

## **Компетенция 2. Прогнозирование авиационных метеорологических явлений и параметров**

### **Прогноз ветра и сдвигов ветра**

#### **Содержание:**

1. Основные определения и причины возникновения ветра
2. Прогноз направления ветра
3. Прогноз скорости ветра у земли
4. Прогноз скорости ветра на высотах и струйных течениях
5. Прогноз сдвигов ветра

#### **1 Основные определения и причины возникновения ветра**

1.1 Ветром называется движение воздуха относительно земной поверхности. Передвижение воздушных масс в атмосфере играет большую роль в погодообразующих процессах. Благодаря им происходит перенос очагов тепла и холода, водяного пара, формирование облачности, сложных и опасных для авиации условий погоды.

Обычно под ветром подразумевается горизонтальная составляющая этого движения.

Основной причиной возникновения ветра является неравномерное распределение в горизонтальном направлении давления. Оно, в свою очередь, создается термическими условиями, поэтому температурное поле атмосферы считается первопричиной возникновения воздушных течений.

Горизонтальное движение возникает в результате неравномерного распределения давления.

Для количественной характеристики изменения давления по горизонтали существует величина, называемая горизонтальным барическим градиентом.

$$p = (P_2 - P_1) / \Delta S = \Delta P / \Delta S,$$

где  $\Delta P$  — разность давления в двух пунктах,  $\Delta S$  — расстояние между пунктами.

Сила барического градиента — величина, характеризующая отношение горизонтального градиента к единице массы воздуха. Сила барического градиента перпендикулярна изобарам и направлена в сторону низкого давления.

$$F_p = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{\Delta S},$$

где  $\rho$  — плотность воздуха

Как только масса воздуха начинает двигаться, то на ее движение влияют различные силы: сила вращения Земли, сила трения, центробежная сила. Движение воздуха (ветер) происходит под воздействием силы барического градиента, силы трения, отклоняющей силы вращения Земли и центробежной силы.

Движущей является сила барического градиента.

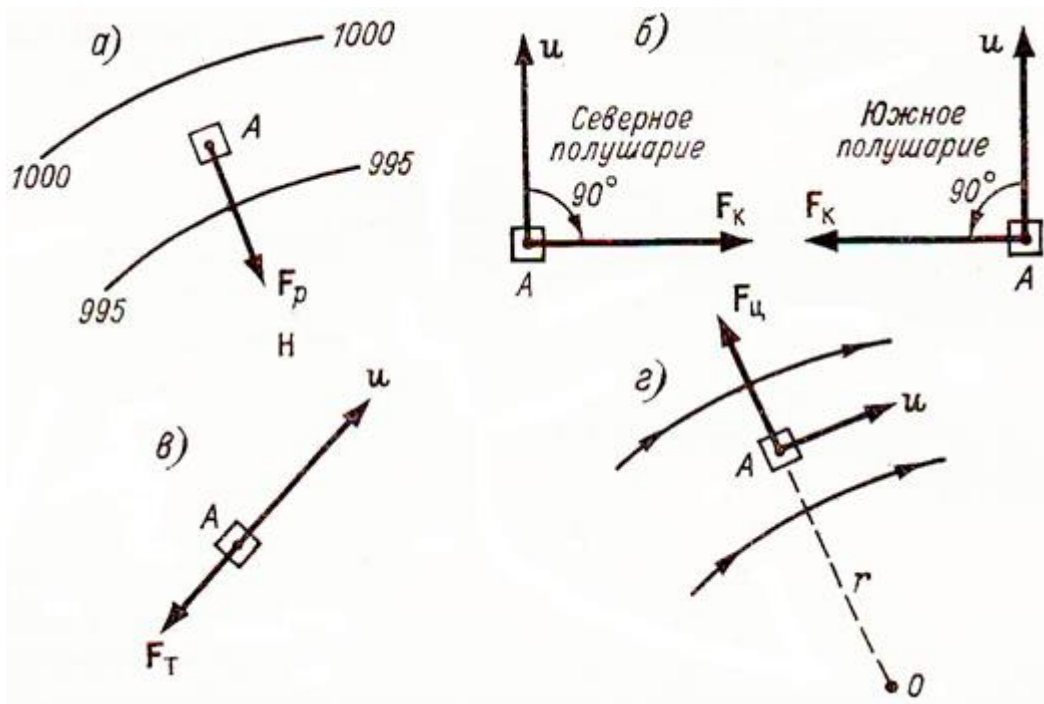


Рис. 1 — Силы, действующие на воздушную частицу А  
 а) Сила барического градиента б) Сила Кориолиса в) Сила трения  
 г) Центробежная сила

Атмосфера участвует в суточном вращении Земли. Если бы на частицы воздуха действовал только барический градиент, то направление движения воздуха (ветра) совпало бы с направлением горизонтального градиента давления. В действительности вектор ветра обычно отклоняется от направления градиента давления. Это вызвано наличием в атмосфере других сил, начинающих действовать одновременно с началом движения воздуха.

К таким силам относится инерционная сила, связанная с вращением Земли вокруг собственной оси с угловой скоростью, равной одному обороту в сутки. Ее обычно называют отклоняющей силой или ускорением Кориолиса. Эта сила не изменяет скорости воздушного потока, а лишь отклоняет направление его движения от первоначального.

Сила Кориолиса всегда действует в направлении, перпендикулярном направлению движения воздуха, и направлена по отношению к вектору ветра в Северном полушарии вправо, в Южном — влево.

$$F_K = 2\omega \sin \varphi \cdot U$$

$U$  — скорость воздушного потока,  $\omega$  — широта места,  $\varphi$  — угловая скорость вращения Земли.

Сила Кориолиса зависит от широты места и скорости воздушного потока. С уменьшением широты она уменьшается и становится равной нулю на экваторе. Чем больше скорость воздушного потока, тем больше сила Кориолиса.

В нижних слоях атмосферы (до высоты 1000–1500 м) на движение воздушной массы оказывают влияние, кроме рассмотренных сил, вязкие силы, т.е. силы трения. В результате их действия ветер, наблюдаемый у поверхности, отличается от градиентного как по скорости, так и по направлению.

Сила трения направлена в противоположную сторону по отношению к направлению движения, коэффициент трения зависит от свойств подстилающей поверхности.

Соотношение между силами, действующими на частицу воздуха при учете сил трения, можно рассмотреть на ниже предложенном рисунке. В случае установившегося давления, когда скорость ветра не меняется во времени, при прямолинейных изобарах барический градиент уравнивается суммой двух сил: Кориолиса и трения. Тогда вектор ветра в слое трения отклонится вправо (Рис. 2, а) от направления вектора барического градиента под углом меньшим, чем  $90^\circ$ . Значит, угол отклонения зависит от шероховатости подстилающей поверхности и широты места.

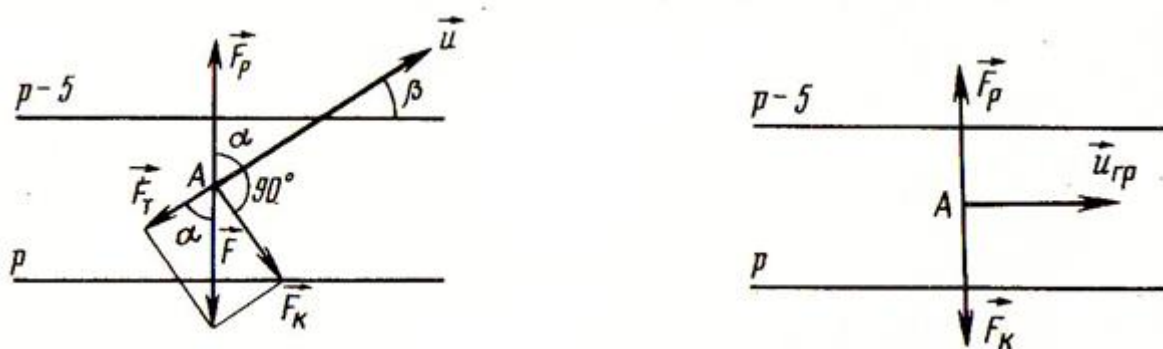


Рис. 2 — а) Ветер в пограничном слое атмосферы  
 б) Градиентный ветер

$F_p$  — сила барического градиента,  $F_k$  — сила Кориолиса,  $F_t$  — сила трения,  
 $U$  — направление движения

Если коэффициент трения уменьшается (т.е. стремится к нулю), то угол  $\alpha$  приближается к  $90^\circ$ , а ветер — к градиентному (Рис. 2, б).

Над сушей, где сила трения, а следовательно, и коэффициент трения больше, угол отклонения составляет в среднем  $30-45^\circ$ . Над морем, где сила трения меньше, угол отклонения может быть близок к  $90^\circ$ .

На экваторе, где  $\varphi = 0$ ,  $F_k = 0$ , движение воздуха должно совпадать с направлением силы барического градиента.

Если масса движется по криволинейной траектории, то на ее движение оказывает влияние центробежная сила. Центробежная сила при прямолинейных изобарах равна нулю.

В пограничном слое атмосферы на движение воздуха влияют три силы: сила барического градиента, сила Кориолиса и сила трения.

При установившемся движении силы, действующие на массу воздуха, уравновешивают друг друга (их векторная сумма равна нулю). Сила барического градиента ( $F_p$ ) равна сумме двух сил: силе Кориолиса ( $F_k$ ) и силе трения ( $F_t$ ). Сила Кориолиса отклоняет движение вправо, сила трения направляет его в противоположную сторону.

Направление ветра с силой барического градиента имеет угол  $\alpha$ .

В свободной атмосфере сила трения равна нулю. На массу действуют две силы: сила Кориолиса и сила барического градиента. Скорость воздушного потока (ветра) в этом случае определяется только силой барического градиента (сила Кориолиса на скорость не влияет), поэтому такой поток называется градиентным ветром.

Следует отметить, что из всех рассмотренных сил только сила барического градиента может вывести воздух из состояния покоя, а все остальные силы приводят только к изменению уже возникшего движения.

1.2 Направление ветра — это направление, откуда дует ветер. Обычно направление ветра измеряют в угловых градусах или румбах горизонта. При этом чаще всего используют восьмирумбовую шкалу (иногда применяются 4-х и 16-ти румбовые шкалы), однако для метеорологического обеспечения авиации всегда используются угловые градусы, округленные до целого десятка.

При инструментальном измерении параметров ветра направление ветра отсчитывается от истинного меридиана. В аэропортах, где наблюдается склонение  $\geq 5^\circ$ , экипажам при посадке сообщается направление ветра с учетом поправки на магнитное склонение (магнитный ветер). Магнитный ветер исчисляется от магнитного меридиана, пересекающего данный район. В сводках, распространяемых за пределы аэродрома, направление ветра указывается от истинного меридиана, т. е. без поправки на магнитное склонение.

1.3 Скорость ветра измеряется в м/с, км/ч, узлах или условных единицах (баллах). Величина скорости ветра, измеряемая в м/с или км/ч, пояснений не требует. Скорость ветра, равная одному узлу, соответствует приблизительно одной морской миле (1852 м) в час. Приблизительно один узел равен 0,5 м/с.

В настоящее время наиболее распространенными единицами измерения параметров ветра являются: для направления ветра — измерение направления ветра в угловых градусах, для скорости ветра у земли — скорость ветра в м/с или в узлах, для скорости ветра на высотах — в км/ч.

1.4 Ветер оказывает большое влияние на взлет, полет на эшелоне и посадку ВС всех типов.

Говоря о влиянии ветра на взлет и посадку, следует отметить, что самолет взлетает и осуществляет посадку всегда против ветра. Встречный ветер уменьшает скорость отрыва и посадочную скорость и, следовательно, уменьшает длину разбега при взлете и длину пробега при посадке самолета.

Встречный ветер при взлете, создавая дополнительный обдув самолета, увеличивает путевую устойчивость и управляемость самолета в начале движения. При попутном ветре, наоборот, увеличивается длина разбега и пробега, ухудшается устойчивость и управляемость самолета в начале движения при взлете.

Давайте вспомним формулу подъемной силы:

$$Y = c_y S \rho \frac{V^2}{2}.$$

Обычно считают, что в этой формуле  $V$  — скорость полета самолета. Для выполнения многих расчетов это справедливо, но на самом деле это не совсем так. Величина  $V$  — не скорость полета самолета, а скорость обтекания поверхности самолета воздушным потоком, т. е.  $V = V_{c-ma} + U$  при встречном ветре и  $V = V_{c-ma} - U$  при попутном ветре.

Следовательно, взлетая при встречном ветре, самолет достигает скорости отрыва ( $V_{отр}$ ) при меньшей скорости собственного движения.

$$V_{c-ma} = V_{отр} - U.$$

Это означает, что самолет может взлететь с более короткой ВПП, или при взлете у него уменьшится длина разбега.

Аналогичная картина будет наблюдаться и при посадке самолета. При взлете и посадке с попутным ветром, наоборот, увеличивается как длина разбега, так и длина пробега самолета.

Мы рассмотрели пока только влияние встречного или попутного ветра на взлет и посадку самолета. Однако боковой ветер (а ветер любого направления можно разложить на две составляющие таким образом, что одна из них будет строго попутная или встречная, а другая — строго боковая) также оказывает неприятное, а иногда и опасное воздействие на самолет. Очевидно, что боковой ветер создает силу, стремящуюся развернуть самолет носом против ветра.

Посадка при боковом ветре осложняется еще больше, чем взлет, вследствие сильного сноса самолета. Неточный учет ветра может привести к приземлению вне ВПП. Самолет, как и при взлете, при боковом ветре подвержен воздействию разворачивающего и кренящего моментов.

Для обеспечения безопасности полетов для каждого типа самолета устанавливаются предельно допустимые значения скорости бокового ветра (его боковой составляющей), скорости попутного ветра и даже скорости встречного ветра.

Наши магистральные самолеты могут взлетать и садиться при боковом ветре до 15 м/с на сухую ВПП и до 5–8 м/с на мокрую ВПП.

Для легких самолетов скорость бокового ветра не должна превышать 10 м/с.

Для попутного ветра ограничения более жесткие: практически все типы самолетов могут взлетать при попутном ветре, скорость которого не превышает 5 м/с. В принципе это ограничение закономерно, так как при попутном ветре заметно увеличивается длина разбега самолета, и длины ВПП просто может не хватить для взлета.



Существующие ограничения полетов по скорости встречного ветра почти символичны. Оно для большинства типов самолетов составляет 25–30 м/с, что встречается довольно редко. Причина ограничения по встречному ветру заключается в том, что ветер такой силы, как правило, бывает порывистым, с резкими изменениями скорости на достаточно заметную величину. Здесь очень быстро (в течение нескольких секунд) скорость ветра может колебаться от 10–12 м/с до 25–30 м/с. Такие изменения скорости ветра приводят к резким изменениям подъемной силы (см. формулу), что одинаково как для взлета, так и для посадки.

### *1.5 Изменение ветра с высотой*

Приземный слой (или подслой пограничного слоя) атмосферы до высоты 30 м характеризуется возрастанием с высотой коэффициента турбулентного обмена. В этом слое направление ветра с высотой практически не меняется, а скорость быстро возрастает. В пограничном слое (слое трения) выше приземного подслоя коэффициент турбулентного обмена мало меняется с высотой. Здесь скорость продолжает возрастать, причем ветер поворачивает в Северном полушарии вправо, в Южном — влево, до тех пор, пока не будет направлен по касательной к изобаре, т.е. не достигнет значений градиентного ветра. Высота ( $h$ ), начиная с которой ветер приближенно можно считать геострофическим, составляет около 1 км.

При ослабленном турбулентном обмене влияние приземного трения распространяется до меньшей высоты ( $h \approx 0,3-0,4$  км), при сильном турбулентном обмене до большей высоты ( $h \approx 1,5-2,0$  км).

Если из одного и того же начала координат отложить векторы ветра на различных высотах пограничного слоя и соединить концы этих векторов, то получится кривая линия, называемая спиралью Экмана.

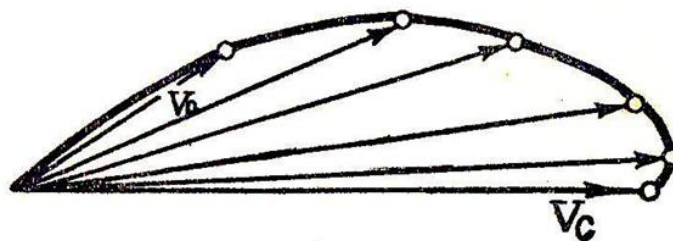


Рис. 3 — Спираль Экмана

Наблюдения показывают, что с высотой ветер, как правило, поворачивает вправо и что скорость увеличивается с высотой, вначале быстрее, а выше 0,5 км медленнее. Однако в приземном слое толщиной 50–100 м и скорость ветра сильно отклоняется от предсказанного этой теорией и, главное, угол отклонения ветра от изобары не только не равен  $45^\circ$ , но и сильно изменчив.

#### 1.6 Струйные течения и их влияние на полеты ВС

Влияние ветра на параметры движения ВС наиболее существенно при больших скоростях ветра, особенно в области струйных течений (СТ).

По определению Всемирной метеорологической организации «Струйное течение — это сильный узкий поток с почти горизонтальной осью в верхней тропосфере или нижней стратосфере, характеризующийся большими вертикальными и горизонтальными сдвигами ветра и одним или более максимумами скорости».

Условно за нижний предел струйного течения принимается скорость 30 м/с. Указанный предел скорости выбран с учетом того, что ветер, превышающий 100 км/ч, оказывает заметное влияние на путевую скорость самолетов, летающих в зоне струйных течений.

Длина струйного течения составляет порядка тысяч километров, иногда струйные течения могут опоясывать весь земной шар, ширина — порядка сотен километров, вертикальная мощность — нескольких километров.

Изменение скорости ветра в области струйного течения обычно

составляет 5–10 м/с на 1 км высоты и 10 м/с и более на 100 км в горизонтальном направлении.

Слева от оси струйного течения, если смотреть по направлению потока, расположена циклоническая сторона струйного течения, справа — антициклоническая. Для тропосферных струйных течений применяют названия «теплая» (антициклоническая сторона струйного течения) и «холодная» (циклоническая сторона струйного течения).

Струйные течения образуются в зонах наибольшего сближения теплых и холодных воздушных масс, где создаются значительные горизонтальные градиенты давления и температуры. Поскольку наибольшие контрасты температуры в зонах атмосферных фронтов наблюдаются в холодную половину года, то в этот период струйные течения наиболее активны.

Положение струйных течений совпадает с положением области наиболее сильных меридиональных градиентов температуры и давления в тропосфере, т.е. с положением высотной фронтальной зоны. Струйные течения умеренных широт связаны с главными фронтами тропосферы — полярными и арктическими.

Почему струйное течение находится рядом с тропопаузой? Понижение температуры с высотой до уровня тропопаузы ограничивает увеличение градиента давления и скорость ветра. Поэтому струйное течение располагается вблизи тропопаузы. Вероятность возникновения сильных ветров на высоте существует везде, где наблюдаются контрасты температур, таким образом, в умеренных широтах струйные течения всегда связаны с активными фронтальными системами.

Самыми сильными из СТ являются полярные фронтальные (чаще называемые просто полярными струйными течениями) и субтропические струйные течения, движущиеся с запада на восток. Полярные и субтропические струйные течения «извиваются» волнами вокруг Земного шара (то есть имеют волнообразную структуру). Они достигают тропических

и полярных широт, хотя их положение по климатическим данным приходится на умеренные широты.

Кроме субтропического струйного течения в атмосфере тропиков в верхней тропосфере существует также тропическое восточное струйное течение.

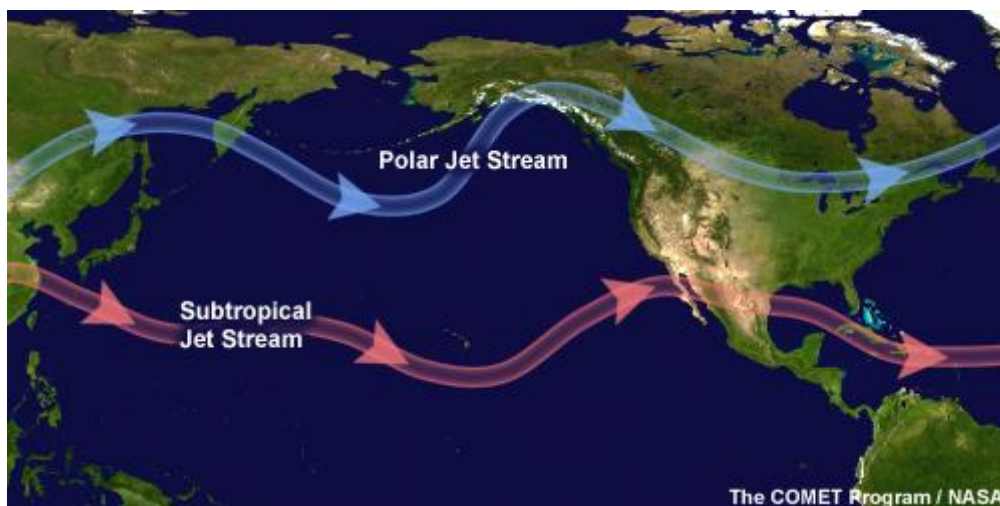


Рис. 4 — Полярное и субтропическое струйные течения в Северном полушарии



Рис. 5 — Профиль от экватора к полюсу, показывающий среднее положение двух струйных течений, внутритропическую зону конвекции и облака вдоль полярного фронта

Полярное и субтропическое струйные течения имеют западное направление, т.к. избыточное нагревание в тропических широтах создает высотный градиент температуры, направленный с севера на юг, который, в свою очередь, создает область высокого давления на экваторе. Возникшая сила барического градиента формирует поток воздуха,двигающегося от экватора к полюсам, который отклоняется на восток под действием силы Кориолиса. Таким образом, в средних широтах ветры в верхней тропосфере имеют западное направление.

Существуют также области максимальных ветров в нижней тропосфере, которые называются низкоуровневыми струйными течениями. В тропиках самыми известными из них являются Сомалийское струйное течение и Восточноафриканское струйное течение.

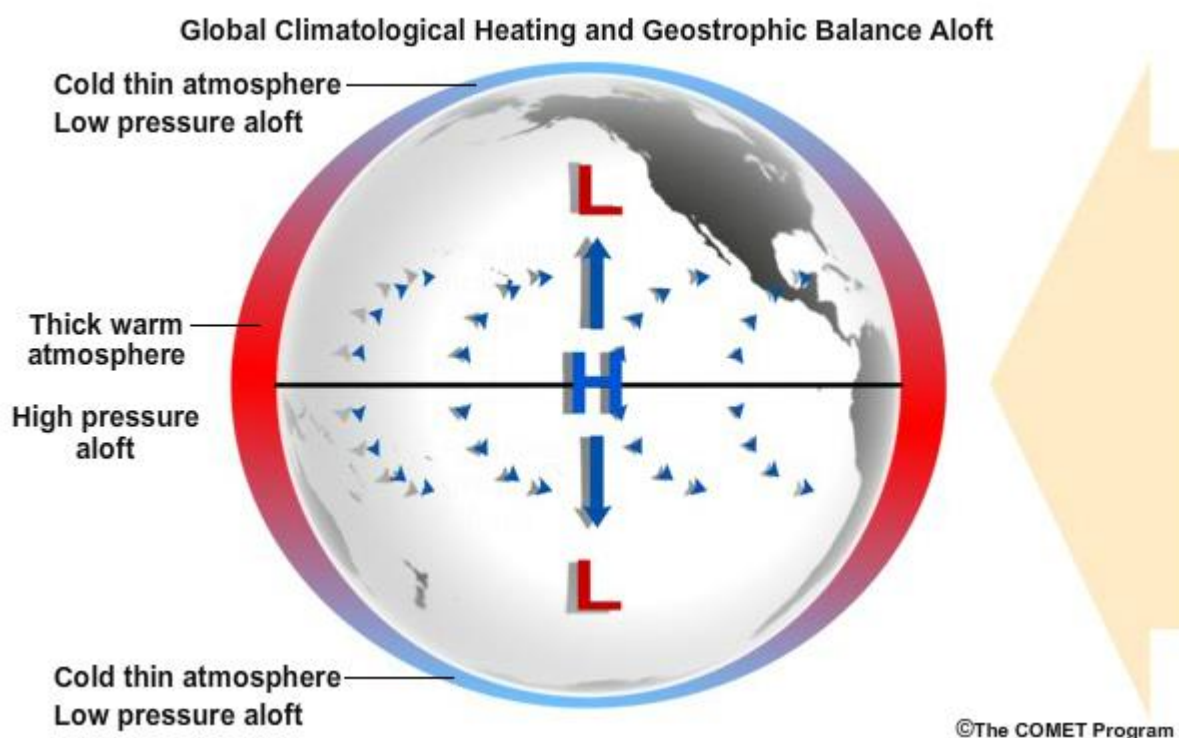


Рис. 6 — Схематичное изображение разницы в нагревании тропосферы, возникающие градиенты давления на высоте, отклонения под действием силы Кориолиса и западные ветры в средних широтах

По условиям географической локализации различают:

- Струйное течение арктического фронта (арктическое СТ), располагающееся на высотах 6–8 км с максимальными скоростями, достигающими 60–100 м/с и выше.

- Струйное течение полярного фронта (струйное течение умеренных широт), находящееся на широте в пределах 30–70° между изобарическими поверхностями 300 и 200 гПа (на высоте 7,5–11 км над уровнем моря). Наиболее активно полярное струйное течение зимой, когда оно переходит в тропические широты и сливается с субтропическим струйным течением. Максимальные скорости достигают 80–100 м/с, иногда 120–130 м/с. Наибольшие скорости ветра отмечаются над восточным побережьем Северной Америки и особенно Азии.

Струйное течение хорошо выражено на ежедневных картах максимальных ветров.

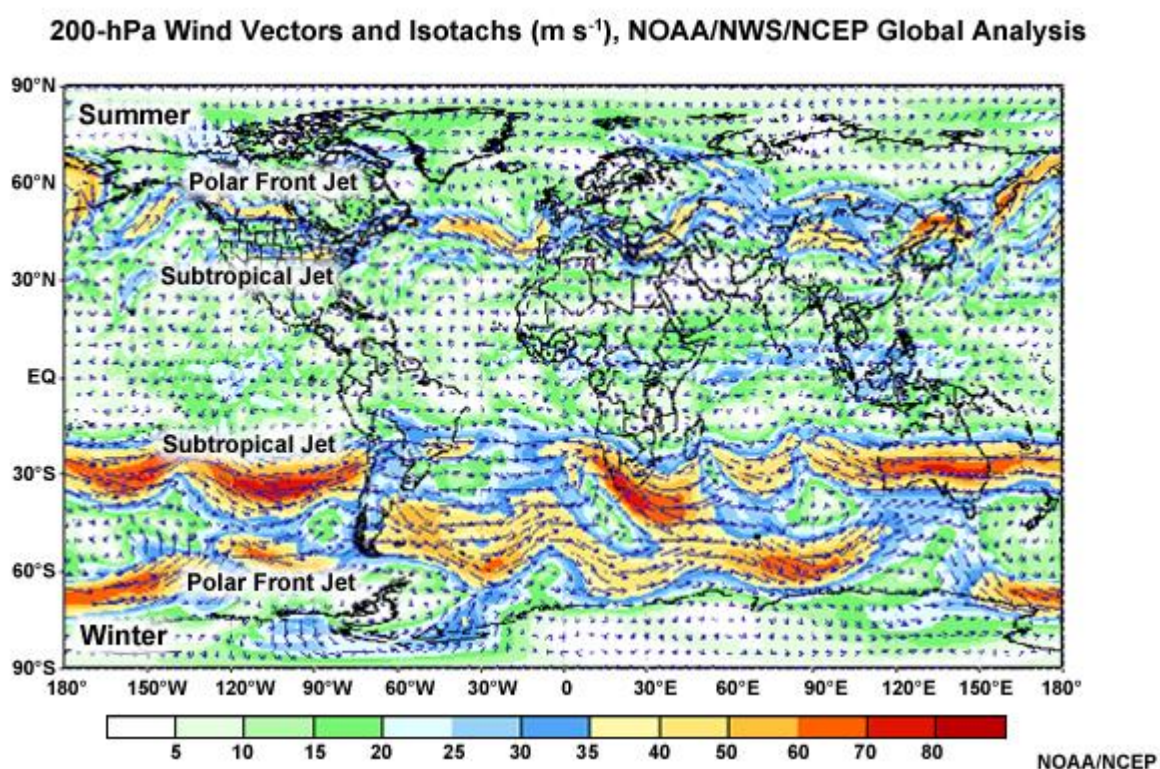


Рис. 7 — Векторы ветра на поверхности 200 гПа и изотахи от 0000 UTC 15 августа 2012. Обратите внимание на то, насколько сильны полярное (около 30° с.ш.) и субтропическое (около 60° с.ш.) струйные течения в зимнем полушарии; максимальная скорость ветра превышает 80 м/с.

Vertical Cross Section of Temperature (°C) and Zonal Wind (m/s) at 180°E Longitude  
January Climatology NCEP/NCAR Reanalysis (1981-2010)

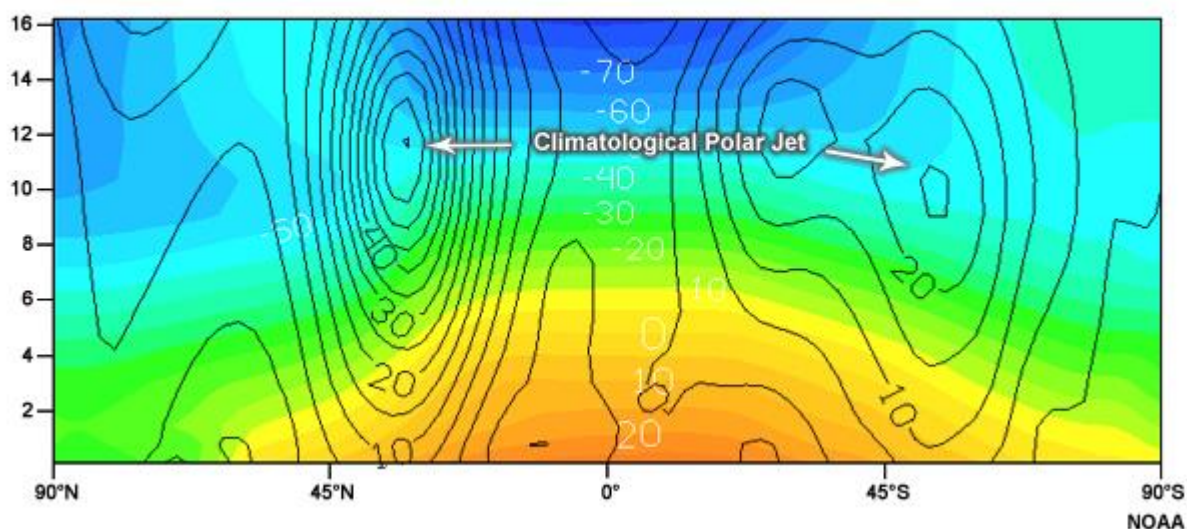


Рис. 8 — Вертикальный профиль средней температуры (°C) и скорости зонального ветра (м/с) на долготе 180° в.д. в январе (данные реанализа NCEP/NCAR 1981–2010)

Полярное фронтальное струйное течение формируется в области больших градиентов температуры между холодной полярной и более теплой воздушными массами. Градиенты увеличиваются с высотой, т.к. столб теплого воздуха расширяется больше, чем столб относительно холодного. Соответствующая разница давлений в верхней тропосфере увеличивается с высотой, вызывая усиление ветра.

- Субтропическое струйное течение располагается на высотах 11–16 км. Субтропическое струйное течение, обычно самое сильное около поверхности 200 гПа и на широте 30°, имеет самый сильный сдвиг ветра в верхней тропосфере. Образуется в результате восходящего движения воздуха в направлении полюса в ячейке циркуляции Гадлея.

Наибольшие скорости отмечаются на восточном побережье Азии, преимущественно над югом Японии, а также на восточном побережье США. Над Японией максимальная скорость ветра иногда достигает 180–200 м/с. Субтропическое струйное течение относится к наиболее устойчивым и прослеживается в виде почти непрерывного пояса сильных западных ветров на северной периферии субтропических областей высокого давления.

Положение его оси испытывает значительные сезонные изменения.

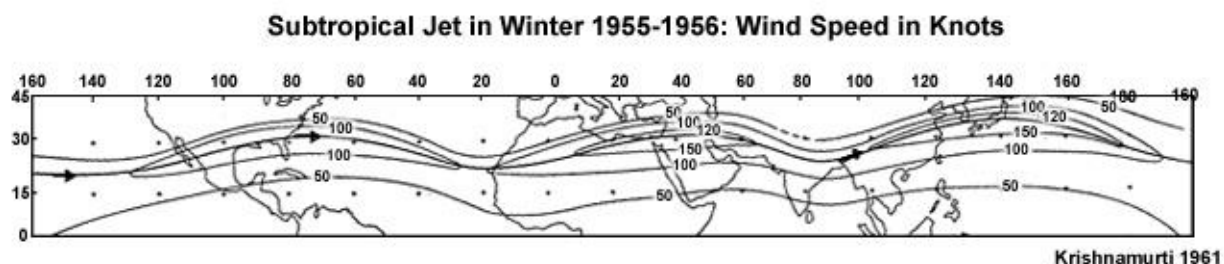


Рис. 9 — Среднее субтропическое струйное течение зимой 1955–1956, построенное по изотохам на уровне 200 гПа (через 25 м/с). Ось струйного течения в среднем находится на широте  $27,5^\circ$  с.ш. (Krishnamurti, 1961)

Зимой субтропическое струйное течение практически неразрывно в обоих полушариях и может достигать 75–100 м/с. В Северном полушарии струя проявляется как квазистационарная система с гребнями и максимумами скорости над юго-востоком США, Средиземным морем и северо-западной частью Тихого океана. Ложбины обычно располагаются над центральными частями Атлантического и Тихого океанов и между Аравийский морем и Индией. Среднее положение субтропического струйного течения в северном полушарии зимой — примерно  $27,5^\circ$  с.ш., в пределах от  $20^\circ$  до  $35^\circ$  с.ш. Субтропическое струйное течение в Южном полушарии существует в течение всего года. Однако летом в Северном полушарии оно периодически появляется при перемещении на север, его среднее положение близко к  $40^\circ$  с.ш., а средняя скорость падает до 35 м/с, это связано с тем, что уменьшается градиент температуры в направлении с севера на юг.



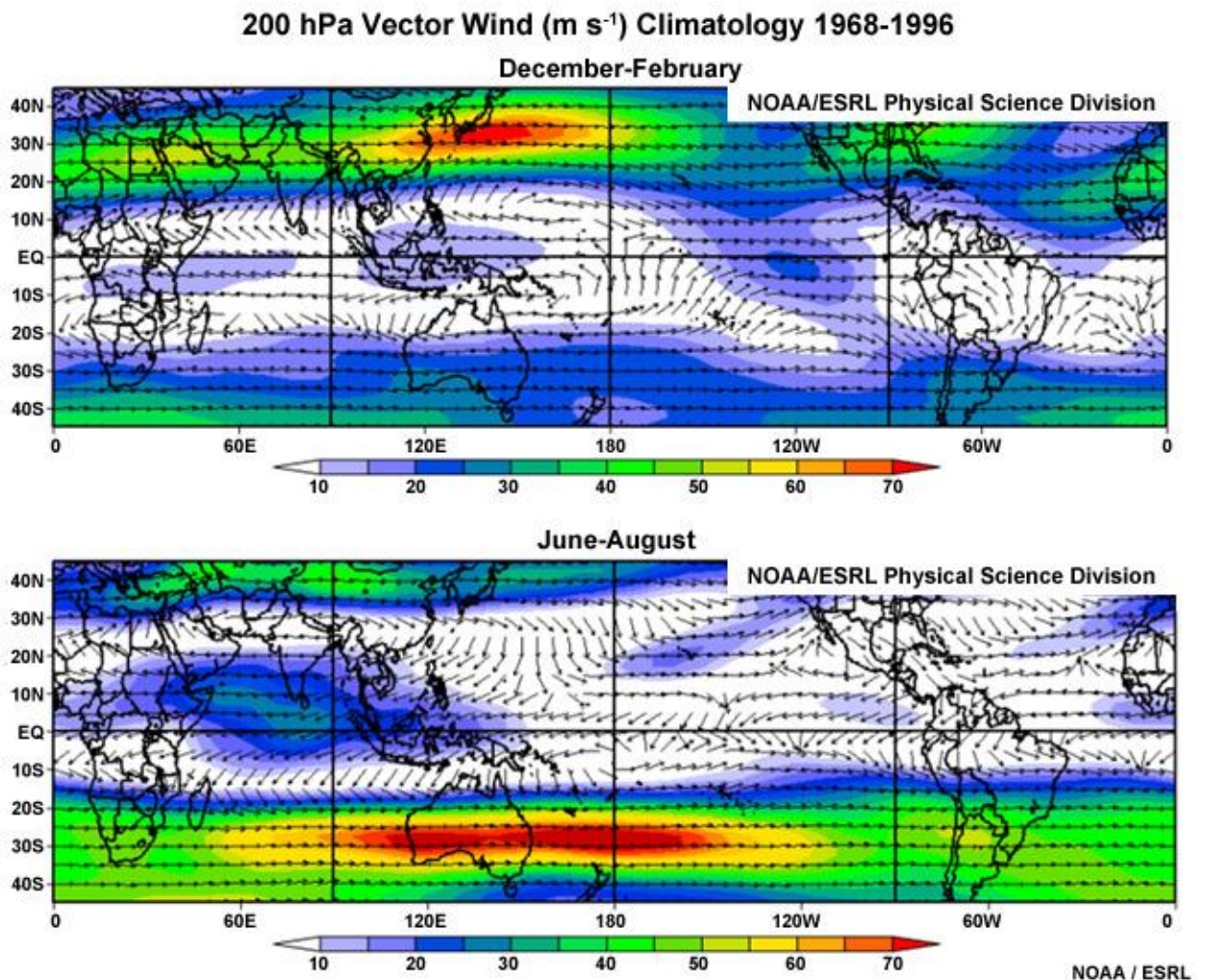


Рис. 10 — Векторы средней скорости ветра на 200 гПа в декабре–феврале (верхний рисунок) и июне–августе (нижний рисунок) за период 1968–1996 гг. Обратите внимание, что самые сильные струйные течения наблюдаются в зимнем полушарии (красным цветом обозначена область со скоростями более 70 м/с).

Разница становится очевидной, если сравнить ветер на поверхности 200 гПа в двух полушариях зимой и летом для каждого из них. Отклонение от среднего положения наиболее ярко выражено в области Америка-Атлантика, чем в Африканско-Азиатском регионе. Субтропическое струйное течение может быть временно смещено, когда глубокие ложбины средних широт проникают в субтропики. При таких смещениях субтропическое струйное течение может сливаться с полярным фронтальным струйным течением. Среднее широтное положение субтропического струйного течения менее изменчиво, оно сдвигается примерно с 26,5° ю.ш. зимой и 32° ю.ш.

летом. Максимальные скорости ветра превышают 70 м/с зимой и 40 м/с летом. Даже если струйное течение расположено высоко, континентальный эффект очевиден.

- Экваториальное струйное течение с максимальной скоростью 40–50 м/с обычно имеет восточное направление и может наблюдаться в течение всего года на уровнях 100–10 гПа. Экваториальное СТ наблюдается над Африкой, Юго-Восточной Азией, Австралией, Атлантическим и Тихим океанами в полосе между экватором и 15 ° обоих полушарий.

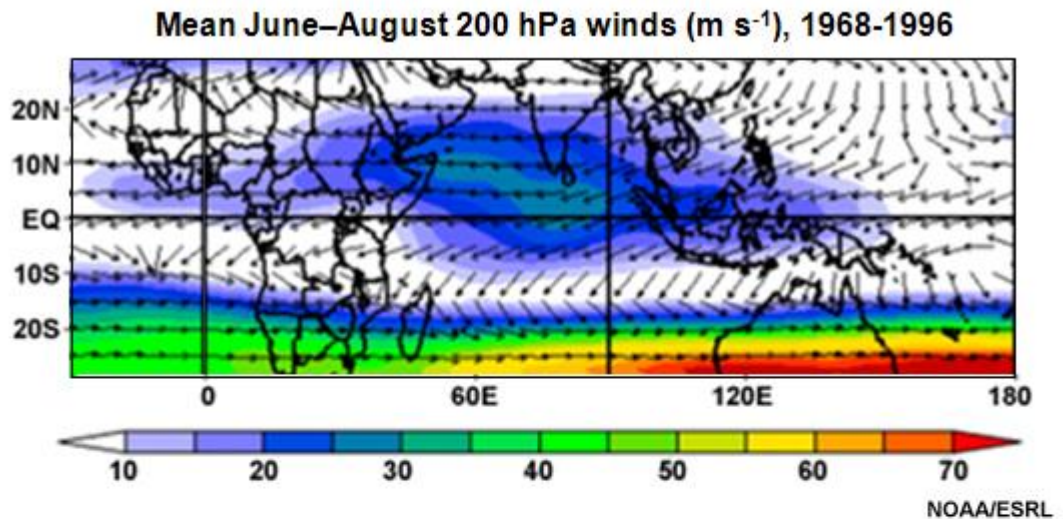
Рисунок ниже показывает среднюю протяженность (положение) и мощность струйного течения на уровне 200 гПа за период с июня по август. Оно достаточно устойчиво в своем положении, направлении и интенсивности с июня по начало октября.

В Северном полушарии экваториальное СТ удаленнее всего от экватора отмечается в июле, ближе к экватору оно в январе.

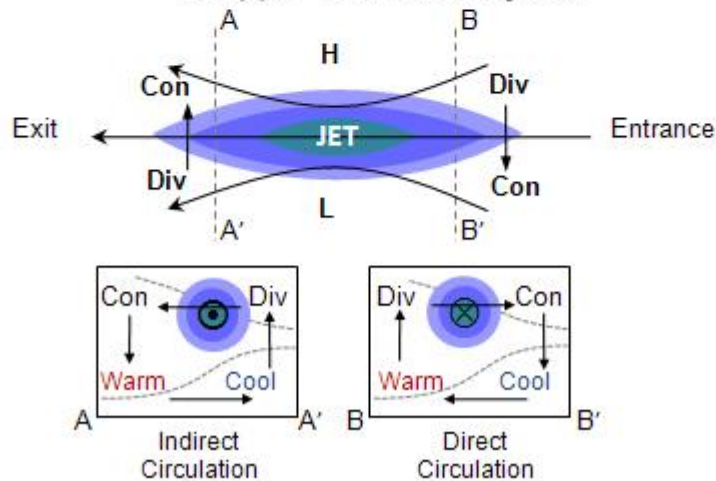
Оси арктического, полярного и субтропического струйных течений практически всегда находятся в верхней тропосфере, хотя сами они могут охватывать как верхнюю тропосферу, так и нижнюю стратосферу. Эти СТ называют тропосферными струйными течениями.

Ось экваториального СТ всегда наблюдается выше 20–30 км (50–10 гПа), и его относят к стратосферным СТ.

Навигационные значения струйных течений трудно переоценить. Если полет в зоне СТ происходит против ветра, то путевая скорость резко уменьшается, а если по ветру — возрастает. При полете на большие расстояния можно использовать струйные течения для сокращения времени полета до пункта назначения или для увеличения дальности полета.



**Secondary circulations in the exit and entrance of Upper-level Easterly Jet**



Adapted from Uccellini and Kocin 1987/ The COMET Program

Рис. 11 — Верхний рисунок: средние векторы скорости ветра на уровне 200 гПа (1948–2000). Ядро ТВСТ находится над северной частью Индийского океана; ветры, превышающие 20 м/с, занимает пространство с прибрежной части азиатского континенты до Эфиопии.

Нижний рисунок: схема идеального локального максимума скорости ветра, его вторичная циркуляция и регионы ожидаемой высотной дивергенции (восходящее движение) и конвергенции (опускание).

В настоящее время существуют методы, которые позволяют по данным о поле ветра в районе полетов предложить самый выгодный маршрут, по которому самолет прилетит в пункт назначения или с наименьшей затратой времени, или с наименьшим расходом топлива. Все сказанное выше свидетельствует о большом аэронавигационном значении

струйных течений и о ценности прогностической информации траектории движения самолета.

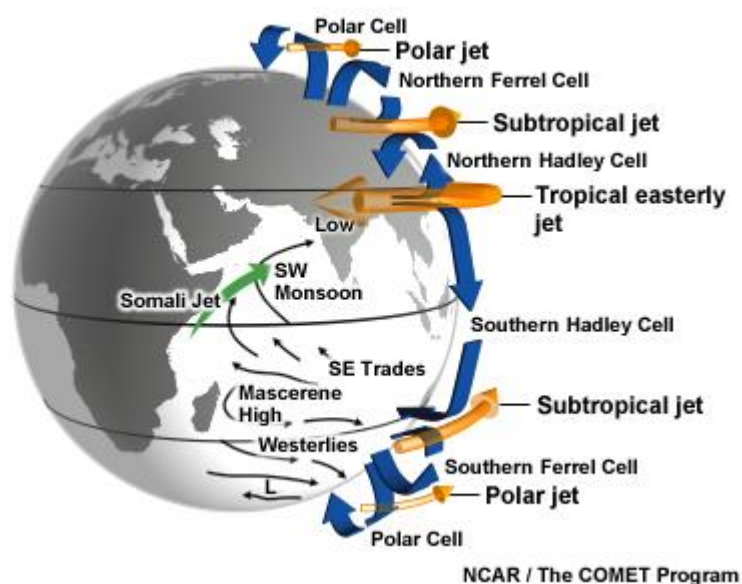


Рис. 12 — Схема основной циркуляции над Индийским океаном, планетарная ячейка Гадлея, экваториальное СТ и летний азиатский муссон (адаптировано с разрешения GeraldMeehl, NCAR)

### 1.7 Местные ветры

Есть масса так называемых местных ветров, которые необходимо учитывать, так как они оказывают влияние на деятельность авиации в некоторых регионах.

Один из местных ветров на озере Байкал, дующий из долины речки Баргузин, называется «Баргузин».

Там же, на Байкале, есть и другие местные ветры: «Сарма» — поток холодного воздуха, вырывающийся из узкой долины речки одноименного названия, «Горный» — западный, сильный и холодный стоковый ветер, наблюдающийся в холодную половину года, юго-восточный ветер «Шелонник» и т. д.

Жителям Европейской части России известна так называемая «Новороссийская бора» — очень сильный поток холодного воздуха,

обрушающийся на Новороссийск с Мархотского перевала.

Аналогичные ветры наблюдаются на Новой Земле, на Балканах и в Антарктиде. В ряде мест Антарктиды они наблюдаются почти круглый год.

Как известно, стоковый ветер — это поток воздуха, возникающий под действием силы тяжести и направленный вдоль пологого склона местности. Классическим примером стоковых ветров может быть стоковый ветер в Антарктиде. На станции Восток, расположенной на высоте около 3000 м над уровнем моря, всегда очень холодно, а вот сильных ветров практически не бывает. Зато холодный воздух станции Восток по пологому антарктическому куполу начинает медленно сползать к побережью Антарктиды. Постепенно разгоняясь, стоковый ветер может стать очень сильным и очень опасным.

Жителей Женевы часто беспокоят альпийские стоковые ветры. Здесь такой ветер называется «Фён». Слабые стоковые ветры характерны и для других горных районов Земли.

В Африке, в пустыне Сахара, грозным ветром является «самум». Он поднимается в воздух и переносит сотни тонн песка, который образует огромные черные тучи.

По Южной Африке часто проносится холодный вихрь «памперо».

«Свои» местные ветры со своими местными названиями и именами есть и на Урале, на Алтае и в других районах России.

Можно назвать еще несколько довольно распространенных по Земному шару ветров.

Во-первых, это бриз. Бриз — это ветер, возникающий в прибрежной черте океанов, морей и больших рек и озер. Он проникает от береговой линии на десятки километров и имеет четко выраженный суточный ход. Днем, когда суша прогревается значительно сильнее, чем вода, бриз дует в обратном направлении с суши на море.

Во-вторых, в горных районах всегда существуют горно-долинные ветры. Эти ветры также дважды в сутки меняют свое направление. И все зависит от того, как Солнце прогревает склоны и долины. Днем нагретый

воздух долин поднимается вверх по склону, а ночью холодный воздух опускается по склону.

Пожалуй, нельзя не назвать еще один местный ветер достаточно большого масштаба. Это муссоны.

Метеорологический термин «муссон» произошел от арабского слова «маусам», что означает сезон. Метеорологи понимают его как периодическую, сезонную смену ветров одного направления на противоположное или близкое к нему.

Наиболее четко муссоны проявляются над тропическими частями континентов и прилегающими к ним океанами и морями. Суть муссона примерно такая же, как и бризов, только масштабы явления как пространственный, так и временной, значительно больше.

Пространственный масштаб бриза измеряется сотнями метров или километрами, а муссона тысячами (иногда десятками тысяч) километров. Бриз меняет направление каждые 12 часов, муссон дует в одном направлении полгода, а затем меняет его на противоположное.

## **2 Прогноз направления ветра**

2.1 О ветре авиации нужно знать все: направление, скорость ветра, скорость отдельных порывов и скорость ветра при шквале.

Прогноз направления ветра дается специалистами в основном синоптическим методом. Это значит, что синоптик, оценив и спрогнозировав синоптическое положение в зоне ответственности, определяет преобладающее направление ветра.

В интересах авиации направление ветра указывается в десятках градусов. Это нужно для того, чтобы работники гражданской авиации смогли оценить встречную (попутную) и боковую составляющую скорости ветра. Дело в том, что для обеспечения безопасности при взлете и посадке самолетов есть ограничения как по боковому, так и по встречному/

попутному ветру.

На авиационных метеорологических станциях по фактическому ветру определяется боковая составляющая ветра. Обычно этот расчет производится в автоматизированных комплексах наблюдения за погодой. При отсутствии таких можно использовать график, представленный на Рис.13.

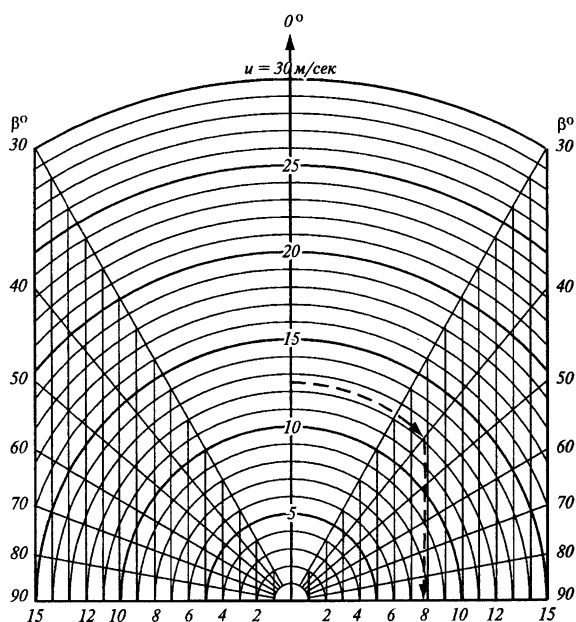


Рис. 13 — Номограмма для определения боковой составляющей ветра по скорости ветра  $U$  и углу между направлением ветра и направлением ВПП

Порядок определения боковой составляющей скорости ветра на Рис.13 показан стрелками. Так при скорости ветра 13 м/с и угле между направлением ветра и направлением ВПП в 40 градусов боковая составляющая скорости ветра равна 8 м/с.

Для нужд авиации необходимо иметь данные о направлении ветра на высотах.

Очень часто (практически всегда) при краткосрочных прогнозах погоды прогноз направления ветра на высотах заменяют его диагнозом. В принципе это допустимо и не дает больших ошибок. Вместе с тем крупные прогностические центры разрабатывают прогноз ветра на различных уровнях численными методами. Результаты этих расчетов оформляются в виде карт температуры и ветра и передаются всем потребителям, нуждающимся в этой

информации. Таким образом, в руках синоптика оказываются карты с прогнозом температуры, направления и скорости ветра на основных изобарических поверхностях (эшелонах полетов).

### 3 Прогноз скорости ветра у земли

Нет сомнения в том, что большинство потребителей интересуется только сильным ветром. Авиацию ветер начинает интересовать при скорости от 5 м/с.

Практически во всех регионах России для прогноза слабых ветров используется метод А. С. Зверева, который описан во всех учебниках по краткосрочным прогнозам погоды. На нем мы останавливаться не будем, а поговорим о некоторых методах прогноза сильного ветра.

*Прогноз максимального ветра при грозах по аэрологической диаграмме.*

Для прогноза максимального ветра при грозах по аэрологической диаграмме поступают следующим образом. От спрогнозированного значения максимальной температуры воздуха у земли (Рис. 14) нужно подняться сразу по влажной адиабате до уровня 600 гПа и на этом уровне следует определить величину  $\Delta T$ , равную разности между температурой на влажной адиабате и на кривой стратификации. Максимальная скорость ветра при этом определится выражением

$$U_{\text{макс.}} = 2\Delta T,$$

где:  $U_{\text{макс.}}$  — скорость ветра, м/с;  $\Delta T$  — разность в градусах.



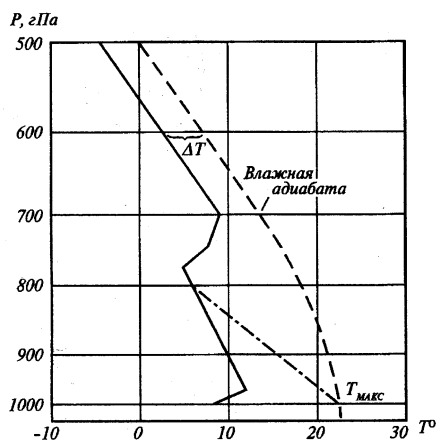


Рис. 14 — График для прогноза максимальных порывов ветра у земли при грозах

Б.Е. Песков и А.И. Снитковский предложили методику прогноза шквалов с заблаговременностью 3–6 часов при ожидаемом развитии кучево-дождевой облачности (а шквалы иначе и не бывают). На Рис. 15 представлен их график для прогноза шквала.

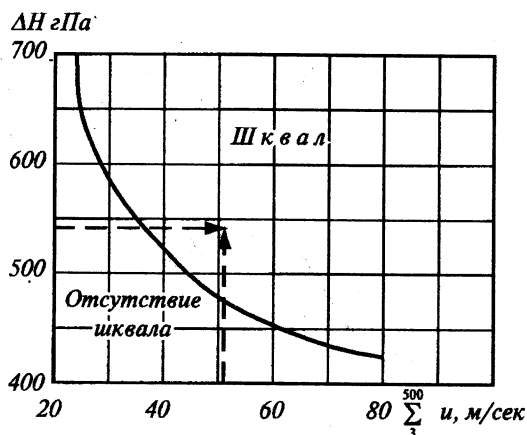


Рис. 15 — График для определения возможности возникновения шквала

На Рис. 15 по горизонтальной оси отложено суммарное значение скоростей ветра на уровне земли, 850, 700 и 500 гПа (м/с), а по вертикальной — вертикальная мощность кучево-дождевого облака, гПа.

Если по исходным данным точка попала в зону «шквал», то скорость ветра при шквале можно уточнить по графику, представленному на Рис. 16.

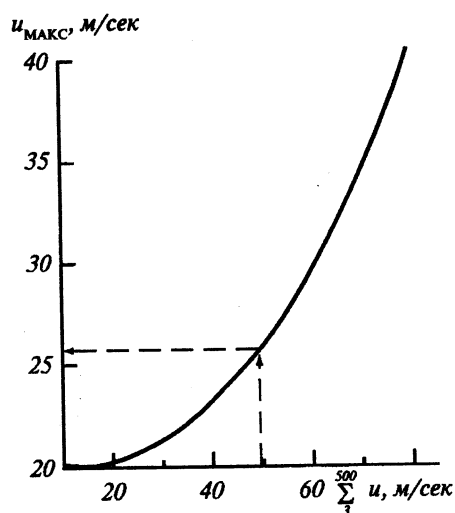


Рис. 16 — Определение максимальной скорости ветра при шквале по Б. Е. Пескову и А. И. Снитковскому

Скорости порывов ветра можно определить по полуэмпирической формуле

$$U_{пор.} = U_{ср.} + 0,5U_{ср.}$$

Коэффициент (в данном случае равный 0,5) определяется подбором для каждого пункта.

Прогноз ветра у земли по данным о ветре на уровне 850 гПа. Этот метод позволяет спрогнозировать скорость ветра у земли с заблаговременностью до суток. Для прогноза используется график, представленный на Рис. 17. Здесь по вертикальной оси отложена скорость ветра на уровне АТ-850, а по горизонтальной — ожидаемая скорость ветра у земли. Возможный интервал скоростей ветра у земли находится между наклонными кривыми на графике.

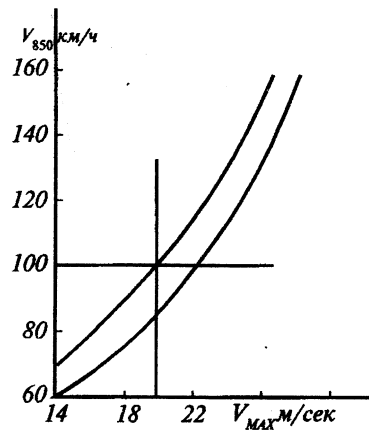


Рис. 17 — График для прогноза скорости ветра у земли по данным о ветре на уровне 850 гПа

#### 4. Прогноз ветра на высотах и струйных течениях

Очень часто синоптики заменяют прогноз ветра на высотах его диагнозом или используют прогностические карты прогноза ветра и температуры, которые разрабатываются в крупных прогностических центрах.

Еще одна проблема в практике метеорологического обеспечения авиации возникает при необходимости определить параметры струйного течения.

Известно, что за границу струйного течения принимается высота, на которой в свободной атмосфере (выше 5000 м) скорость ветра превышает 30 м/с, а специалистов гражданской авиации интересует не только высота оси струйного течения, но и максимальная скорость ветра на оси струи, а также толщина струйного течения, т.е. высота его нижней и верхней границ.

Все эти задачи позволяет решать метод Е. Рейтера. Е. Рейтер предложил по данным зондирования атмосферы в произвольном масштабе строить график, по горизонтальной оси которого откладывается скорость ветра, а по вертикальной — высота (Рис. 18).

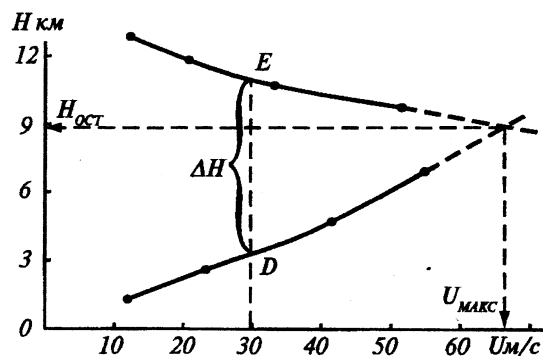


Рис. 18 — Определение параметров струйного течения по методу Е. Рейтера

И еще совершенно очевидное предположение Е. Рейтера: так как информация о направлении и скорости ветра в свободной атмосфере в распоряжении синоптика есть практически всегда только на основных изобарических поверхностях, то совершенно необязательно, чтобы уровень максимального ветра совпадал с этой поверхностью. Для определения всех параметров струйного течения Е. Рейтер предложил на график (Рис. 18) нанести точки, в которых есть информация о скорости ветра, и соединить эти точки отрезками прямых линий. Причем соединение точек производить как сверху, так и снизу до максимальных значений скорости ветра. Далее, продлив последние отрезки, проведенные сверху и снизу, до их пересечения, мы получим высоту оси струйного течения, максимальную скорость ветра на оси, а величина  $\Delta H$  укажет нам не только толщину струйного течения, но и нижнюю и верхнюю границу струи.

## 5 Прогноз сдвигов ветра

При пилотировании самолета в непосредственной близости от земной поверхности экипаж должен иметь информацию не только о скорости и направлении ветра, но и о возможных его резких изменениях вдоль траектории движения. Самолет пересекает самый нижний слой атмосферы в столь короткое время, что ограниченный запас высоты, скорости полета и приемистости двигателей не позволяют летчику своевременно парировать

неожиданное изменение ветра. Отсутствие информации о резком усилении или ослаблении ветра явилось в ряде случаев одной из главных причин летных происшествий.

Характеристикой пространственной изменчивости ветра является *сдвиг ветра* — изменение направления и/или скорости ветра в пространстве, включая восходящие и нисходящие воздушные потоки. Сильные сдвиги ветра относят к опасным для авиации явлениям погоды.

Сдвиг ветра определяется как векторная разность векторов ветра, измеренная в двух точках пространства, которая отражает изменение как скорости, так и направления ветра при перемещении от одной точки к другой. В зависимости от взаимного расположения рассматриваемых точек в пространстве различают или горизонтальный или вертикальный сдвиг ветра.

В районе аэродрома горизонтальный сдвиг ветра можно определить по результатам одновременного измерения ветра в различных точках аэродрома (у разных торцов ВПП, на метеоплощадке и в других точках, где установлены датчики ветра). Базовым расстоянием, для которого измеряются горизонтальные сдвиги ветра, является расстояние 600 м.

Вертикальный сдвиг ветра  $\beta$  характеризует изменение вектора ветра с высотой. Он может быть определен по формуле:

$$\beta = \frac{|\Delta U|}{\Delta Z},$$

где:  $\Delta U = |U_v - U_n|$  — модуль векторной разности векторов ветра на верхнем уровне  $U_v$  и нижнем уровне  $U_n$ , м/с;  $\Delta Z$  — толщина рассматриваемого слоя, м.

Следовательно, единицей измерения вертикального сдвига ветра является  $\text{с}^{-1}$

Однако для практических целей метеорологического обеспечения полетов значения  $\beta$  рассчитывают для слоя толщиной 30 м и указывают в м/с

на 30 м.

Иногда сдвиг ветра определяют в слое толщиной в 100 м, а в международных документах и зарубежной литературе встречаются и другие единицы скорости ветра при измерении сдвига ветра (узлы, фут/с, мили/ч и т.п.).

Влияние вертикального сдвига ветра на полет намного опаснее, чем горизонтального, поэтому практически все исследования до настоящего времени были посвящены изучению вертикальных сдвигов ветра.

При увеличении вдоль траектории ВС встречного ветра (или ослаблении попутного) воздушная скорость ВС возрастает и подъемная сила увеличивается, в то время как при ослаблении встречного ветра (или увеличении попутного) воздушная скорость убывает и подъемная сила уменьшается.



Рис. 19 — Схема посадки самолета при сдвиге ветра

Соответственно при увеличении воздушной скорости произойдет подъем, а при уменьшении — опускание ВС по отношению к расчетной траектории полета, что особенно опасно во время взлета и посадки ВС.

При взлете самолета наблюдается несколько иная картина. Летчик при наборе высоты попадает в зону более сильного встречного ветра. Это значит, что подъемная сила самолета с высотой увеличивается быстрее, траектория полета самолета оказывается выше расчетной, и при сильных сдвигах ветра самолет может попасть на закритические углы атаки. В свою очередь, это приводит к срыву потока, сваливанию самолета на крыло и возможности столкновения ВС с землей.

Если ветер с высотой по скорости не увеличивается, а уменьшается, то картина меняется на обратную.

По своей интенсивности сдвиги ветра подразделяются на слабые, умеренные, сильные и очень сильные. Критерии интенсивности сдвигов ветра приведены в Таблице 1.

Таблица 1

### Критерии интенсивности сдвигов ветра

<b>Интенсивность сдвига ветра (качественный термин)</b>	<b>Влияние на управление воздушным судном</b>	<b>Вертикальный сдвиг ветра, м/с на 30 м; горизонтальный сдвиг ветра, м/с на 600м</b>
Слабый	Незначительное	0 – 2
Умеренный	Значительное	2 – 4
Сильный	Существенные трудности	4 – 6
Очень сильный	Опасное	> 6

Повторяемость и значения вертикальных сдвигов ветра существенно зависят от периода осреднения данных о ветре и от толщины

рассматриваемого слоя, причем увеличение пространственно-временного масштаба осреднения приводит к занижению значений вертикального сдвига ветра.

В нижнем 30-метровом слое атмосферы повторяемость сильных и очень сильных сдвигов ветра невелика (около 3%), однако при наблюдениях на мачтах отмечались сдвиги ветра, превышающие 20 м/с на 30 м. Такие резкие изменения ветра, несомненно, представляют опасность для взлета самолета, посадки и полета на малых и предельно малых высотах. Если учесть, что масса основных современных самолетов гражданской авиации равна 50–200 т, то становится понятным, что такой самолет обладает значительной инерцией, которая препятствует быстрому изменению скорости его движения. Это значит, что попав в зону более сильного (слабого) ветра, самолет еще какое-то время будет лететь с той же скоростью, прежде чем она изменится после вмешательства летчика. Это время запаздывания реакции самолета на действия летчика и является опасным. Ведь при заходе на посадку у самолета «штатная» скорость снижения равна 5 м/с, а в горизонтальной плоскости в этом режиме за каждую секунду самолет пролетает около 70 м.

Влияние горизонтального сдвига ветра на полет самолета также опасно. Так в случае резкого усиления встречного ветра будет наблюдаться «подбрасывание» самолета, а при его ослаблении самолет будет «проваливаться».

Под действием сдвигов ветра самолет может испытывать эволюции не только в вертикальной плоскости, но и изменять направление движения.

Все это объясняет причину того, что сдвиг ветра относится к опасным для авиации атмосферным явлениям, информация о которых в оперативном порядке передается экипажам воздушных судов для обеспечения безопасности полетов.

На практике синоптик АМСГ использует для прогноза сдвигов ветра синоптический метод. Сдвиги ветра (умеренные или сильные) указываются в



прогнозе тогда, когда по синоптической обстановке в районе аэродрома ожидается или наблюдается:

- атмосферные фронты, особенно холодные фронты второго рода;
- зоны развития кучево-дождевой облачности;
- задерживающие слои (инверсия или изотермия);
- горные районы, в которых могут наблюдаться горно-долинные или стоковые ветры, а также фён;
- низкотропосферные струйные течения (мезоструи).

Все перечисленные явления могут приводить к возникновению сильных сдвигов ветра, и все эти моменты учитывает синоптик в своем прогнозе.

#### **Литература:**

1. Богаткин О.Г. Авиационные прогнозы погоды. – Изд. «БХВ-Петербург», СПб, 2010. – 284с.
2. Богаткин О.Г. Основы авиационной метеорологии. – СПб.: РГГМУ. 2009. – 338с.
3. Богаткин О.Г. Информационно-справочная книга авиационного метеоролога.– Изд. ООО «КРОМ», СПб, 2010. – 410 с.
4. Богаткин О.Г. Авиационная метеорология для летчиков. – Изд. ООО НПП «Техника связи», СПб, 2010. – 196 с.
5. Электронный ресурс:  
<https://www.meted.ucar.edu/tropical/synoptic/jetstreams/>