпадает с началом сильного роста давления, сильными ветрами, иногда доходящими до шквалов, ливнями, а иногда и грозами.

После прохождения фронта первого рода ливни сменяются обложными осадками, ветер, имея направление северной половины горизонта, постепенно стихает, давление растет, облачность сменяется в последовательности *Ns*, *As*, *Cs*, *Cl* температура снижается, влажность уменьшается.

17
 После прохождения холодного фронта второго рода кучево-дождевая облачность исчезает, ливни прекращаются, и в последующем пасмурная погода очень быстро сменяется полным прояснением. Давление очень сильно растет, температура понижается резко, влажность уменьшается, ветер стихает, но неравномерно — слабые ветры могут вновь сменяться сильными. На рис. 21 дан пример смены погоды при прохождении холодного фронта.

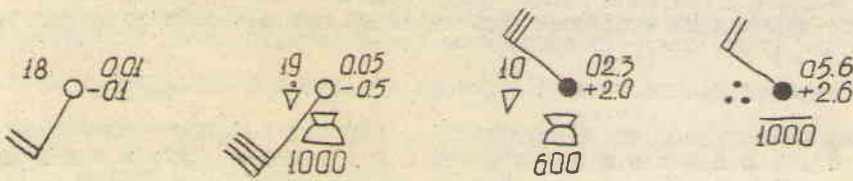
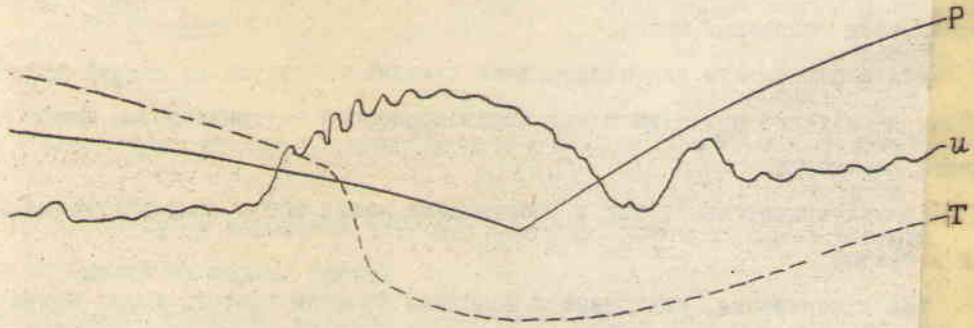


Рис. 21

§ 9. Фронт ооклюзии

Фронтами ооклюзии называются фронты, образующиеся за счет влияния теплого и холодного участков одного фронта.

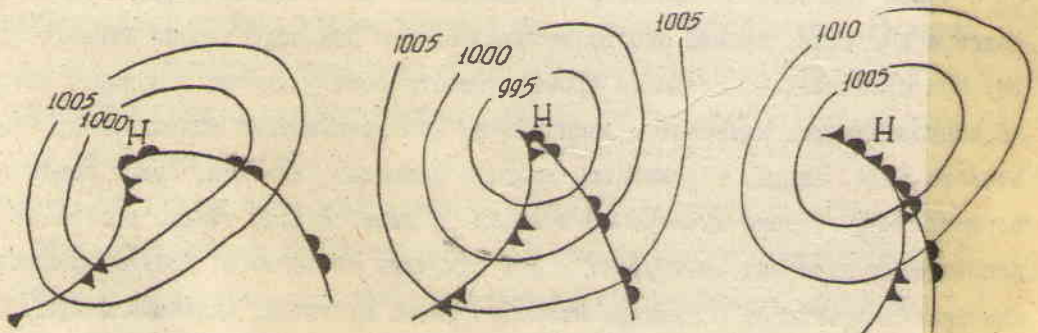


Рис. 22

Во фронтальном циклоне почти всегда имеются две линии конвергенции потоков, являющиеся фронтами теплой и холодной волн. В процессе развития циклона холодный фронт движется быстрее теплого, со временем нагоняет его и сливается с ним. В результате слияния образуется фронт ооклюзии. На рис. 22

показано постепенное сближение и слияние фронтов. Точка, от которой расходятся остающиеся несомкнутыми участки теплого и холодного фронтов, называется точкой окклюзии (точка А). Область заключенная между теплым и холодными фронтами называется теплым сектором циклона. В процессе развития циклона теплый сектор сужается, а в результате окклюдирования теплый воздух с поверхности земли перемещается на высоты. Фронт окклюзии разделяет передфронтальный и зафронтальный холодный воздух. Так как воздух различных секторов циклона перемещается по разным физико-географическим районам, и так как погодные условия в передней и тыловой части циклона неодинаковы, то холодный воздух передней и тыловой части циклона претерпевает разную степень трансформации.

При слиянии теплого и холодного фронтов холодный воздух тыловой и передней части циклона может иметь разные свойства, поэтому между ними образуется поверхность раздела.

В зависимости от термического режима тылового и переднего холодного воздуха фронты окклюзии делятся на холодные и теплые.

Если холодный воздух тыловой части циклона теплее холодного воздуха передней части, то фронт называется окклюзией по типу теплого фронта. Если тыловой холодный воздух холоднее переднего, фронт называется окклюзией по типу холодного фронта.

Над территорией ЕТС, Западной Сибири и Казахстана зимой чаще всего встречаются фронты окклюзии по типу теплого, летом - по типу холодного фронта. Эти сезонные различия объясняются тем, что зимой суша холоднее моря, летом, наоборот, поверхность моря холоднее суши. Большинство циклонов и фронтов перемещается с запада на восток, поэтому морской воздух чаще оказывается тыловым, континентальный - передним.

Если термические свойства тылового и переднего воздуха различаются мало, то фронт окклюзии называется нейтральным.

П р о ф и л ь п о в е р х н о с т и ф р о н т о в о к к л ю з и и . Если тыловой холодный воздух теплее переднего, то будет происходить натекание его на передний - поверхность холодного фронта будет скользить по поверхности теплого фронта и профиль фронта будет иметь вид, изображенный на рис. 23 "а". Точка окклюзии (А) располагается на некоторой высоте впереди приземной линии фронта. На уровнях, расположенных выше точки окклюзии будет отмечаться два фронта.

Если холодный воздух в тыловой части циклона холоднее, чем в передней, то поверхность теплого фронта будет скользить по поверхности холодного фрон-

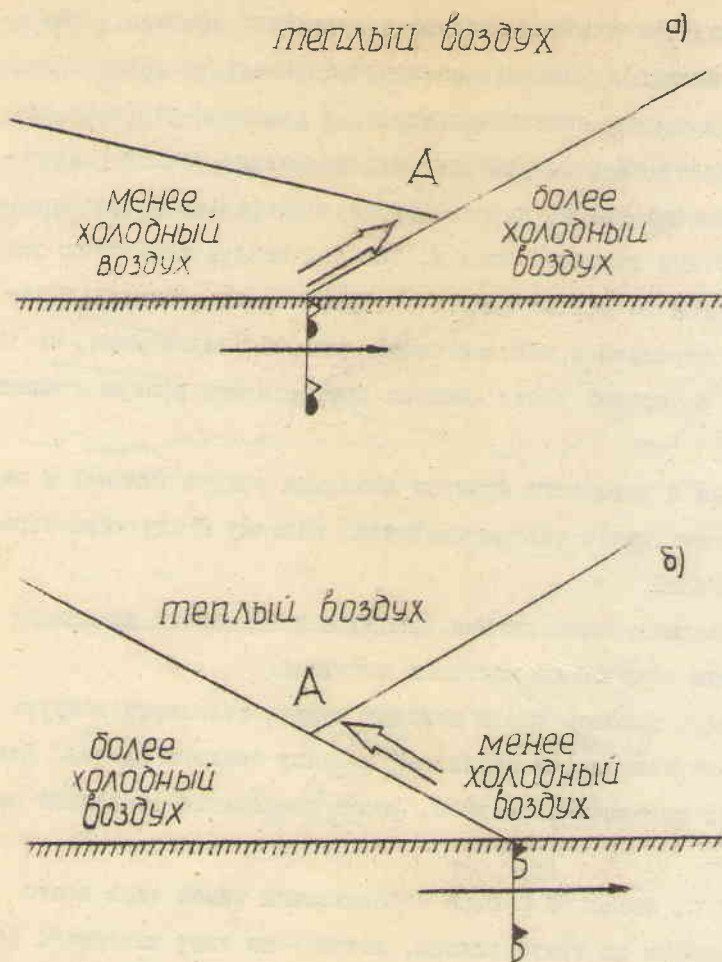


Рис. 23

гая позади холодного фронта.

В вертикальной плоскости на уровнях, расположенных ниже точки окклюзии с поверхностью фронта окклюзии связан прогиб изобарических поверхностей вниз и точки максимального прогиба совпадают с поверхностью фронта. Выше точки окклюзии изобарические поверхности имеют два прогиба, каждый из которых чаще наблюдается не на поверхности фронта, а в холодном воздухе.

3. В е т е р . В соответствии с характером барического поля ветер при прохождении фронтов окклюзии поворачивает вправо. На картах АТ высоких уровней имеется две зоны сильных ветров, одна из которых расположена позади теплого, другая - впереди холодного фронта.

В вертикальной плоскости на нижних уровнях, при подъеме через теплый фронт окклюзии наблюдается правый, при подъеме через холодный фронт окклюзии - левый поворот ветра. Правый поворот всегда более ярко выражен, чем левый потому, что он усиливается правым поворотом, вызванным трением. Левый

та, и профиль фронта будет иметь вид, изображенный на рис. 23"б". На высоких уровнях и здесь будет отмечаться два фронта. Точка окклюзии располагается выше уровня земли и позади приземной линии фронта.

2. Б а р и ч е с к о е п о л е . С фронтами окклюзии в большинстве случаев связаны симметричные, хорошо выраженные ложбины. На уровнях, на которых можно провести два фронта, имеются соответственно и две ложбины: одна впереди теплого, дру-

поворот за счет трения ослабевает, а иногда вообще не прослеживается.

На высоких уровнях, если пересекается поверхность холодного фронта, ветер поворачивает влево, если пересекается поверхность теплого фронта — вправо.

Петлеобразного изменения направления, как правило, не отмечается.

4. **И з о т е н д е н ц и и**. Перед теплым фронтом окклюзии давление падает, но зона наибольшего падения располагается не перед приземной линией фронта, а перед линией верхнего холодного фронта. За фронтом окклюзии типа теплого фронта, в отличие от главного теплого фронта, отмечается сильный рост давления.

Перед холодным фронтом окклюзии также наблюдается заметное падение давления. За фронтом, на некотором удалении от приземной линии отмечается рост давления. Таким образом, с фронтами окклюзии часто связаны изаллобарические пары: замкнутая область падения давления перед фронтом и замкнутая

область роста — за фронтом (рис. 24).

5. **Т е м п е р а - т у р а**. Изменение температуры при прохождении фронтов окклюзии значительно меньше, чем при прохождении главных фронтов. Контраст температуры воздушных масс, разделяемых фронтом окклюзии обычно не превышает 5°C . На высотах, где прослеживаются две линии фронта, контрасты иногда могут быть значительными.

На карте относительной топографии фронту окклюзии соответствует гребень тепла, в начальный период окклюдирования, когда верхний фронт

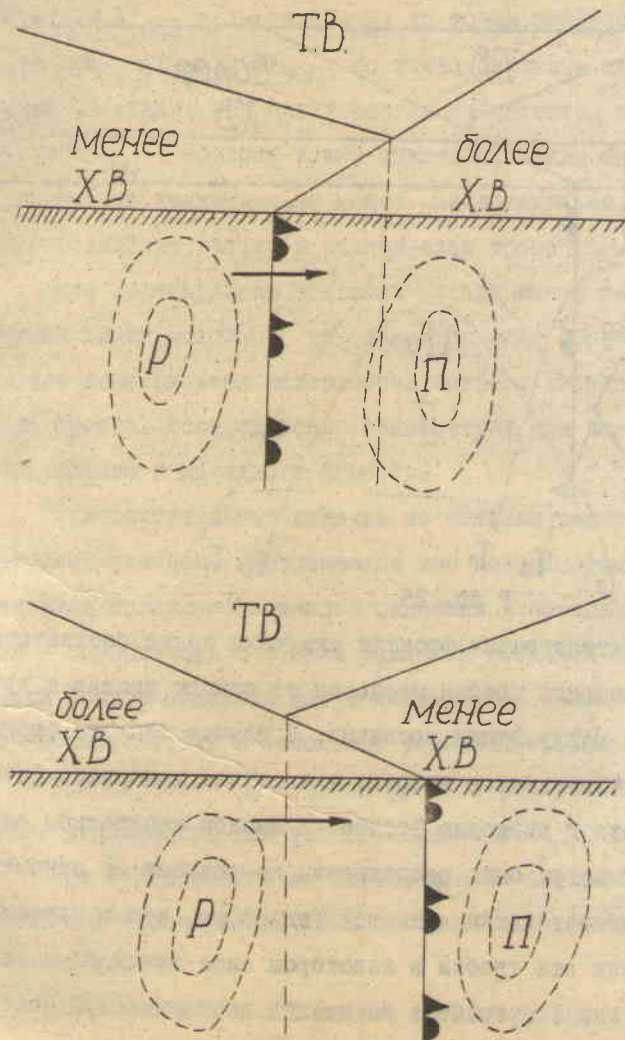
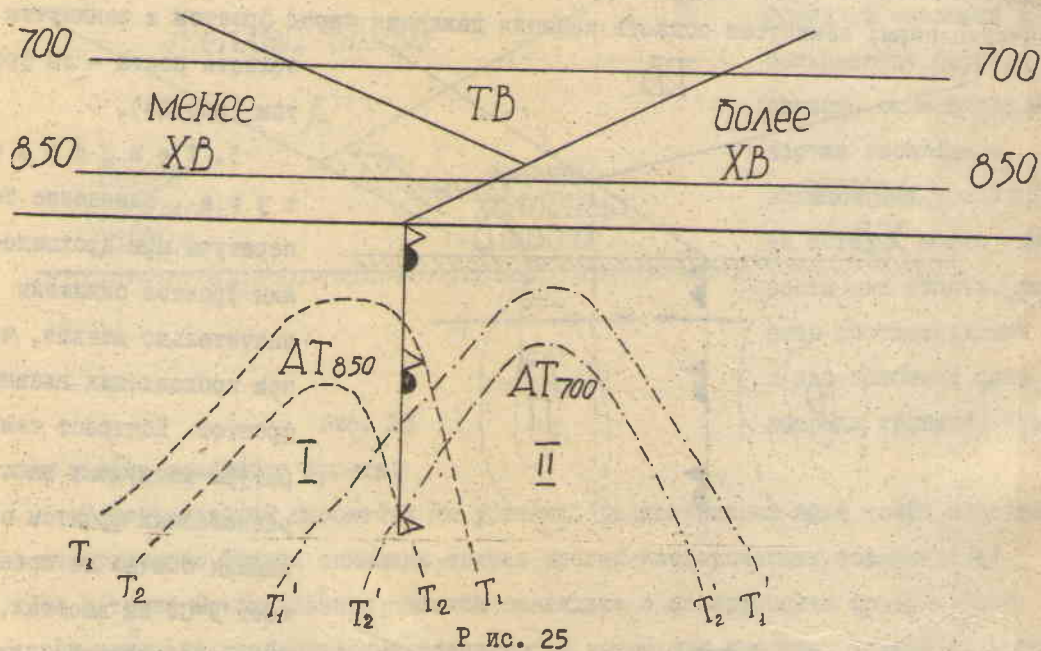


Рис. 24

поднялся невысоко, приземная линия фронта окклюзии проходит почти по оси гребня. Когда точка окклюзии поднимается высоко, в случае теплого фронта окклюзии гребень тепла располагается впереди приземной линии фронта, в случае холодного фронта окклюзии - позади приземного фронта.

Если каждому фронту окклюзии на карте $OT \frac{500}{1000}$ соответствует гребень тепла, то не каждому гребню тепла на $OT \frac{500}{1000}$ соответствует фронт окклюзии у земли. В самом деле, на картах OT гребень тепла наблюдается над теплым сектором циклона, за теплым и перед холодным фронтами. Поэтому анализ фронтов окклюзии с помощью одних карт $OT \frac{500}{1000}$ затруднен.

Если на карте $OT \frac{500}{1000}$ имеется гребень тепла, то соответствует он фронту окклюзии или нет, можно решить с помощью изотерм на картах абсолютной барической топографии.



Р ис. 25

На картах абсолютной топографии фронтам окклюзии также соответствует гребень тепла, причем положение гребня меняется от одного уровня к другому, если точка окклюзии лежит между этими уровнями. В случае теплого фронта окклюзии, гребень заметно перемещается вперед, а в случае холодного фронта окклюзии - назад по отношению к движению фронта. В каждом конкретном случае гребни тепла на картах AT могут быть расположены по-разному по отношению к приземной линии фронта, обязательным является только то, что в случае теплых и холодных фронтов окклюзии эти гребни в некотором слое скачкообразно меняют свое положение (рис.25, где I - гребень на нижней изобарической поверхности II - гребень на вышележащей изобарической поверхности).

Фронты окклюзии типа теплого фронта могут быть двух видов:

- 1) фронт крутой и прослеживается до значительной высоты,
- 2) теплый фронт быстро переходит в инверсию.

В первом случае гребень тепла от карты к карте делает значительно меньший скачок, чем во втором.

Для характеристики термического поля на высотах при наличии фронта окклюзии очень важно знать до каких высот может подниматься теплый воздух, вытесняемый с поверхности земли.

В прежних работах считалось, что теплый воздух может подниматься до тропопаузы. Зубян в своей работе "Вопросы пространственной структуры и анализа фронтов", с помощью изотерм карт АТ, привел многочисленное определение положения пространственной точки окклюзии. При этом для каждого фронта окклюзии определялось, между картами каких уровней совершается скачкообразный сдвиг гребня тепла, соответствующего данному фронту. Если сдвиг происходит от карты АТ₈₅₀ к карте АТ₇₀₀, то точка окклюзии находится между 1.5 и 3 км, если между АТ₇₀₀ и АТ₅₀₀, то точка окклюзии лежит между 3 и 5 км. Исследования показали, что сдвиг всегда наблюдается при переходе от карт АТ₈₅₀ к карте АТ₇₀₀, поэтому точка окклюзии, каким бы старым не был фронт окклюзии, высоко подняться не может. Следовательно, образование фронтов окклюзии происходит только в нижнем слое тропосферы.

При вертикальных подъемах позади линии теплой окклюзии и впереди приземной линии холодной пересекается одна фронтальная поверхность. В первом случае пересекается поверхность бывшего холодного, во втором - бывшего теплого фронта. Распределение температуры при этом аналогично рассмотренному для теплого и холодного фронтов.

При вертикальном подъеме на большом расстоянии впереди теплой и позади холодной окклюзии пересекаются две поверхности фронта. В первом случае пересекается поверхность теплой окклюзии и поверхность холодного фронта; во втором - поверхность холодной окклюзии и теплый фронт. При пересечении поверхности фронта окклюзии могут наблюдаться слабые инверсии или изотермия, которым соответствует небольшое увеличение влажности.

При пересечении главных фронтов распределение температуры такое же, какое указывалось для теплого и холодного фронтов.

При зондировании на значительном расстоянии перед теплой и за холодной окклюзией пересекается одна поверхность - соответственно теплого и холодного фронта.

6. О с а д к и . В начале окклюдирования, когда пространственная точка окклюзии располагается низко, происходит слияние облаков теплого и холодного

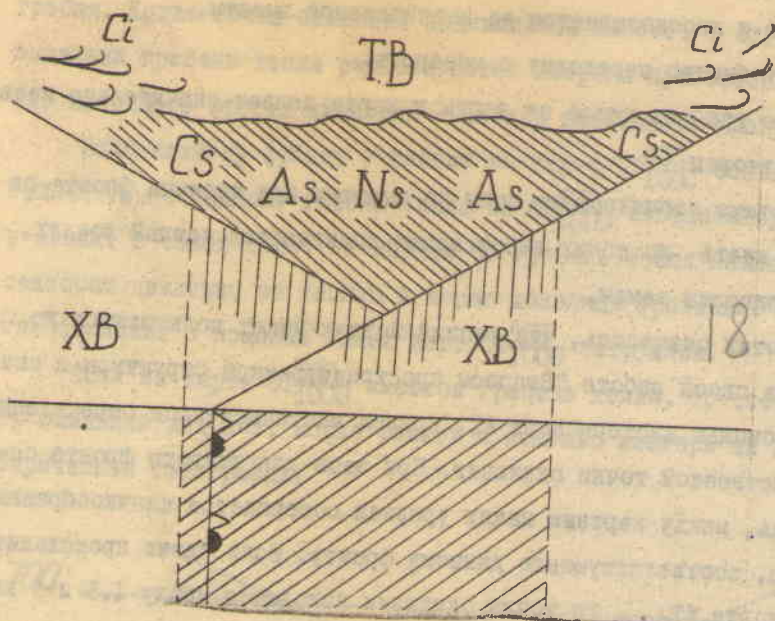


Рис. 26

ними фронтами уменьшается, Ns постепенно могут исчезнуть, тогда останутся только As и др. формы облаков. Зона осадков постепенно сужаясь, перемещается в предфронтальную область, а затем исчезает. В соответствии с профилем фронтальных поверхностей окклюзии, большую часть времени существования фронтов окклюзии облачность $Ns - As - Ci$ и осадки наблюдаются перед приземной линией окклюзии. Часто при прохождении верхнего холодного фронта осадки прекращаются или переходят в морось.

В системе облаков теплого фронта окклюзии часто наблюдаются высоко-кучевые облака, располагающиеся в виде нескольких слоев.

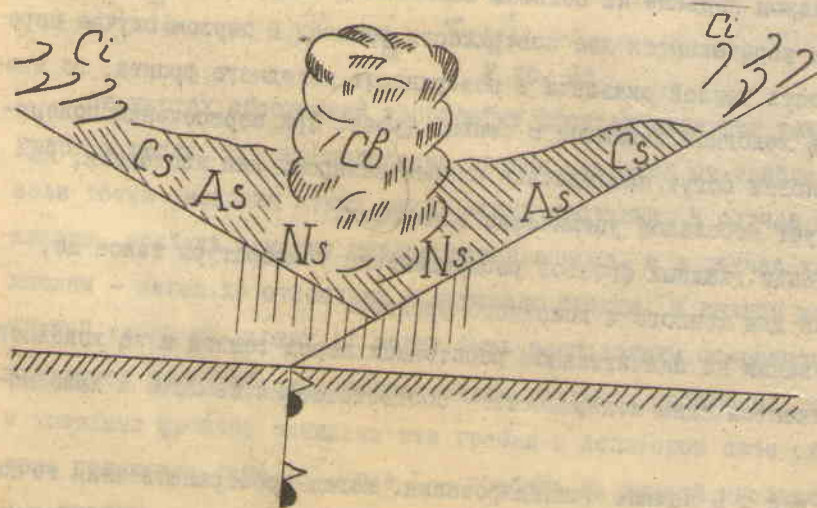


Рис. 27

го фронтов, поэтому горизонтальная протяженность зоны облачности и осадков может быть очень большой (рис.26). Облачность и осадки наблюдаются как перед, так и за линией фронта.

В процессе окклюдирования и подъема верхнего фронта, облачность связанная с верх-

В летний период, наряду с облачностью системы $Ns - Ci$, могут наблюдаться кучево-дождевые облака, связанные с поверхностью холодного фронта. Эти формы облаков наблюдаются

вблизи приземной линии фронта (рис.27). Из С_б могут выпадать ливни, которые наблюдаются в основном перед линией фронта (или точнее, перед линией верхнего холодного фронта). В холодную половину года кучево-дождевые облака не наблюдаются.

При достаточном влагосодержании холодного воздуха на поверхности фронта окклюзии могут образоваться новые слои N_с, из которых выпадают обложные осадки перед теплой и за холодной окклюзией.

Характерной особенностью осадков, связанных с фронтами окклюзии, является их неравномерность.

На развитие облачности и осадков фронтов окклюзии большое влияние оказывают местные условия и время суток. При движении даже на небольшие возвышенности (как, например, отроги Кузнецкого Алатау на юге Томской области) облачность и осадки усиливаются. Днем облачность и осадки выражены значительно сильнее, чем ночью. Ночью и утром фронты могут быть совсем не выражены, а днем при их прохождении наблюдаются ливни и грозы. Поэтому летом очень внимательно нужно следить за процессами над теми районами, где проходят старые размытые фронты окклюзии. Иногда старые фронты окклюзии обостряются и становятся главными. На таких фронтах могут возникать волны и даже циклоны.

7. О с о б ы е я в л е н и я . В зимнее время с фронтами окклюзии могут быть связаны сильные и продолжительные метели. В холодный период года довольно часто - зоны обледенения. Наиболее опасным в смысле обледенения является уровень вблизи верхней точки окклюзии. Объясняется это тем, что на этом уровне располагаются резко различные по температуре и влажности, воздушные массы.

§ 10. Изменение вертикальных профилей фронтов в связи с горизонтальным распределением температуры

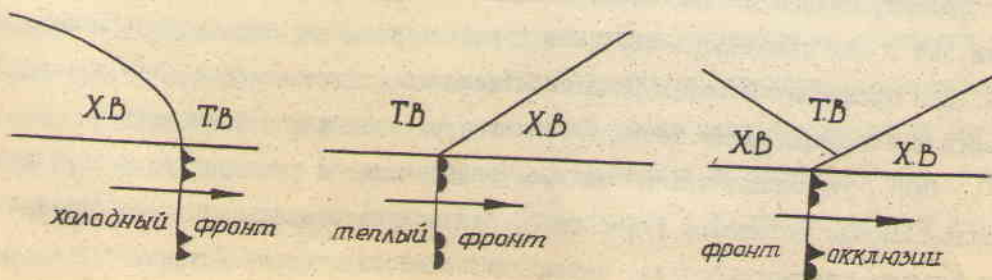


Рис. 28

Выше были рассмотрены классические схемы пространственной структуры фронтов (рис. 28).

Классическая структура фронтов может быть только в тех случаях, когда горизонтальный градиент температуры на всех высотах остается таким же, как и у земли, т.е. когда холодный воздух на всех высотах остается позади теплого (холодный фронт), или холодный воздух на всех высотах — впереди теплого (теплый фронт).

Если горизонтальный градиент температуры изменяется с высотой, то и пространственная структура фронта претерпевает существенные изменения. Приведем несколько примеров, которыми не будут охвачены все возможные в практической работе случаи.

1. Если зимой над Западной Сибирью располагается антициклон с мощными слоями инверсии температуры, а с запада смещается морской умеренный воздух с большими значениями вертикальных градиентов температуры, то горизонтальный градиент температуры с высотой постепенно уменьшается, на некоторой высоте достигает минимума и затем, меняя направление на обратное, увеличивается.

Слой с малыми горизонтальными градиентами температуры имеет толщину порядка 1 км и располагается примерно на высоте 1.5–2.5 км. Его называют слоем выравнивания температуры. Слой выравнивания температуры существенно влияет на структуру фронтальных разделов и на их облачные системы (рис. 29)

В слое выравнивания температуры фронты размываются или просто отсутствуют. Ниже этого слоя наблюдаются стационарные или медленно перемещающиеся фронты, переходящие на высоте в инверсию, с характерной подинверсионной облачностью, которая дает морозящие осадки и слабый снег.

Выше слоя выравнивания располагается один или несколько холодных фронтов, которые достаточно быстро перемещаются в направлении высотных течений. Эти фронты ведут себя совершенно самостоятельно и не зависят от приземных фронтов. Перемещаясь они вызывают похолодание на высоте. Снег, который наблюдается в области антициклона при наличии на его периферии малоподвижного фронта, связан с верхними фронтами. Эти фронты сходны с фронтами окклюзии, но у них облачность верхнего яруса оторвана от облачности нижнего яруса. При прохождении таких фронтов складывается впечатление, что в нижней части тропосферы имеет место аномальное распределение температуры.

Зубяк указывал, что аномальное распределение температуры распространяется иногда до высоты 1.5–2 км. В этих случаях в нижней части фронт имеет характер теплого фронта, затем идет слой выравнивания температуры, а

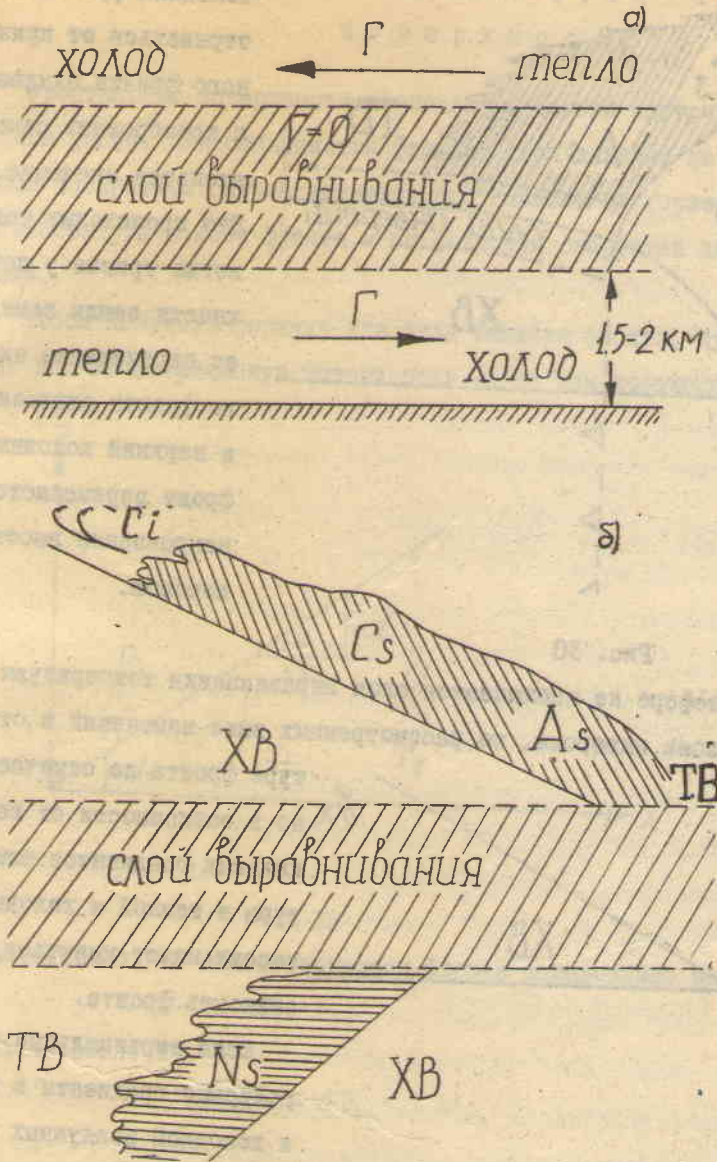


Рис. 29

выше слоя выравнивания происходит холодный фронт (рис. 29 "б").

Если уровень конденсации располагается низко, то и перед нижним теплым фронтом будут выпадать осадки.

2. Если, при рассмотренных в п. I процессах, в нижнем слое атмосферы контрасты температуры невелики, то нижний теплый фронт может отсутствовать, а в свободной атмосфере перемещаются верхние холодные фронты. Поэтому при вторжении волн холода, похолода-

ние может раньше наблюдаться на высоте.

3. Верхние холодные фронты наблюдаются и тогда, когда слой выравнивания температуры отсутствует. В этом случае выхоженный в области мало подвижного антициклона приземный слой воздуха ограничивается на периферии антициклона фронтом, который уже на небольшой высоте переходит в инверсию. Тогда приближающийся к антициклону холодный фронт скользит вверх по этому мало подвижному фронту, а затем перемещается дальше по выхоженному слою воздуха (рис. 30). Аналогичное явление происходит и с приближающимся к антициклону верхним холодным фронтом.

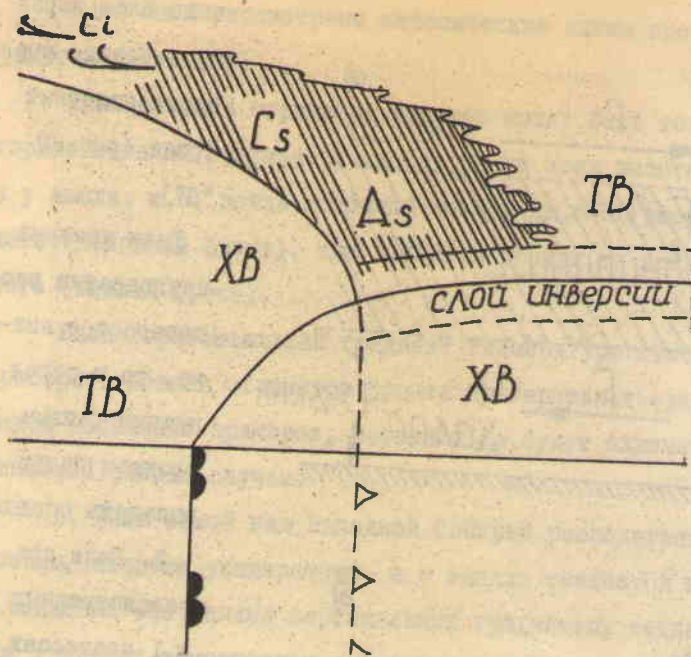


Рис. 30

4. Иногда верхний холодный фронт может отрываться от приземного фронта окклюзии и приобретать самостоятельное значение. Это происходит тогда, когда трение у поверхности земли замедляет перемещение нижнего фронта окклюзии, а верхний холодный фронт перемещается в направлении высотных потоков.

5. Если в атмосфере не наблюдается слоя выравнивания температуры и мощных приземных слоев инверсии, то рассмотренных выше изменений в структуре фронта не отмечается,

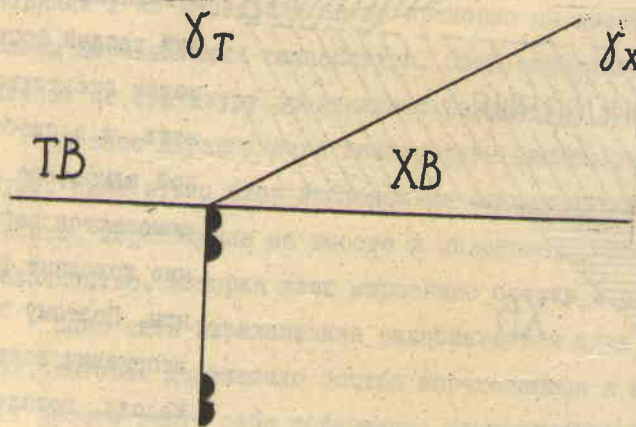


Рис. 31

но в зависимости от вертикальных градиентов температуры в теплой и холодной массах может меняться интенсивность фронта.

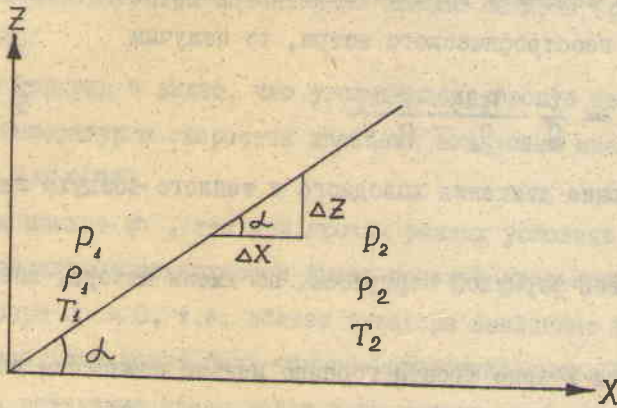
Если вертикальные температурные градиенты в теплой и холодной воздушных массах одинаковы ($\gamma_T = \gamma_X$ на рис.31), то контраст температур в зо-

не фронта с высотой не меняется, не меняется и интенсивность фронта. Если в холодной воздушной массе вертикальный температурный градиент больше, чем в теплой ($\gamma_X > \gamma_T$), то контраст температуры в зоне фронта с высотой растет и фронт обостряется (на высоте фронт выражен лучше, чем у земли). Если вертикальный температурный градиент в теплой массе больше, чем в холодной ($\gamma_T > \gamma_X$), то контраст температуры в зоне фронта с высотой уменьшается и фронт размывается. В этом случае у поверхности земли фронт будет выражен лучше, чем на высотах.

§ II . Угол наклона фронтальной поверхности

Фронтальные поверхности наклонены к земной поверхности под очень небольшим углом. Для большинства фронтов угол наклона не превышает 0.5° . В каждом конкретном случае величина его зависит от горизонтального контраста температуры в зоне фронта и от разности скоростей движения масс вдоль фронта.

Чтобы получить формулу для угла наклона фронта, будем рассматривать фронт как геометрическую поверхность, а не как переходную зону. Направим



ось y вдоль фронта, тогда фронтальная поверхность будет изображаться прямой линией в системе координат xz (рис.32), а наклон ее определяется углом α . Если P_1 и P_2 давление в теплой и холодной массах

Рис. 32

соответственно, то для поверхности фронта справедливо равенство

$$P_1 = P_2, \quad I$$

а следовательно и

$$dP_1 = dP_2, \quad 2$$

но

$$dP_1 = \frac{\partial P_1}{\partial x} dx + \frac{\partial P_1}{\partial z} dz$$

$$dP_2 = \frac{\partial P_2}{\partial x} dx + \frac{\partial P_2}{\partial z} dz.$$

Поэтому

$$\frac{\partial P_1}{\partial x} dx + \frac{\partial P_1}{\partial z} dz = \frac{\partial P_2}{\partial x} dx + \frac{\partial P_2}{\partial z} dz. \quad 3$$

Откуда

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \operatorname{tg} \alpha = - \frac{\frac{\partial P_2}{\partial x} - \frac{\partial P_1}{\partial x}}{\frac{\partial P_2}{\partial z} - \frac{\partial P_1}{\partial z}}$$

Заменяя

$$\frac{\partial P_1}{\partial z} = -\rho_1 g$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial z} = -\rho_2 g$$

получим

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\frac{\partial P_2}{\partial x} - \frac{\partial P_1}{\partial x}}{g (\rho_2 - \rho_1)} \quad 4$$

Таким образом, наклон фронтальной поверхности обратно пропорционален разности плотностей в холодной и теплой воздушных массах и прямо пропорционален разности барических градиентов.

Если в уравнении 4 заменить горизонтальные составляющие градиента давления составляющими геострофического ветра, то получим

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{l}{g} \frac{\rho_2 U_2 - \rho_1 U_1}{\rho_2 - \rho_1}, \quad 5$$

где U_2 и U_1 — составляющие движения холодного и теплого воздуха вдоль фронта.

Формула 5 называется формулой Маргулеса, по имени автора, впервые получившего ее.

Изменение плотности в зоне фронта гораздо меньше изменения вектора ветра, поэтому в числителе формулы 5 можно считать $\rho_2 = \rho_1 = \bar{\rho}$, тогда, воспользовавшись уравнением состояния и условием квазистатичности ($P_2 = P_1 = \bar{P}$), получим

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{l}{g} \frac{U_2 - U_1}{T_1 - T_2} \bar{T}, \quad 6$$

где $\bar{T}^2 \approx T_2 \cdot T_1$

Если в формулу 6 подставить фактически наблюдающиеся значения скоростей движения воздуха вдоль фронта и температуры по обе стороны от него, то для $\operatorname{tg} \alpha$ получим величины, колеблющиеся между $\frac{1}{50}$ и $\frac{1}{300}$.

Если $\operatorname{tg} \alpha \approx \frac{1}{50}$, то фронт считается крутым, если $\operatorname{tg} \alpha \approx \frac{1}{300}$ — то фронт считается пологим.

Формулу 4 легко преобразовать и для случая агеострофических движений.

В самом деле, при агеострофических движениях

$$\frac{\partial P}{\partial x} = l \rho v - \rho \frac{du}{dt},$$

поэтому

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{(l \rho_2 U_2 - \rho_2 \frac{du_2}{dt}) - (l \rho_1 U_1 - \rho_1 \frac{du_1}{dt})}{g (\rho_2 - \rho_1)}$$

откуда окончательно получим

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v(\rho_2 u_2 - \rho_1 u_1) - (\rho_2 \frac{du_2}{dt} - \rho_1 \frac{du_1}{dt})}{g(\rho_2 - \rho_1)} \quad 7$$

Формулу для $\operatorname{tg} \alpha$ можно сравнить с формулой для $\operatorname{tg} \beta$, где β - угол наклона изобарической поверхности.

Если в указанные формулы подставить фактические значения скоростей, воздушных течений и температуры, то оказывается, что $\operatorname{tg} \alpha > \operatorname{tg} \beta$, т.е. $\alpha > \beta$.

Угол α исчисляется минутами, а угол β секундами, т.е. наклон изобарических поверхностей значительно меньше наклона фронтальных поверхностей (рис. 32)

Из формулы 5 видно, что угол наклона фронта зависит не только от разности температур и скоростей движения воздушных масс, но и от широты φ ($v = 2 \omega \sin \varphi$).

Чем меньше φ , тем при прочих равных условиях, меньше α . Т.е. на севере фронтальные поверхности имеют больший угол наклона, на юге - меньший. На экваторе $\varphi = 0$, т.е. вблизи экватора наклонные фронтальные поверхности невозможны, они могут быть только горизонтальными. Это значит, что вблизи экватора воздушные массы могут течь только одна над другой, а не одна возле другой, как в умеренных и северных широтах.

При выводе формулы 5 мы полагали что $T_1 > T_2$, кроме того, в нашей системе координат $\alpha > 0$, поэтому $U_2 > U_1$. Фронт, как наклонная поверхность раздела, существует только в тех случаях, когда разность скоростей, параллельных фронту, в холодной и теплой массах больше нуля, т.е.

$$U_2 - U_1 > 0 \quad 8$$

Условие 8 определяет характер движения воздушных масс вблизи фронта. Из неравенства вытекает, что вблизи фронта возможны не всякие движения, а лишь те, которые удовлетворяют соотношению 8.

Пусть, например, холодный воздух расположен на востоке, а теплый - на западе. Такое распределение воздушных масс часто наблюдается зимой над районами Западной и Восточной Сибири, ЕТС и Европой. Тогда в правой системе координат ось y будет направлена с юга на север. Рассмотрим, какие движения масс при этом возможны.

1. Пусть $U_1 > 0$ и $U_2 > 0$, т.е. и теплый и холодный воздух движутся с юга на север. Условие $(U_2 - U_1) > 0$ будет выполнено, если $U_2 > U_1$. Т.е. фронт, как наклонная поверхность, будет существовать только в том случае, когда

холодный воздух перемещается на север с большей скоростью, чем теплый. Движения, при которых $U_2 < U_1$, невозможны.

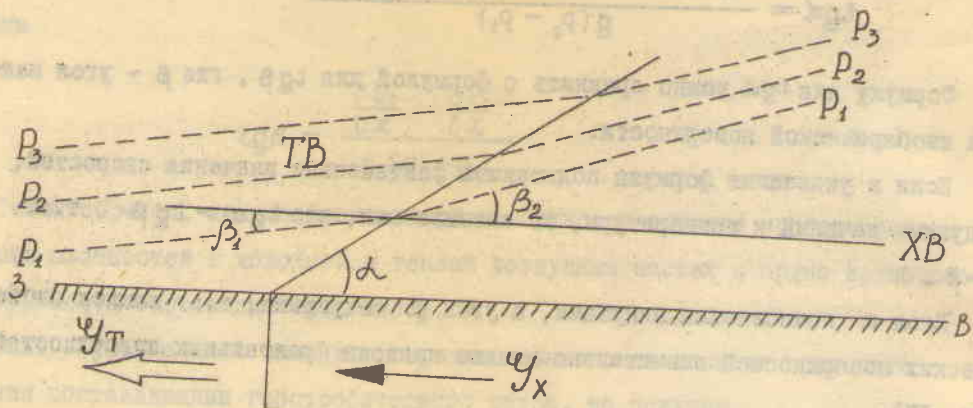


Рис. 33

Посмотрим как в этом случае будут проходить изобарические поверхности в теплом и холодном воздухе (рис.33).

При движении воздушных масс на север градиенты давления направлены на запад. В том же направлении наклонены изобарические поверхности. Но скорость холодного воздуха больше, чем теплового. Следовательно $G_X > G_T$. Поэтому угол наклона изобарических поверхностей в холодной массе больше, чем в теплой (см. пунктирные линии). Значит изобарические поверхности на фронтальной поверхности прогнуты вниз.

2. Пусть $U_2 < 0$ и $U_1 < 0$, т.е. и теплый и холодный воздух движется на вг. Условие $U_2 - U_1 > 0$ будет выполнено, если $|U_2| < |U_1|$. Фронт, как наклонная поверхность, может существовать только тогда, когда теплый воздух движется на вг быстрее, чем холодный.

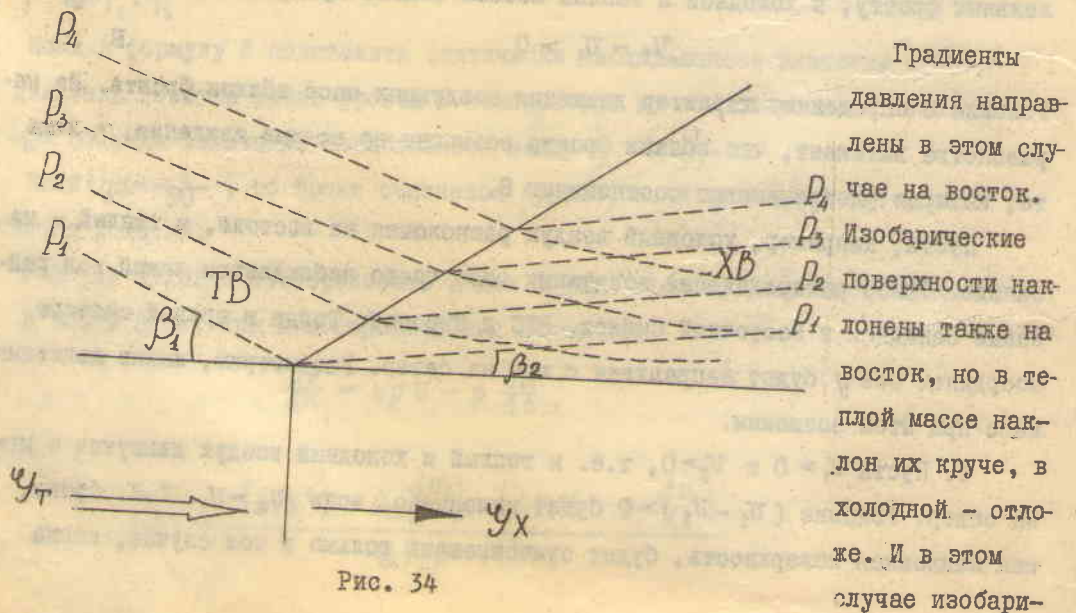


Рис. 34

Градиенты давления направлены в этом случае на восток. Изобарические поверхности наклонены также на восток, но в теплой массе наклон их круче, в холодной - отложе. И в этом случае изобари-

ческая поверхность на фронте прогнута вниз (рис.34).

3. Холодная масса движется на север $U_2 > 0$, а теплая на юг $U_1 < 0$. В этом случае условие $U_2 - U_1 > 0$ выполняется при любых значениях скоростей. Фронт будет существовать и в тех случаях, когда одна из воздушных масс находится в покое, т.е. если U_1 , или U_2 , будут равны 0.

4. Случай $U_2 < 0$, а $U_1 > 0$ невозможен.

Рассуждения, аналогичные вышеизложенным, можно провести для любого положения холодного и теплого воздуха.

§ 12 . Ф р о н т о г е н е з и ф р о н т о л и з

Процесс обострения старых или возникновение новых фронтов называется фронтогенезом. Процесс размывания фронтов называется фронтолизом.

Обострение фронтов сопровождается увеличением контрастов всех метеоэлементов и усилением всех явлений, связанных с фронтом. Определяющим из всех контрастов, является контраст средних температур. Поэтому, под фронтогенезом часто разумеют увеличение горизонтальных контрастов средней температуры нижнего слоя тропосферы. Под фронтолизом соответственно - ослабление горизонтальных контрастов средней температуры.

§ 13 . У с л о в и я , о б е с п е ч и в а ю щ и е ф р о н т о г е н е з и ф р о н т о л и з (Графический анализ условий фронтогенеза)

21
Фронты обостряются и возникают вновь в тех случаях, когда наблюдается сближение разных по свойствам воздушных масс. Поэтому для фронтогенеза необходимы такие виды движения, которые приводили бы к сближению разнородных масс. Следовательно, равномерное прямолинейное движение не может привести к фронтогенезу. Круговые движения, со скоростями, пропорциональными радиусу, также не сопровождаются фронтогенезом.

Если в прямолинейном потоке имеет место дивергенция скорости, то может быть и фронтогенез (при отрицательной дивергенции) и фронтолиз (при положительной дивергенции).

В самом деле, если скорость уменьшается в направлении потока (отрицательная дивергенция), т.е. массы, расположенные позади, имеют большие скорости, чем массы, расположенные впереди (рис.35"а"), то происходит сближение разнородных воздушных масс и будет иметь место фронтогенез. Причиной фронтогенеза в этом случае может быть и сближение разнородных масс, и раз-

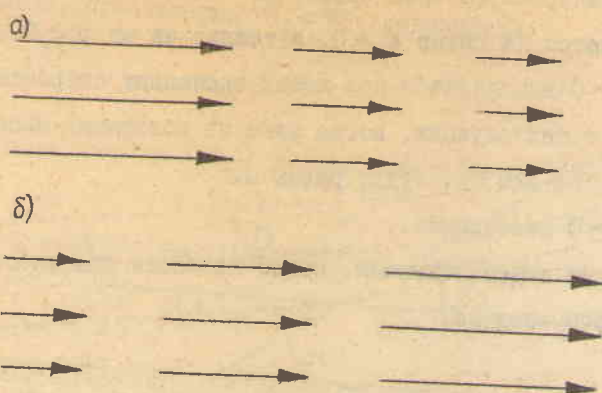


Рис. 35

ная степень трансформации одной и той же массы, при разной скорости перемещения ее.

Примером такого фронтогенеза может служить образование вторичных холодных фронтов в тылу циклонов и вторичных теплых фронтов в тылу антициклонов.

Если имеет место положительная дивергенция скорости (скорость возрастает в направлении потока), то будет наблюдаться фронтолиз (рис.35"б").

Фронтогенез (фронтолиз) может наблюдаться не только при дивергенции скорости, но и при дивергенции направления потока.

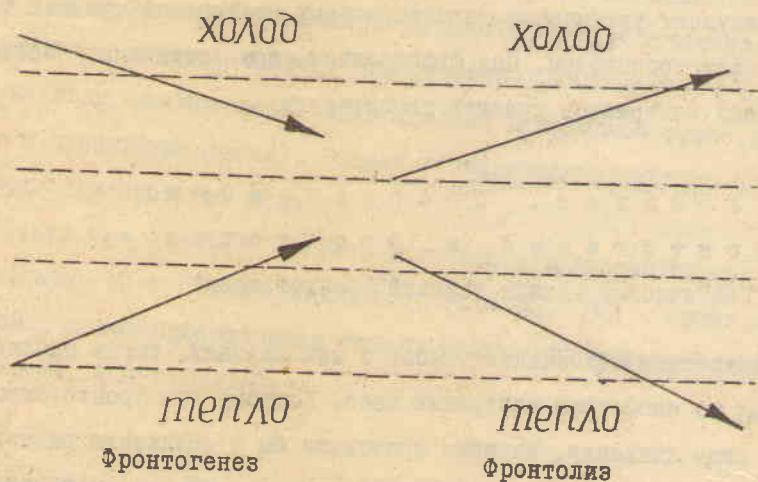


Рис. 36

При отрицательной дивергенции (конвергенции) может происходить сближение разнородных воздушных масс, что приведет к фронтогенезу (рис.36).

При положительной дивергенции воздушные массы растекаются, что может привести к фронтолизу.

Примером фронтогенеза при конвергенции потока может быть фронтогенез в ложбинах барических полей; примером фронтолиза при дивергенции - размывание фронта вдоль осей гребней.

§ 14. Фронтогенез и фронтолиз в
деформационных полях
(графический анализ)

Как мы уже говорили, деформационным полем называется поле, образованное двумя накрест-лежащими циклонами и двумя накрест-лежащими антициклонами.

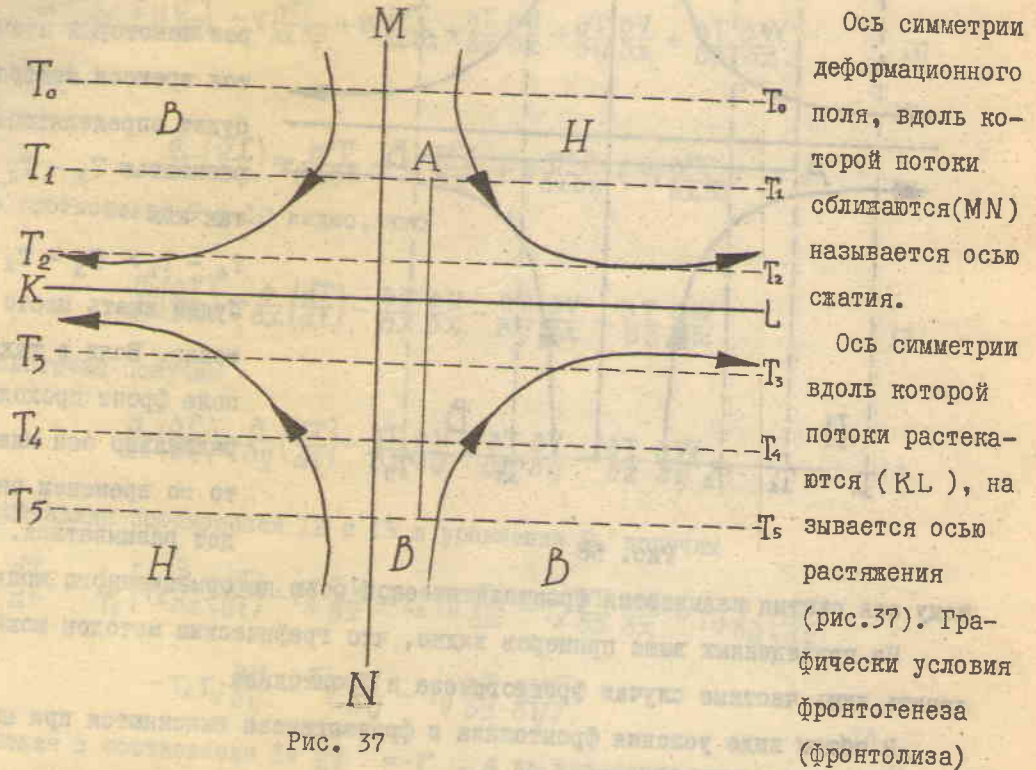


Рис. 37

можно определить по положению изотермы в отношении осей сжатия и растяжения.

Если изотермы проходят параллельно оси растяжения, то при сближении воздушных масс вдоль оси сжатия, контрасты температур со временем будут увеличиваться, т.е. будет иметь место фронтогенез (рис.37). В самом деле, если в начальный момент контраст температуры на линии АВ определяется разностью $T_4 - T_1$, то через некоторый промежуток времени, при существующих потоках, контраст будет определяться разностью $T_5 - T_0$, т.к. $T_4 - T_1 < T_5 - T_0$, то будет иметь место фронтогенез.

При рассмотренном распределении температуры в деформационном поле происходит увеличение контрастов температур вдоль оси растяжения. Поэтому ось растяжения является фронтогенетической осью деформационного поля, т.е. вдоль оси растяжения происходит образование новых или обострение старых фронтов.

Если изотермы параллельны оси сжатия, то при растекании воздушных масс вдоль оси растяжения будет иметь место уменьшение горизонтальных градиентов

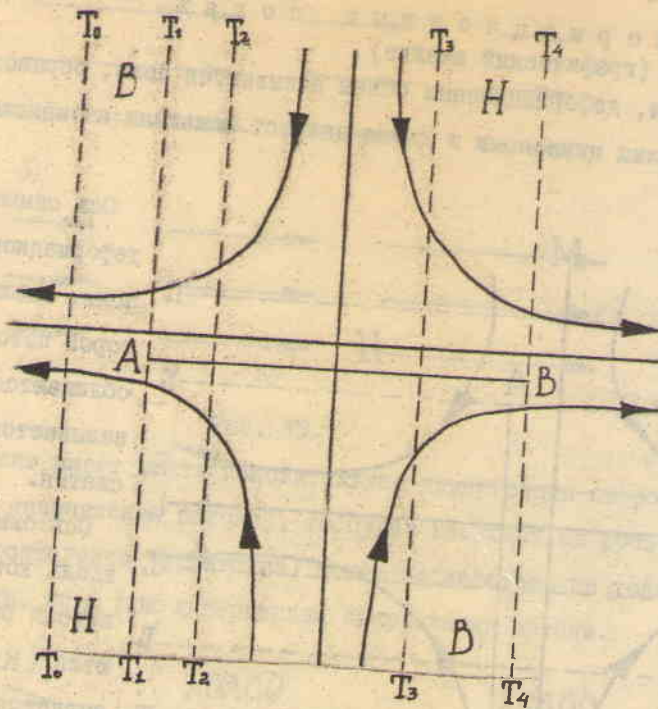


Рис. 38

тому ось сжатия называется фронтолитической осью деформационного поля.

Из приведенных выше примеров видно, что графическим методом можно вывести лишь частные случаи фронтотенеза и фронтотлиза.

В общем виде условия фронтотлиза и фронтотенеза выясняются при аналитическом исследовании этого вопроса.

§ 15. Теоретический анализ условий фронтотенеза и фронтотлиза

Фронтотенез характеризуется изменением во времени горизонтального градиента температуры в индивидуальной частице, т.е. $\frac{dT_y}{dt}$, где T_y — горизонтальный градиент температуры. Очевидно, что при $\frac{dT_y}{dt} > 0$ будет иметь место фронтотенез, при $\frac{dT_y}{dt} < 0$ — фронтотлиз.

Выясним, от каких причин зависит фронтотенез и фронтотлиз.

Как известно $T_y = \sqrt{T_x^2 + T_y^2}$, где $T_x = \frac{\partial T}{\partial x}$, $T_y = \frac{\partial T}{\partial y}$,

тогда

$$\frac{dT_y}{dt} = \frac{1}{2} (T_x^2 + T_y^2)^{-\frac{1}{2}} (2T_x \frac{dT_x}{dt} + 2T_y \frac{dT_y}{dt}) =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{T_x^2 + T_y^2}} (T_x \frac{dT_x}{dt} + T_y \frac{dT_y}{dt}) = \frac{1}{T_y} (T_x \frac{dT_x}{dt} + T_y \frac{dT_y}{dt})$$

температур, т.е. фронтотлиза (рис.38). В самом деле, в начальный момент контраст температуры по линии АВ равнялся $T_4 - T_1$, а через некоторый промежуток времени контраст будет определяться разностью $T_3 - T_2$, так как $T_4 - T_1 > T_3 - T_2$, то будет иметь место фронтотлиза. Если в таком поле фронт проходит параллельно оси сжатия, то со временем он будет размываться. Поэ-

Распишем производные

$$\frac{d}{dt}T_x = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) \text{ и } \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{dT}{dt}\right)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{dT}{dt}\right) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}\right) =$$

$$= \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial t} + u \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial y} + w \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial z} + \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x}, \quad 10$$

а

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) = \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial t} + u \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial y} + w \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial z} \quad 11$$

Из соотношений 9 и 10 видно, что

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{dT}{dt}\right) - \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} \quad 12$$

Аналогично получим

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right) = \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{dT}{dt}\right) - \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} \quad 13$$

Подставляя соотношения 12 и 13 в уравнение 9, получим

$$\begin{aligned} \frac{dT_y}{dt} = \frac{1}{T_y} \left[T_x \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{dT}{dt} \right) - T_x^2 \frac{\partial u}{\partial x} - T_x T_y \frac{\partial v}{\partial x} - T_x \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} + T_y \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{dT}{dt} \right) - \right. \\ \left. - T_x T_y \frac{\partial u}{\partial y} - T_y^2 \frac{\partial v}{\partial y} - T_y \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad 14$$

Заменяя в соотношении 14 $\frac{\partial T}{\partial z} = -r$, а из уравнения притока тепла $\frac{dT}{dt} = -r_a W$ будем иметь

$$\frac{dT_y}{dt} = \frac{1}{T_y} \left[-r_a T_x \frac{\partial W}{\partial x} - T_x^2 \frac{\partial u}{\partial x} - T_x T_y \frac{\partial v}{\partial x} + r T_x \frac{\partial W}{\partial x} - r_a T_y \frac{\partial W}{\partial y} - T_x T_y \frac{\partial u}{\partial y} - T_y^2 \frac{\partial v}{\partial y} + T_y r \frac{\partial W}{\partial y} \right]$$

или группируя члены

$$\begin{aligned} \frac{dT_y}{dt} = -\frac{1}{T_y} \left[\left(T_x^2 \frac{\partial u}{\partial x} + T_y^2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) + T_x T_y \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + r_a \left(T_x \frac{\partial W}{\partial x} + T_y \frac{\partial W}{\partial y} \right) - r \left(T_x \frac{\partial W}{\partial x} + T_y \frac{\partial W}{\partial y} \right) \right] = \\ = -\frac{1}{T_y} \left[T_x^2 \frac{\partial u}{\partial x} + T_y^2 \frac{\partial v}{\partial y} + T_x T_y \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + (r_a - r) \left(T_x \frac{\partial W}{\partial x} + T_y \frac{\partial W}{\partial y} \right) \right] \quad 15 \end{aligned}$$

Из формулы 15 видно, что фронтогенез определяется изменением от пункта к пункту горизонтальных и вертикальных движений воздуха.

Зависимость фронтогенеза от изменения горизонтальных составляющих движений выражается формулой

$$\left(\frac{dT_y}{dt} \right)_1 = -\frac{1}{T_y} \left[\left(T_x^2 \frac{\partial u}{\partial x} + T_y^2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) + T_x T_y \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \quad 16$$

Из формулы 16 следует, что фронтогенез имеет место в том случае, когда $T_y \neq 0$, и когда скорость воздушного потока меняется от точки к точке.

Если $T_y = 0$ или если $u = const.$ и $V = const.$, то $\frac{dT_y}{dt} = 0$, т.е. фронтогенеза (фронтотиза) не будет.

Зависимость фронтогенеза от вертикальных движений выражается формулой

$$\left(\frac{dT_y}{dt}\right)_2 = -\frac{1}{T_y} (T_a - r)(T_x \frac{\partial W}{\partial x} + T_y \frac{\partial W}{\partial y}) \quad 17$$

Фронтогенез (фронтотиз) будет иметь место в тех случаях, когда вертикальные скорости меняются от пункта к пункту.

§ 16. Фронтогенез и фронтотиз при горизонтальных движениях воздушных масс

Возьмем формулу 16 и заменим скорости их геострофическими значениями

$$u = -\frac{1}{f} \frac{\partial H}{\partial y}, \quad V = \frac{1}{f} \frac{\partial H}{\partial x},$$

тогда

$$\left(\frac{dT_y}{dt}\right)_1 = -\frac{1}{f} \left[-T_x^2 \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial y} + T_y^2 \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial y} + T_x T_y \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) \right],$$

или обозначая

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = H_{xx}, \quad \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial y} = H_{xy}, \quad \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = H_{yy}$$

$$\left(\frac{dT_y}{dt}\right)_1 = \frac{1}{f T_y} \left[(T_x^2 - T_y^2) H_{xy} + T_x T_y (H_{yy} - H_{xx}) \right] \quad 18$$

В натуральных координатах (ось x направлена по потоку, ось y - по нормали к изогипсе), соотношение 18 запишется в форме

$$\left(\frac{dT_y}{dt}\right)_1 = \frac{T_y}{f} \left[H_{ns} \cos 2\xi + \frac{1}{2} (H_{nK} - H_{nn}) \sin 2\xi \right], \quad 19$$

где ξ угол между изогипсой и изотермой, K - кривизна изогипс.

Из формул 18 и 19 видно, что фронтогенез (фронтотиз) зависит от структуры термического и барического полей.

В частности, когда изогипсы прямолинейны ($K = 0$), параллельны ($H_{ns} = 0$) и равноотстоящи ($H_{nn} = 0$), то фронтогенеза (фронтотиза) не будет.

§ 17. Фронтогенез и фронтолиз в замкнутых барических образованиях

Для анализа условий фронтогенеза (фронтолиза) в циклонах и антициклонах, предположим, что изогипсы, оформляющие их имеют эллиптическую форму.

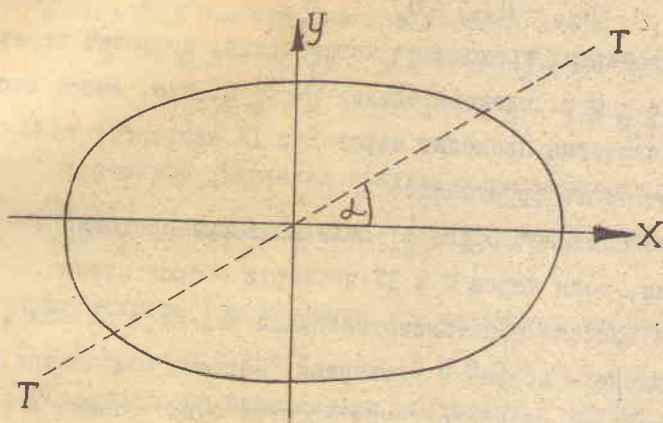


Рис. 39

Мы имеем основание делать такое предположение потому, что большинство циклонов и антициклонов за счет развития ложбин и гребней имеют вытянутую форму изобар, которые приближенно и можно при-

нять за эллипсы.

Возьмем за начало координат центр симметрии барических образований, ось X направим по большой оси эллипса, ось Y — по малой. Тогда в центре барических образований $H_{xy} = 0$, и формула фронтогенеза примет вид

$$\left(\frac{dT_v}{dt}\right)_1 = \frac{1}{lT_v} (H_{yy} - H_{xx}) T_x T_y \quad 20$$

Возьмем изотерму, проходящую через начало координат, и угол между ней и осью X обозначим через α .

Формулу 20 преобразуем, заменив $T_x = T_v \sin \alpha$, $T_y = T_v \cos \alpha$. Тогда

$$\left(\frac{dT_v}{dt}\right)_1 = \frac{1}{2l} T_v \sin 2\alpha (H_{yy} - H_{xx}) \quad 21$$

Для циклонических областей: $H_{yy} > 0$ и $H_{xx} > 0$

Величина вторых производных H_{xx} и H_{yy} характеризует кривизну изобарических поверхностей: чем больше кривизна, тем больше величина вторых производных.

При нашем выборе системы координат кривизна изобарических поверхностей в направлении оси Y больше, чем в направлении оси X . Следовательно, для циклона

$$H_{yy} - H_{xx} > 0$$

Для антициклона

$$H_{yy} < 0 \quad \text{и} \quad H_{xx} < 0,$$

т.е. изобарические поверхности выпуклые.

Поскольку степень выпуклости в направлении оси y больше, чем в направлении x , то

$$|H_{yy}| > |H_{xx}|$$

Следовательно, для антициклона

$$(H_{yy} - H_{xx}) < 0$$

Если в циклоне изотерма, проходящая через центр, проходит через I и III четверти, то $\sin 2\alpha > 0$ и, следовательно $\frac{dT_y}{dt} > 0$, т.е. имеет место фронтогенез. Если же изотерма проходит через II и IV четверти, то $\sin 2\alpha < 0$ и $\frac{dT_y}{dt} < 0$, т.е. имеет место фронтолиз.

В антициклоне соотношение обратное: если изотерма проходит через I и III четверти - фронтолиз, если через II и IV четверти - фронтогенез.

Таким образом, в циклоне фронтогенетическими являются первая и третья четверти, а в антициклоне - вторая и четвертая. Поэтому при холоде на севере наиболее вероятной схемой прохождения фронтов будет схема, изображенная на рисунке 40.

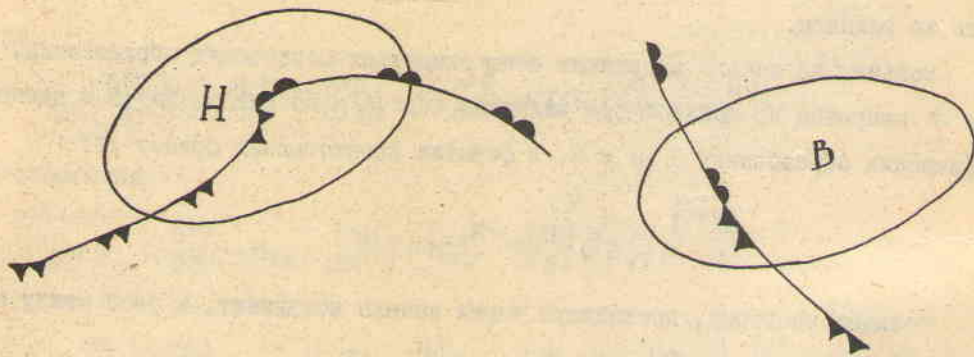


Рис. 40

Из формулы 21 следует, что интенсивность фронтогенеза прямо пропорциональна величине горизонтального градиента температуры T_y , зависит от величины угла α , и от степени вытянутости изогипс. Чем ближе α к 45° , тем интенсивнее фронтогенез. Когда изогипсы имеют форму окружности, тогда фронтогенеза не будет при любой величине контраста и при любом значении угла α . Чем больше вытянуты изогипсы, тем более интенсивен фронтогенез при тех же контрастах температуры и величинах углов. Все выведенные положения находят хорошее подтверждение на эмпирическом материале.

Со временем ^{за счет} движения с разными скоростями происходит поворот изотерм: в циклоне - против часовой стрелки, в антициклоне - по часовой. Поэтому, в замкнутых барических образованиях во время фронтогенеза может смениться

фронтонизом, фронтониз - фронтонезом.

В самом деле, если в циклоне в данный момент изотермы проходят через I и III четверть, то через некоторое время за счет движения воздуха против часовой стрелки они будут проходить через II и IV четверти и фронтонез сменится фронтонизом.

§ 18. Фронтонез (фронтониз) при различном взаимном положении изогипс и изотерм

Возьмем формулу изменения градиента температуры со временем в виде

$$\left(\frac{dT_y}{dt}\right)_1 = \frac{1}{t} T_y \left[H_{ns} \cos 2\xi + \frac{1}{2} (H_n K - H_{nn}) \sin 2\xi \right]$$

и рассмотрим условия фронтонеза при различных значениях ξ .

1. Фронтонез и фронтониз при $\xi = 0$.

В этом случае изогипсы параллельны изотермам и $\sin 2\xi = 0$, $\cos 2\xi = 1$, следовательно

$$\left(\frac{dT_y}{dt}\right)_1 = \frac{1}{t} T_y H_{ns}$$

22

В зоне нулевой адвекции фронтонез происходит только за счет сходимости и расходимости изогипс (H_{ns}), и не зависит от кривизны K и сгущения H_{nn} .

В зоне сходимости $H_{ns} > 0$ и $\left(\frac{dT_y}{dt}\right) > 0$, следовательно имеет место фронтонез. В самом деле, из рисунка 4I видно, что за счет сближения воздушных масс при сходимости происходит увеличение контраста температур (рис. 4I "а").

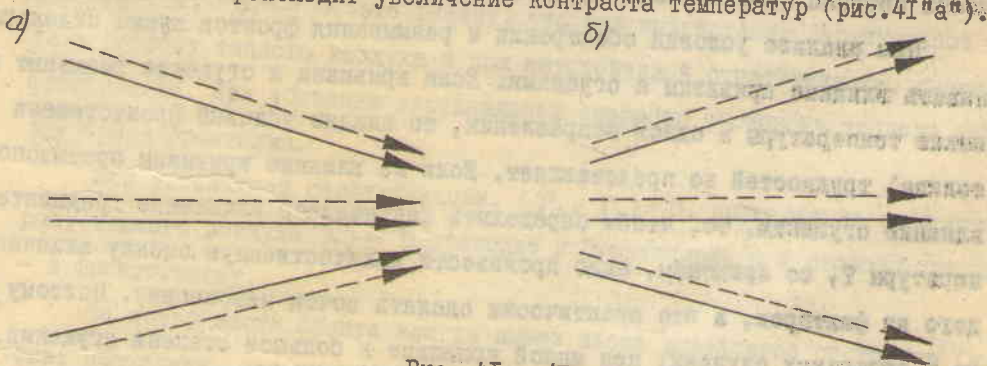


Рис. 4I $\frac{dT_y}{dt} < 0$

При расходимости изогипс $H_{ns} < 0$ (рис. 4I "б"), т.е. имеет место фронтониз.

Интенсивность фронтонеза (фронтониза) зависит от величины горизонтального контраста температур и от степени сходимости и расходимости.

2. При $\xi = 90^\circ$

$$\left(\frac{dT_y}{dt}\right)_1 = -\frac{1}{t} T_y H_{ns}$$

В этом случае при $H_{ns} > 0$, $\frac{dT_v}{dt} < 0$, а при $H_{ns} < 0$, $\frac{dT_v}{dt} > 0$.

При $H_{ns} > 0$ частицы воздуха, расположенные впереди, имеют большую скорость, чем частицы, расположенные позади $V_1 > V_2$. Поэтому со временем происходит разрежение изотерм, т.е. фронтолиз (рис. 42)

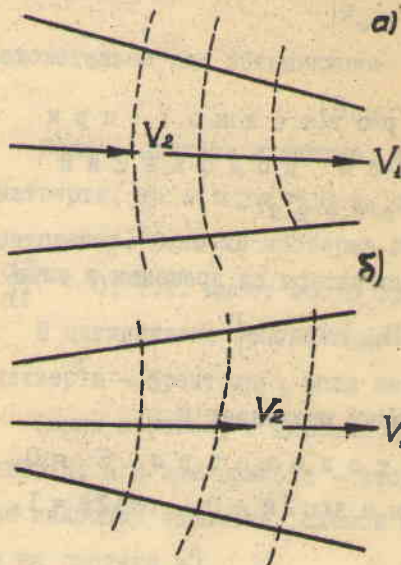


рис. 42

При $H_{ns} < 0$ частицы воздуха, расположенные впереди имеют меньшую скорость, чем частицы, расположенные позади $V_1 < V_2$, поэтому со временем происходит сближение изотерм, т.е. фронтогенез.

В двух рассмотренных случаях фронтогенез (фронтолиз) зависит только от величины контраста T_v и степени сходимости изогипс.

3. При $\epsilon = +45^\circ$, т.е. при адвекции холода

$$\left(\frac{dT_v}{dt}\right)_2 = \frac{1}{2l} T_v (H_n K - H_{nn}), \quad 23$$

а при $\epsilon = -45^\circ$, т.е. при адвекции тепла

$$\left(\frac{dT_v}{dt}\right)_2 = -\frac{1}{2l} T_v (H_n K - H_{nn}). \quad 24$$

Из формул 23 и 24 следует, что при ϵ близких к 45° , фронтогенез (фронтолиз) определяется кривизной и сгущением изогипс. Сходимость и расходимость изогипс фронтогенеза (фронтолиза) не определяют.

При анализе условий обострения и размывания фронтов нужно отдельно оценивать влияние кривизны и сгущения. Если кривизна и сгущение вызывают изменение температуры в одном направлении, то анализ условий фронтогенеза (фронтолиза) трудностей не представляет. Если же влияние кривизны противоположно влиянию сгущения, то, чтобы определить фактическое изменение градиента температуры T_v со временем, надо произвести количественную оценку влияния каждого из факторов, а это практически сделать почти невозможно. Поэтому только в отдельных случаях, при малой кривизне и большой степени сгущения, или при малой степени сгущения и большой кривизне, можно положительно решить вопрос об изменении T_v со временем, т.е. о фронтогенезе или фронтолизе.

Очевидно, что адвекция холода при циклонической кривизне и адвекция тепла при антициклонической — сопровождается фронтогенезом; адвекция холода при антициклонической кривизне и адвекция тепла при циклонической — фронтолизом.

Адвекция холода при сгущении изогипс в сторону низкого давления и адвекция тепла при сгущении в сторону высокого давления сопровождаются фронтогенезом; адвекция холода при сгущении изогипс в сторону высокого давления и адвекция тепла при сгущении в сторону низкого давления - фронтолизом.

§ 19. Фронтотенез и фронтотиз при вертикальных движениях воздуха

Из предыдущего нам известно, что фронтотенез (фронтотиз) при вертикальных движениях определяется формулой

$$\left(\frac{dT_v}{dt}\right)_2 = -\frac{1}{T_v} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial W}{\partial y} \right) (\gamma_a - \gamma). \quad 25$$

Для упрощения анализа направим ось y вдоль изотермы, а ось x - вдоль нормали к изотерме. Тогда вдоль оси y температура меняться не будет и $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$, а т.к. x совпадает с y , то $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = T_y$ поэтому

$$\left(\frac{dT_v}{dt}\right)_2 = -\frac{\partial W}{\partial y} (\gamma_a - \gamma). \quad 26$$

Из формулы 26 вытекает, что фронтотенез (фронтотиз) при вертикальных движениях зависит от направления и скорости изменения вертикальных движений $\frac{\partial W}{\partial y}$ в горизонтальной плоскости и от стратификации воздуха (нормаль y всегда направлена в сторону высоких температур).

Если атмосфера стратифицирована неустойчиво, т.е. $(\gamma_a - \gamma) < 0$, то при $\frac{\partial W}{\partial y} > 0$, $\frac{dT_v}{dt} > 0$, это значит, что при возрастании вертикальной скорости в сторону теплого воздуха и при неустойчивой стратификации, имеет место фронтотенез. При убывании вертикальной скорости в сторону теплого воздуха $\frac{\partial W}{\partial y} < 0$ - фронтотиз.

При устойчивой стратификации, $(\gamma_a - \gamma) > 0$, возрастание скорости в сторону теплого воздуха $\frac{\partial W}{\partial y} > 0$ приводит к фронтотизу, а в сторону холодного - к фронтотенезу.

На поверхности фронта всегда имеет место устойчивое состояние (инверсия, изотермия, или уменьшенные величины γ), т.е. $\gamma_a - \gamma > 0$. Поэтому анафронты, у которых вертикальная скорость возрастает в сторону теплого воздуха (рис.43) в температуре размываются. Катафронты, у которых в сторону теплого воздуха вертикальная скорость уменьшается (рис.44), в поле температуры обостряются.

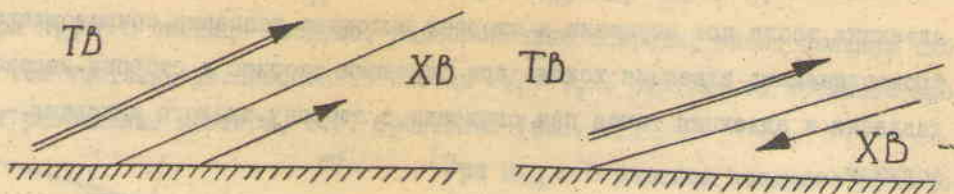


Рис. 43

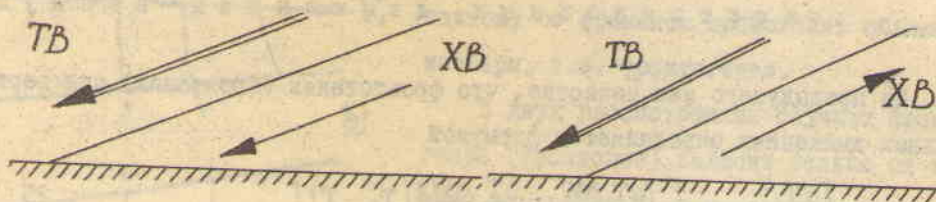


Рис. 44

Фронты, размывающиеся в термическом поле могут быть хорошо выражены в других элементах, например, в облачности и осадках.

Наоборот, фронты, обостряющиеся в термическом поле могут быть совершенно не выраженными в облачности и осадках.

Из изложенного можно сделать вывод, что если фронт проходит по ложбине, где сильно развиты восходящие движения, а вертикальная скорость в теплом воздухе больше, чем в холодном, то контраст температуры будет небольшим. В то же время фронт будет хорошо выражен в облачности, осадках, ветре, барическом и изаллобарическом полях.

Если фронт пересекает гребень, в котором развиты нисходящие токи, то может оказаться, что вертикальная скорость нисходящих движений ($-W$) в теплом воздухе будет больше, чем в холодном, тогда контрасты температуры будут большими, но фронт не будет выражен в других элементах. С фронтом будет связана ясная погода со слабыми ветрами, т.е. в явлениях погоды фронт будет размываться.

При анализе условий фронтогенеза необходимо помнить, что влияние вертикальных движений соизмеримо с влиянием горизонтальных перемещений. Поэтому строго обязательным должен быть анализ карт вертикальных скоростей. Карты вертикальных скоростей, рассчитанных по методу Лебедевой, передаются местным службам по факсимиле из Главного Гидрометцентра СССР.

§ 20. Влияние подстилающей поверхности на фронтогенез и фронтолиз

Горизонтальные и вертикальные движения не могут полностью определить процесс фронтогенеза. Процессы размывания и обострения фронтов зависят от целого ряда других причин. Перечислим некоторые из них.

I. Большое влияние на процессы фронтогенеза и фронтолиза в приземном слое может оказать характер подстилающей поверхности.

Под влиянием подстилающей поверхности возникают силы трения, которые приводят к конвергенции потоков в областях низкого давления и к дивергенции в областях высокого давления. Поэтому фронты, проходящие по ложбинам, под влиянием конвергенции трения в приземном слое обостряются, а фронты, проходящие через гребни или антициклоны — размываются.

На высотах влияние трения отсутствует, поэтому фронты могут быть хорошо выражены и при прохождении через антициклон.

Обострение и размывание фронтов может быть обусловлено влиянием топографии. На наветренной стороне возвышенностей и гор фронты обостряются (за счет усиления восходящих движений), на подветренной стороне — размываются (за счет усиления нисходящих движений).

Испарение с поверхности земли увеличивает влагосодержание, что может привести к усилению облачности и осадков, связанных с фронтом. Поэтому фронты, перемещавшиеся по поверхности морей и океанов, несут большее количество осадков.

2. Большая роль в процессах фронтогенеза принадлежит трансформации воздушных масс. В результате трансформации температура воздуха может меняться на $3-5^{\circ}$ за сутки, и в тех же пределах может меняться контраст температур между воздушными массами, разделяемыми фронтом.

Если фронт движется по холодной поверхности, то теплый воздух выхолаживается, а холодный мало меняет свою температуру, поэтому контраст температуры ослабевает. Сильному выхолаживанию подвергается приземный слой воздуха, за счет чего стратификация воздуха становится устойчивой, и процессы перемешивания ослабевают. Это значит, что с высотой процесс выхолаживания ослабевает. При движении по холодной подстилающей поверхности фронты быстрее размываются внизу и медленнее на высотах. Поэтому зимой фронты, хорошо выраженные в облачности и осадках, могут быть плохо выражены в температуре.

При движении фронта по теплой подстилающей поверхности холодный воздух прогревается, а температура теплого воздуха почти не меняется. Поэтому контраст температуры также уменьшается. Прогрев холодной воздушной массы (за

счет конвекции и турбулентности) передается вышележащим слоям воздуха. Поэтому при движении по теплой подстилающей поверхности ослабление контрастов (если не учитывать конденсации) идет почти одинаково как у земли, так и на высотах.

3. Некоторая роль в процессах фронтогенеза (фронтализа) принадлежит радиационному фактору.

Если обе воздушные массы, разделяемые фронтом, движутся по однородной и однотипной поверхности при одинаковых погодных условиях, то влияние радиационного фактора у поверхности земли в обеих массах будет одинаковым, но радиационный и турбулентный переносы тепла зависят от распределения температуры по высоте. Радиационный перенос тепла всегда направлен от более высоких температур к более низким и стремится выравнять температуры. Интенсивность турбулентного переноса зависит от вертикальных и горизонтальных градиентов температуры.

Таким образом, и радиационный, и турбулентный фактор способствует выравниванию температуры в горизонтальной плоскости во фронтальной зоне, т.е. приводят к размыванию фронта.

При резких различиях в характере подстилающей поверхности, приток тепла от подстилающей поверхности в теплых и холодных массах может оказаться существенно различным. Фронты могут обостряться и размываться. Если холодный фронт переходит с моря на сушу летом днем, то он обостряется потому, что суша теплее моря и теплый воздух дополнительно прогревается. При таком же перемещении ночью фронт размывается потому, что ночью море теплее суши и прогревается холодный воздух, а теплый выхолаживается. Так как фронты движутся быстро, то влияние неоднородных подстилающих поверхностей, как правило, кратковременное.

Из предыдущего видно, что процессы обострения и размывания фронтов зависят от многих факторов, действие которых может быть и одинаковым и противоположным. Поэтому учесть совокупное действие всех факторов очень трудно.

В практической работе о процессах фронтогенеза и фронтализа судят по изменению величины горизонтальных градиентов температуры на изобарических поверхностях и на карте относительной топографии.

По изменению градиентов на картах от 500 до 1000 можно судить о фронтогенезе (фронтализе) во всей толще нижней тропосферы. Но интенсивность фронтогенеза может быть различной на разных уровнях. Например, фронты, обостряющиеся у земли, на высотах могут размываться и, наоборот, обостряющиеся на высотах размываться у земли. Поэтому, наряду с анализом изменения от срока к сроку

градиента средней температуры, необходимо проводить подсчеты изменения градиентов на разных уровнях. Для этого нужно рассматривать горизонтальные градиенты фактической температуры на каждой из карт барической топографии.

§ 21. Д в и ж е н и е ф р о н т о в

Поверхности раздела между воздушными массами в подавляющем большинстве случаев не остаются неподвижными. Движением их определяется изменение погоды с течением времени. Поэтому одной из основных задач, стоящих перед инженером-синоптиком является расчет скорости и направления смещения фронтов.

Направление и скорость смещения фронтов определяется несколькими методами, каждый из которых не является совершенным, но совокупное применение всех этих методов может обеспечить 90-95 процентную оправдываемость прогнозов.

1. М е т о д ф о р м а л ь н о й э к с т р а п о л я ц и и заключается в том, что скорость и направление смещения фронта в предыдущий период экстраполируется на последующий. При простой формальной экстраполяции достаточно иметь текущую и одну предыдущую карту. Очевидно, что точность этого метода прямо пропорциональна сроку, на который дается прогноз.

При формальной экстраполяции можно учитывать ускорение, т.е. изменение скорости во времени. Для этого нужно иметь по крайней мере две предшествующие карты.

2. М е т о д в е д у щ е г о п о т о к а . Все фронты смещаются в направлении ведущего потока со скоростью, примерно равной 0.8 скорости ведущего потока. Ведущим может быть поток и на уровне 700 и на уровне 500 мб. (методика определения уровня ведущего потока будет рассмотрена в главе - циклоны).

3. Часто скорость смещения фронта определяют по нормальной к фронту составляющей скорости ветра в холодном воздухе. Фронт есть поверхность раздела воздушных масс, поэтому естественно, что движение фронта определяется движением воздушных масс. Касательная составляющая направлена вдоль фронта и не может определять его движение. Нормальная к фронту составляющая движения в теплом воздухе не может характеризовать движение фронта потому, что теплый воздух может скользить вверх по поверхности фронта.

4. В последние годы для определения скорости и направления смещения фронтов все чаще начинают применяться расчетные методы. В настоящее время точность расчетных методов не велика, но имеются широкие возможности улучшения этих методов.

Скорость смещения фронта может быть определена как скорость смещения оси ложбины, с которой связан фронт, или как скорость смещения поверхности раздела разнородных воздушных масс. Ниже излагаются оба указанных метода¹⁾,

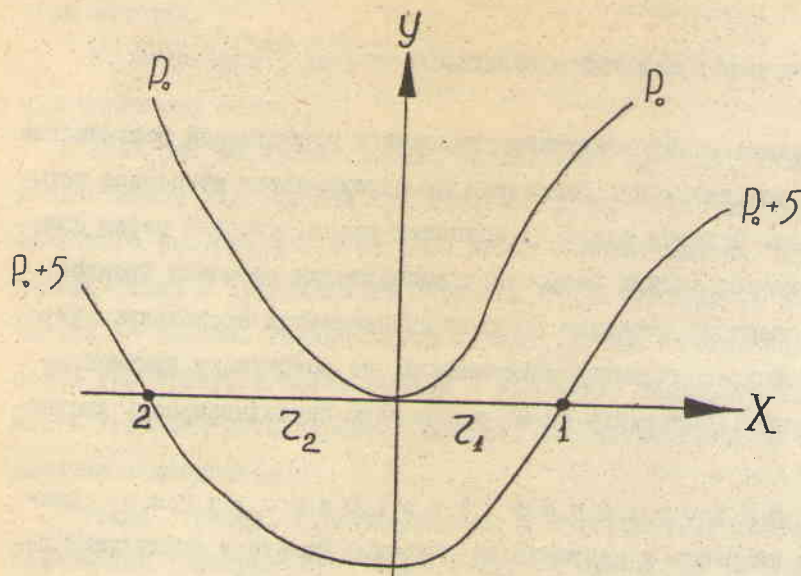


Рис. 45

а) Если направить ось y по оси ложбины (рис.45), а ось x по нормали к ней, то в каждой точке оси ложбины

$$\frac{\partial P}{\partial x} = 0,$$

где $P = P(x, y, t)$
Поэтому

$$\frac{\partial}{\partial x} P[x(t), y, t] = 0. \quad 27$$

Продифференцируем соотношение 27 по времени

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \frac{dx}{dt} = 0, \quad 28$$

но $\frac{dx}{dt} = u_{\text{фр}}$ - скорость смещения оси ложбины, т.е. фронта, поэтому

$$u_{\text{фр}} = - \frac{\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t}}{\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}} \quad 29$$

Из формулы 29 следует, что $u_{\text{фр}} > 0$ только в случае, когда $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right) < 0$, т.е. ось ложбины перемещается в ту сторону, где давление уменьшается.

Заменяя $\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}$ и $\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t}$ конечными разностями можно получить рабочую формулу для расчета скорости движения ложбины

$$\left| \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right| = \frac{|P_1 + P_2 - 2P_0|}{z^2} = \frac{|P_0 + 5 + P_0 + 5 - 2P_0|}{z^2} = \frac{10}{z^2}, \quad 30$$

где z - расстояние между изобарами вдоль оси x .

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right) = \frac{1}{2z} (P_{t_1} - P_{t_2}) \quad 31$$

¹⁾ оба метода излагаются нами так, как они изложены в работе Л.С.Гандина "Введение в расчетные методы прогноза погоды".

Подставляя 30 и 31 в 29 и обозначая изменения давления в точке 1 через P_{t_1} , а в точке 2 через P_{t_2} , получим для скорости смещения ложбины за 12 часов

$$u_{\text{ср}} = 4 \frac{\left| \frac{\partial^2 p}{\partial x \partial t} \right|}{\left| \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right|} = \frac{1}{5z} (P_{t_1} - P_{t_2}) \text{ км/час.} \quad 32$$

Коэффициент 4 в правой части соотношения 32 появляется за счет того, что P_{t_1} и P_{t_2} - есть изменения давления за 3 часа, а скорость $u_{\text{ср}}$ рассчитывается на 12 часов.

Формула 32 справедлива лишь для симметричной ложбины, для ассиметричных ложбин $u_{\text{ср}}$ рассчитывается по формуле

$$u_{\text{ср}} = \frac{2}{5} \frac{z_1 z_2}{z_1 + z_2} (P_{t_1} - P_{t_2}) \text{ км/12 час,}$$

где z_1 и z_2 - расстояние между изобарами по направлению оси x .

б) Поскольку фронт является поверхностью раздела между воздушными массами, то $P_1 = P_2$, где P_1 и P_2 - соответственно давление в холодной и теплой массе на поверхности фронта.

Если направить ось y вдоль фронта, тогда

$$P_1 [x(t), y, t] = P_2 [x(t), y, t] \quad 33$$

Дифференцируя 33 по t получим

$$\frac{\partial P_1}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial P_1}{\partial t} = \frac{\partial P_2}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial P_2}{\partial t}, \quad 34$$

откуда

$$\frac{dx}{dt} = - \frac{\frac{\partial P_1}{\partial t} - \frac{\partial P_2}{\partial t}}{\frac{\partial P_1}{\partial x} - \frac{\partial P_2}{\partial x}} \quad 35$$

В формуле 35 $\frac{\partial P_1}{\partial t}$ и $\frac{\partial P_2}{\partial t}$ значение тенденций на выбранном расстоянии от фронта, $\frac{\partial P_1}{\partial x}$ и $\frac{\partial P_2}{\partial x}$ - градиенты давления в направлении нормали к фронту по ту и другую сторону от него.

Если на картах масштаба 1:10⁷ расстояние по оси x взять равным 2.5 см (рис. 46), то рабочая формула для расчета $V_{\text{ср}}$ будет иметь вид

$$V_{\text{ср}} = 5 \frac{\delta P_A - \delta P_B}{P_A - P_B} \quad \begin{array}{l} \text{см. карты} \\ \text{12 ч. } \end{array} \quad 36$$

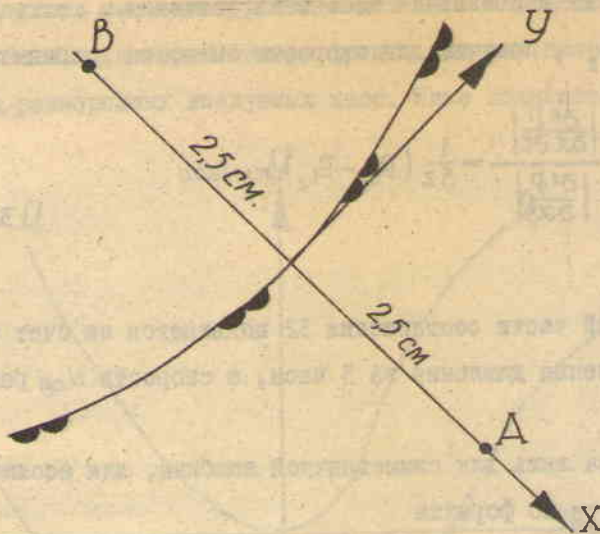


Рис. 46

где δP_A и δP_B — значение тенденций в точках А и В, а P_A и P_B — значение давления в тех же точках.

Из всех приведенных выше рассуждений видно, что качественно о направлении смещения фронта можно судить по знаку изотенденций: все фронты смещаются в сторону падения давления.

§ 22 . Влияние орографии на движение и пространственную структуру фронтов

Вопрос о влиянии подстилающей поверхности на пространственную структуру фронтов является очень сложным и многое в этом отношении еще не решено. Некоторые указания на влияние больших форм рельефа были в работах представителей бергенской школы. Эмпирические исследования с помощью синоптических карт проводились целым рядом других ученых. Основные положения о взаимодействии фронтов с подстилающей поверхностью получены именно эмпирическими методами.

Теоретическая разработка вопроса о влиянии меридионально вытянутых хребтов на движение циклонов и фронтов впервые была проведена И.А.Кибелем.

Подстилающая поверхность оказывает сильное влияние на движение и структуру фронтов. Даже небольшие изменения орографии или характера подстилающей поверхности ведут к значительным изменениям характеристик фронта. Например, летом при переходе с моря на сушу увеличивается трение, это ведет к усилению конвергенции потоков, и фронты, переместившись с моря на сушу, иногда обостряются. Вертикальные потоки становятся более интенсивными, в связи с чем увеличивается мощность облачности и усиливаются осадки. При переходе с суши на море наблюдается обратная картина.

Большие водоемы также влияют на характер фронтов и связанных с ними погодных условий. При движении масс над водоемами в летнее время, днем, проис-

ходит некоторое охлаждение их внизу и вместе с тем, увеличение влагосодержания. По этой причине конвективные токи ослабевают над водоемами и над некоторой территорией за ними. При удалении от водоема происходит прогревание нижней части воздуха, что при увеличенном влагосодержании может привести к интенсивной конвекции и развитию мощных *Cb*.

Более заметное влияние на структуру фронтов оказывает орография. Даже небольшие возвышенности приводят к усилению облачности и осадков на наветренной стороне и к ослаблению их на подветренной стороне.

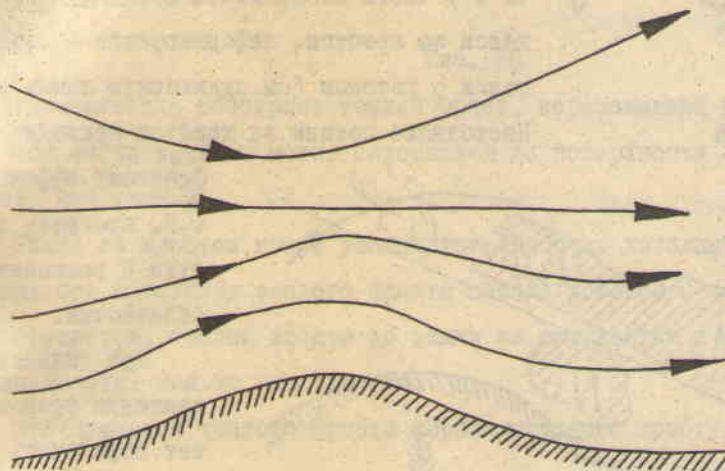


Рис. 47

Академик Н.Е. Кочин установил, что в нижней части атмосферы горизонтальные потоки воздуха следуют профилю хребта, а на большой высоте — противоположны ему. Поэтому на некоторой высоте над хребтом всегда наблюдается

невзмущенный поток (рис. 47). Высота этого неискаженного потока зависит от высоты хребта: над небольшими возвышенностями она равна 3–5 км, над высокими горами — 5–8 км. Таким образом, если на нижних уровнях с наветренной стороны хребта наблюдаются восходящие токи, то на некоторой высоте — нисходящие. На подветренной стороне, наоборот, внизу потоки нисходящие на высотах — восходящие.

Волновые движения, возникнув под влиянием хребта, сохраняются длительное время и за хребтом.

Влияя на направление потоков, горные хребты оказывают существенное влияние на пространственную структуру фронтов и связанных с ними явлений.

§ 23 . П е р е в а л и в а н и е т е п л о г о ф р о н т а ч е р е з г о р н ы й х р е б е т

Рассмотрим случай, когда фронт смещается в направлении хребта, оставаясь все время ему параллельным (рис.48).

При приближении фронта к хребту холодный воздух оказывается зажатым между фронтом и хребтом. В результате происходит вынужденный подъем холод-

ного воздуха с наветренной стороны хребта. Здесь, внутри холодной массы,

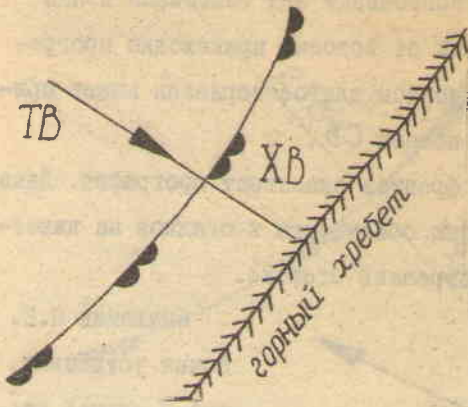


Рис. 48

развивается орографическая облачность и выпадают осадки. Последние начинают выпадать значительно раньше фронтальных. При приближении фронта перед горами образуется широкая зона облачности и осадков (рис. 49"а").

Когда фронт касается хребта (рис. 49"б") часть поверхности фронта, находящаяся за хребтом, деформируется в соответствии с потоком (см. пунктирную линию).

Нисходящие потоки за хребтом приводят к

феновому эффекту, т.е. прогреву воздуха и размыванию облачности.

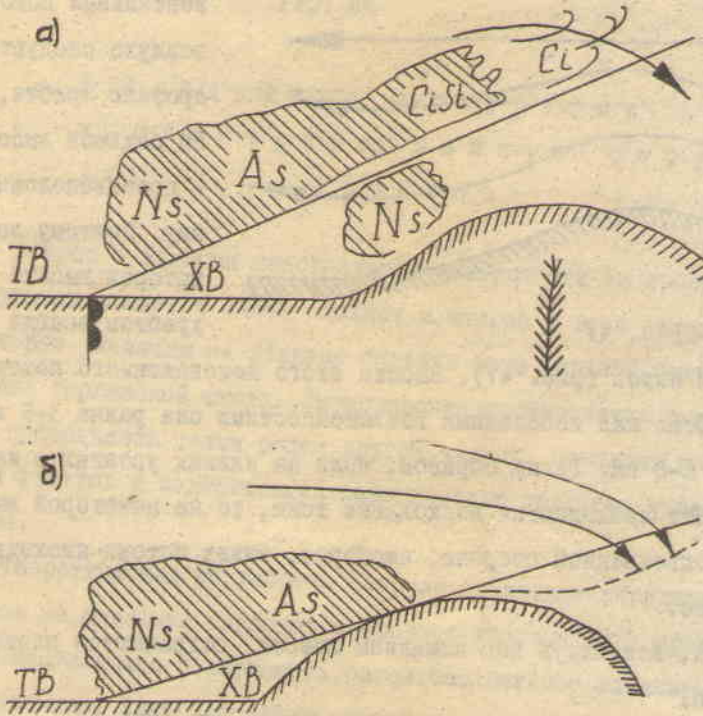


Рис. 49

При дальнейшем движении фрон может перевалить хребет. Часть поверхности, расположенная непосредственно за хребтом, под действием нисходящих потоков размывается. Более удаленная часть поверхности попадает в восходящий поток,

поэтому на некотором расстоянии от хребта поверхность теплого фронта восстанавливается. Здесь снова возникают облака характерные для теплого фронта.

Перед хребтом, за счет орографического подъема теплого воздуха, и после прохождения фронта могут развиваться слоисто-дождевые облака и выпадают осадки (рис. 50).

На подветренной стороне хребта в вертикальной плоскости имеет место дивергенция потоков. Поэтому за хребтом, у поверхности земли, очень часто образуется область падения давления, что способствует конвергенции горизон-

талых потоков.

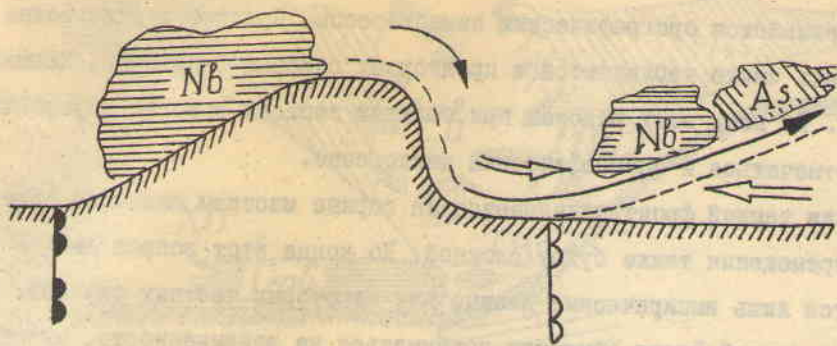


Рис. 50

Конвергенция обостряет теплый фронт, переваливший через хребет, в связи с чем он за хребтом может опуститься до поверхности земли и двигаться дальше как теплый.

Зимой за хребтом может располагаться очень холодный воздух. В этих случаях при опускании теплого фронта пленка холодного воздуха вблизи земли не разрушается, теплый воздух до земли не опускается и фронт за хребтом прослеживается только как верхний.

2. При движении теплого фронта перпендикулярно хребту или под большим уг-

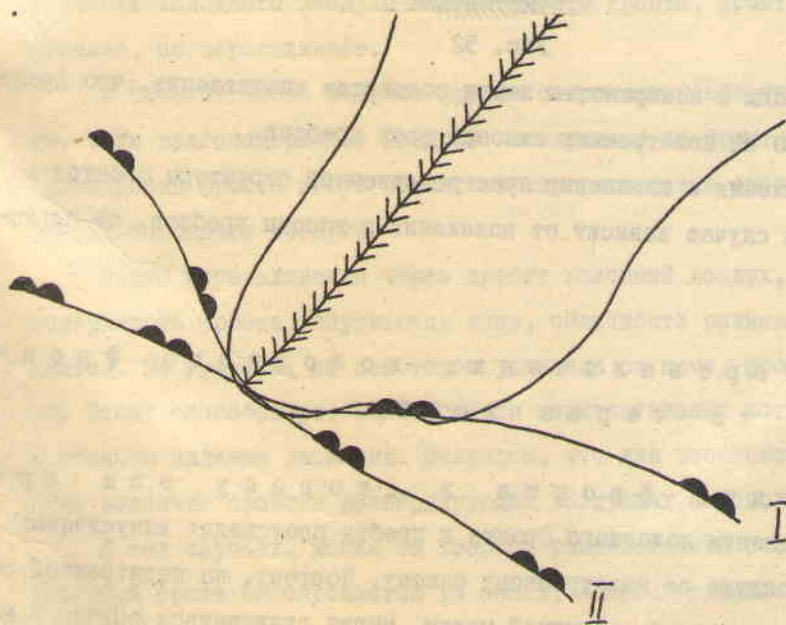


Рис. 5I

разделяемых фронтом, эта волна со временем исчезает. При больших запасах энергии неустойчивости из фронтальных волн может развиваться циклон, который

лом к нему происходят иные процессы. Участок фронта, соприкоснувшийся с хребтом, замедляет свое движение, а другие участки сохраняют прежнюю скорость движения (рис. 5I). В результате на фронте образуется волна. При устойчивом состоянии воздушных масс,

в дальнейшем будет смещаться вдоль фронта. Такого рода процесс развития циклонов называется орографическим циклогенезом. Oroграфические волны на фронтах очень часто наблюдаются в предгорных районах Тянь-Шаня, Кавказа и др. районах. Во всех этих районах при больших запасах энергии неустойчивости может отмечаться и орографический циклогенез.

3. Если теплый фронт поднимается на горные массивы сложного вида, то картина перемещения также будет сложной. До конца этот вопрос еще не изучен, имеются лишь эмпирические данные для некоторых частных случаев. Например, если теплый фронт вынужден подниматься на возвышенность, имеющую несколько параллельных хребтов, то могут быть случаи, когда поверхность теплого фронта, размываясь непосредственно за хребтом, и восстанавливаясь в зоне восходящих токов на некотором расстоянии от хребта, нигде не достигает поверхности земли. Такую поверхность фронта можно проследить только на высотах (рис. 52).

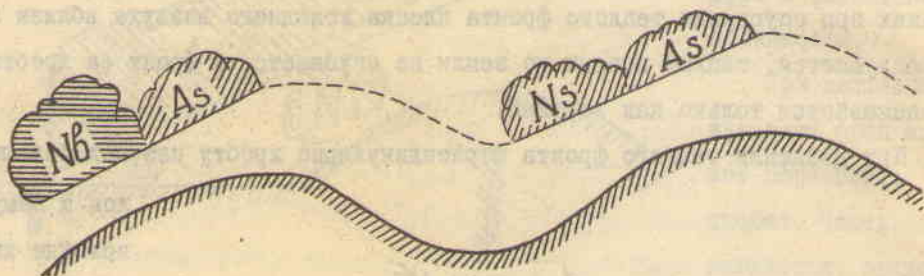


Рис. 52

При наблюдениях с поверхности земли создается впечатление, что фронт наблюдается только на наветренных склонах всех хребтов.

Характер движения и изменения пространственной структуры фронтов в каждом конкретном случае зависит от положения и высоты хребтов, от ширины и глубины долин.

§ 24. Переваливание холодного фронта через хребет

1. Движение фронта в сторону оси хребта. При приближении холодного фронта к хребту происходит вынужденный подъем теплого воздуха по наветренному склону. Поэтому, на наветренной стороне хребта, внутри теплой воздушной массы, могут развиваться облака и выпадать осадки.

Осадки и облачность наблюдаются задолго до прихода холодного фронта. Сначала орографические осадки не сливаются с фронтальными, а образуют самостоятельную зону. Но при подходе фронта к подножию хребта фронтальная зона

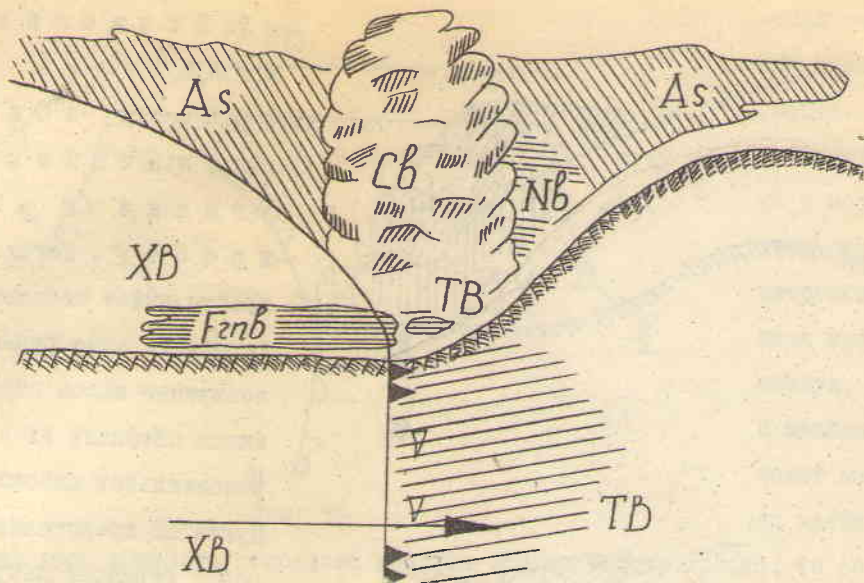


Рис. 53

сливается с орографической, образуя широкую облачную систему и зону осадков. (рис.53).

Как только фронт подходит к хребту начинается медленный подъем холодного воздуха в верх по склону хребта. Если мощность холодного воздуха за фронтом больше высоты хребта, то фронт может перевалить через хребет. Если мощность холодного воздуха меньше высоты хребта, фронт через хребет, как правило, не переваливает.

В течение всего подъема фронта сохраняется облачность и выпадают осадки. Если влагосодержание воздуха следующего за фронтом велико, то после прохождения фронта могут развиваться внутримассовые орографические осадки и осадки холодного воздуха.

После переваливания через хребет холодный воздух, а следовательно, и поверхность фронта, опускаются вниз, облачность размывается, осадки прекращаются. За хребтом, на некотором удалении от него, фронт может восстановиться. Этому способствует конвергенция горизонтальных потоков, наблюдающаяся в области падения давления. Очевидно, что для восстановления фронта необходимо различие свойств конвергирующих воздушных потоков.

В тех случаях, когда за хребтом располагается очень холодный воздух, холодный фронт не опускается до земли, а прослеживается как верхний холодный фронт.

На рис. 54"а" показана схема переваливания с восстановлением фронта за хребтом, на рис.54"б" образование верхнего холодного фронта.

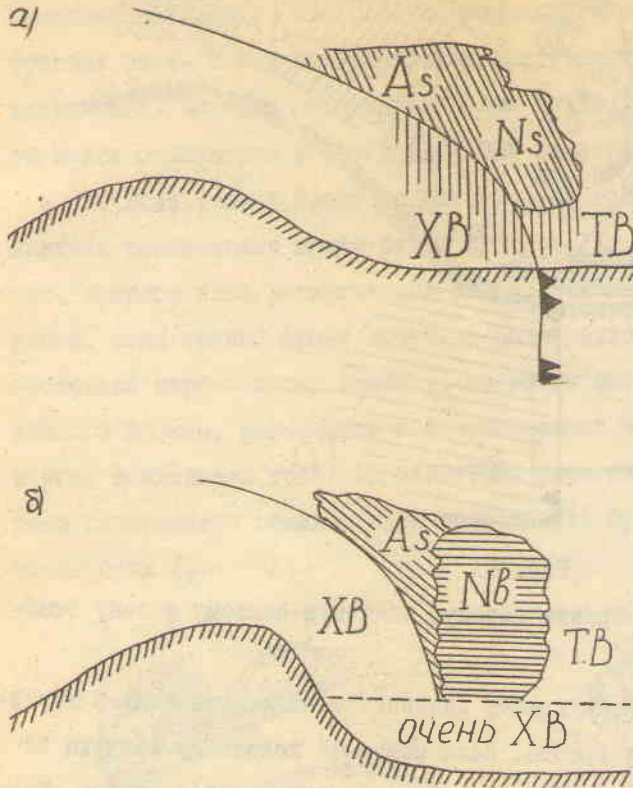


Рис. 54

(рис.55, на котором изображено два положения фронта). Когда фронт подходит

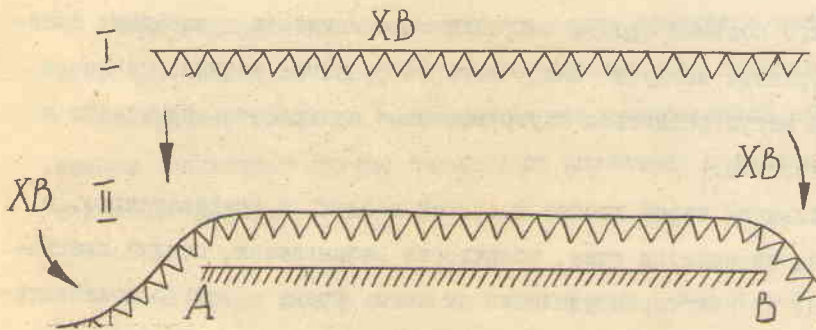


Рис. 55

к склону, движение того участка, который коснется склона, замедляется а участки, не касающиеся склонов, будут перемещаться с прежней скоростью. Воздушные массы, следующие за фронтом, будут обтекать хребет, в результате чего на фронте возникнут две волны. Если воздушные массы, разделяемые фронтом, стратифицированы неустойчиво, то из волн могут развиваться циклоны. Если же воздушные массы устойчивы, то циклоны не возникнут и холодный воздух будет обтекать хребет с обеих сторон. В результате такого обтекания, за хребтом может произойти смыкание двух участков холодного фронта. Такое смыкание называется орографическим окклюдированием. Схема орографического окклюдирования приведена на рис. 56, где цифрами обозначены

2. Движение холодного фронта под различными углами к хребту. Когда хребты имеют небольшие горизонтальные размеры, воздушные массы стремятся обтекать их в горизонтальной плоскости. Пусть АВ представляет собой горизонтальную проекцию горного хребта и пусть к хребту приближается холодный фронт, имеющий большую, чем хребет, горизонтальную протяженность

к склону, движение того участка, который коснется склона, замедляется а участки, не касающиеся склонов, будут перемещаться с

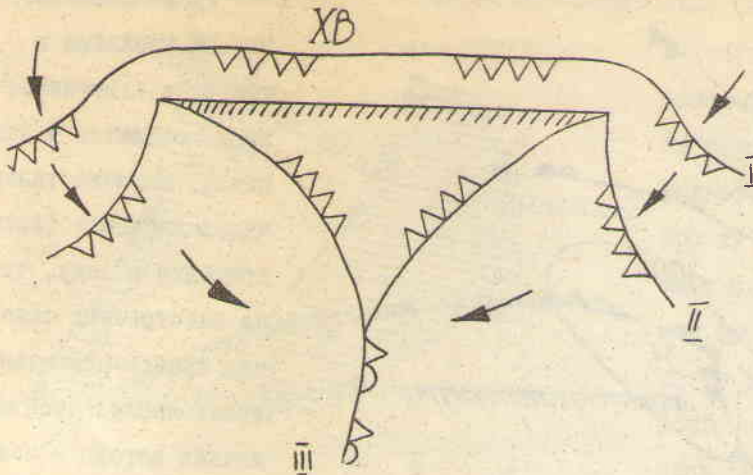


Рис. 56

последовательные положения фронта.

Одновременно с обтеканием, на наветренной стороне хребта воздух, хотя и медленно, может натекать на хребет.

Если при этом мощность холодного воздуха больше высоты хребта, то со временем фронт может перевалить хребет. В этом случае орографического окклюдирования наблюдаться не будет.

Как в случае орографического окклюдирования, так и в случае переваливания, перед хребтом будет наблюдаться образование облаков и выпадение осадков.

Рассмотренные выше схемы переваливания и орографического окклюдирования могут наблюдаться при приближении холодного фронта к Кавказскому хребту. Холодный воздух, обтекая горы с западной стороны по Черному морю, с восточной – по Каспийскому, по долинам рек может проникать за хребет, где и образуется орографическое окклюдирование.

3. Если холодный фронт приближается к хребту под большим углом, то воздействие хребта может быть различным.

а) при устойчивой стратификации воздуха может наблюдаться одностороннее огибание хребта небольшим участком фронта.

б) При устойчивой стратификации воздушных масс и значительном влагосодержании, орографический изгиб фронтальной поверхности может привести к возникновению волны, которая со временем развивается в циклон.

в) Могут быть случаи, когда один из участков фронта, коснувшись хребта, останавливается. За этим участком начинает накапливаться холодный воздух, в результате чего давление за ним растет. Рост давления приводит к тому, что возникает горизонтальный градиент давления $\frac{\partial P}{\partial l}$, направленный почти параллельно хребту. Это приводит к усилению скорости движения в направлении, параллельном хребту, в результате чего все больший и больший участок фронта становится параллельным хребту (линия II, рис.58).

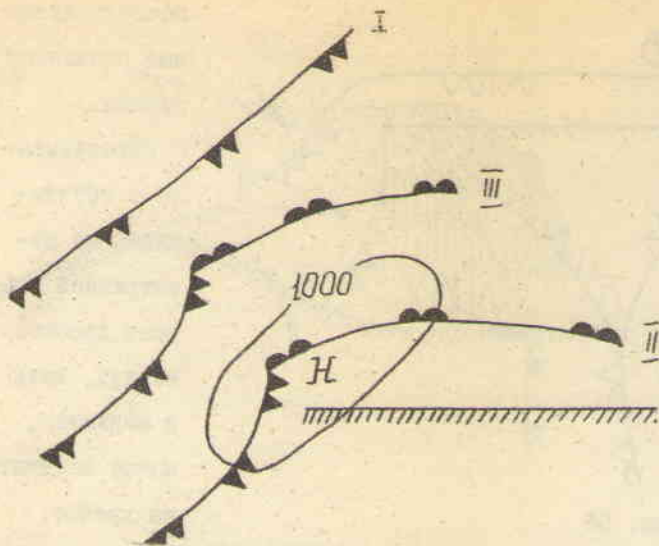


Рис. 57

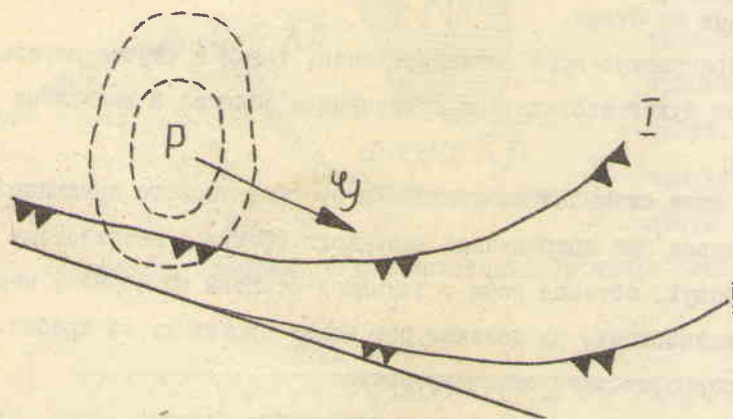


Рис. 58

наблюдавшиеся в практике службы прогнозов.

а) В горных районах со сложным рельефом могут наблюдаться верхние холодные фронты. Они возникают в тех случаях, когда фронты проходят над глубокими котловинами с малым стоком.

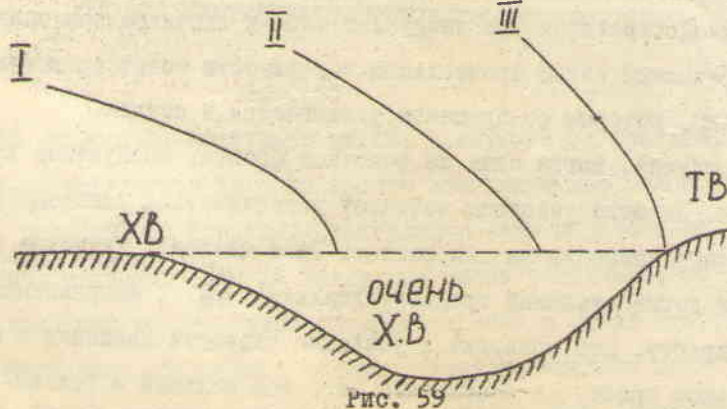


Рис. 59

Фронт оказывается как бы прижатым к хребту и длительное время остается у подножья. Наличие такого малоподвижного фронта приводит к тому, что на наветренных склонах хребта длительное время наблюдается облачная погода с осадками. Такого рода орographic осадки отмечаются в районах Кавказа, Тянь-Шаня и Карпат и др.

4. Влияние сложных форм рельефа на движение холодных фронтов. Этот вопрос чрезвычайно сложен, поэтому рассмотрим лишь частные случаи,

бокими котловинами с малым стоком. В таких котловинах зимой застаивается очень холодный воздух.

Холодный воздух, движущийся за фронтом, оказывается теплее, поэтому фронт перемещается на высотах

наблюдавшиеся в практике службы прогнозов.

и в температуре у поверхности земли не прослеживается (рис.59).

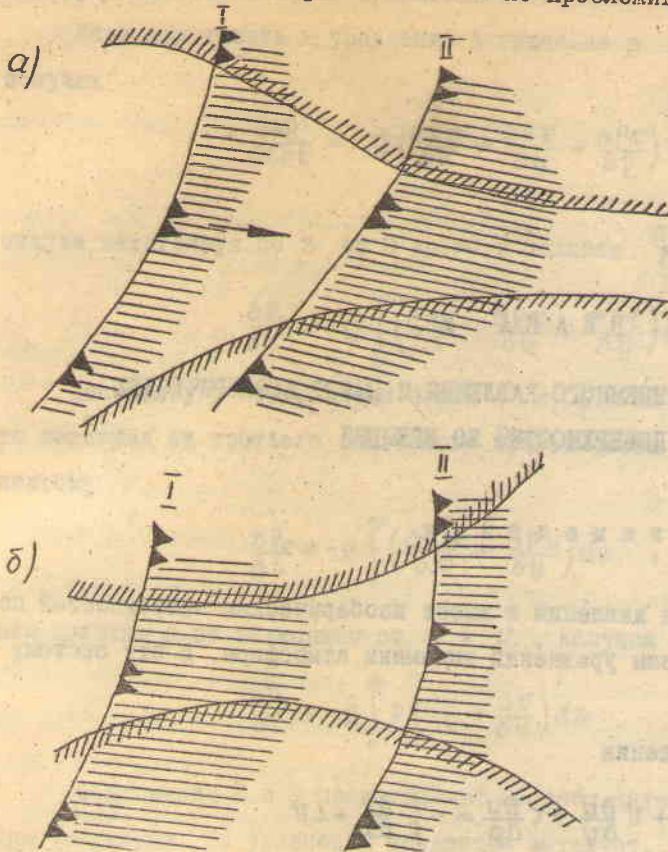


Рис. 60

б) Если на пути движения фронтов встречаются воронкообразные формы рельефа, направленные к фронту своей широкой частью, то при прохождении фронта через узкую часть воронки происходит усиление облачности и осадков (рис.60).

Объясняется это тем, что в узких проходах за счет инерции и трения происходит торможение потока, вследствие чего возрастают вертикальные токи. Наоборот, если воронкообразные формы рельефа направлены к фронту узкой частью

то в широкой ее части происходит ослабление облачности и осадков, причиной чего являются увеличенные горизонтальные скорости потока.