

**ГРАДИЕНТНЫЙ ВЕТЕР  
ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫЙ ВЕТЕР  
ИЗМЕНЕНИЕ ВЕТРА С ВЫСОТОЙ**

# ГРАДИЕНТНЫЙ ВЕТЕР

В случае криволинейных изобар возникает центробежная сила. Она всегда направлена в сторону выпуклости (от центра циклона или антициклона в сторону периферии).

Когда осуществляется равномерное горизонтальное движение воздуха без трения при криволинейных изобарах, то в горизонтальной плоскости уравниваются 3 силы: сила барического градиента  $G$ , сила вращения Земли  $K$  и центробежная сила  $C$ .

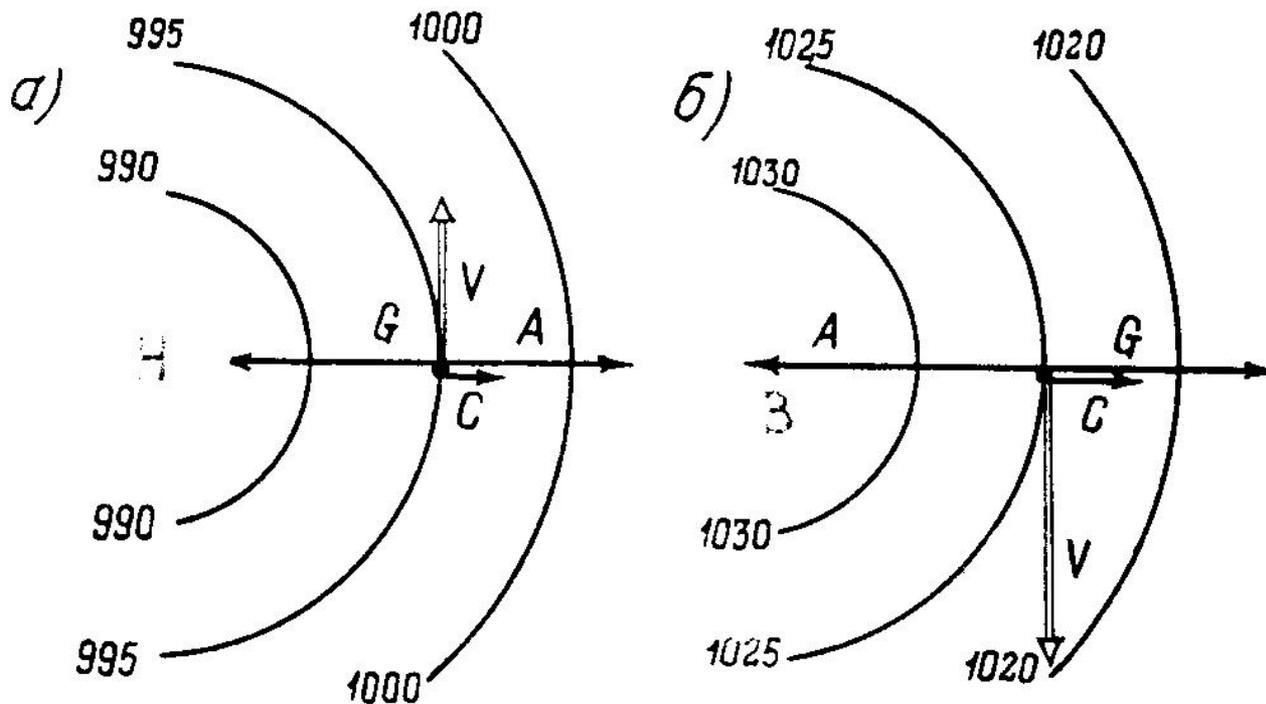
Такое равномерное установившееся горизонтальное движение воздуха при отсутствии трения по криволинейным траекториям называется **градиентным ветром**.

Вектор градиентного ветра направлен **по касательной к изобаре под прямым углом вправо** в северном полушарии (влево – в южном) относительно вектора силы барического градиента.

Поэтому в циклоне – вихрь против часовой стрелки, а в антициклоне – по часовой стрелке в северном полушарии.

**Взаимное расположение действующих сил в случае  
градиентного ветра: а) циклон, б) антициклон.**

**А** – сила Кориолиса (в формулах она обозначена *K*)



Рассмотрим влияние радиуса кривизны  $r$  на скорость градиентного ветра. При большом радиусе кривизны ( $r > 500$  км) кривизна изобар ( $1/r$ ) очень мала, близка к нулю. Радиус кривизны прямой прямолинейной изобары  $r \rightarrow \infty$  и ветер будет геострофическим. Геострофический ветер – частный случай градиентного ветра (при  $C = 0$ ).

При небольшом радиусе кривизны ( $r < 500$  км) в циклоне и антициклоне при круговых изобарах скорость градиентного ветра определяется следующими уравнениями:

В циклоне уравниваются силы  $G = K + C$ :  $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = lV_{gr} + \frac{V_{gr}^2}{r}$

или  $lV_{gr} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} - \frac{V_{gr}^2}{r}$

В антициклоне  $K = G + C$ :  $lV_{gr} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{V_{gr}^2}{r}$

Поэтому в циклоне:  $V_{gr} = \frac{1}{\rho l} \frac{\partial p}{\partial r} - \frac{1}{l} \frac{V_{gr}^2}{r}$  или  $V_{gr} = V_g - \frac{V_{gr}^2}{lr}$

В антициклоне:  $V_{gr} = -\frac{1}{\rho l} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{l} \frac{V_{gr}^2}{r}$  или  $V_{gr} = V_g + \frac{V_{gr}^2}{lr}$

То есть  $V_{gr} = V_g \pm \frac{V_{gr}^2}{lr}$

В центре циклона и антициклона горизонтальный барический  
градиент

равен нулю, т.е.  $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial r} = 0$

Значит,  $G = 0$  как источник движения. Следовательно,  $V_{gr} = 0$ .

Градиентный ветер является приближением к действительному ветру в свободной атмосфере циклона и антициклона.

Скорость градиентного ветра может быть получена при решении квадратного уравнения

- в циклоне: 
$$V_{gr} = -\frac{lr}{2} + \sqrt{\frac{l^2 r^2}{4} + \frac{r}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}}$$

- в антициклоне: 
$$V_{gr} = \frac{lr}{2} - \sqrt{\frac{l^2 r^2}{4} + \frac{r}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}}$$

В медленно перемещающихся барических образованиях (скорость перемещения не более 40 км/ч) в средних широтах при большой кривизне изогипс ( $1/r \rightarrow \infty$  (малом радиусе кривизны  $r \leq 500$  км) на изобарической поверхности используют следующие соотношения между градиентным и геострофическим ветром:

При циклонической кривизне  $V_{gr} \approx 0, V_g$

При антициклонической кривизне  $V_{gr} \approx 1 V_g$

При большой кривизне изобар у поверхности Земли  $(1/r) \rightarrow \infty$   
(радиус кривизны  $r \leq 500$  км):

при циклонической кривизне  $V_{gr} \approx 0, V_g$

при антициклонической кривизне  $V_{gr} \approx 0, V_g$

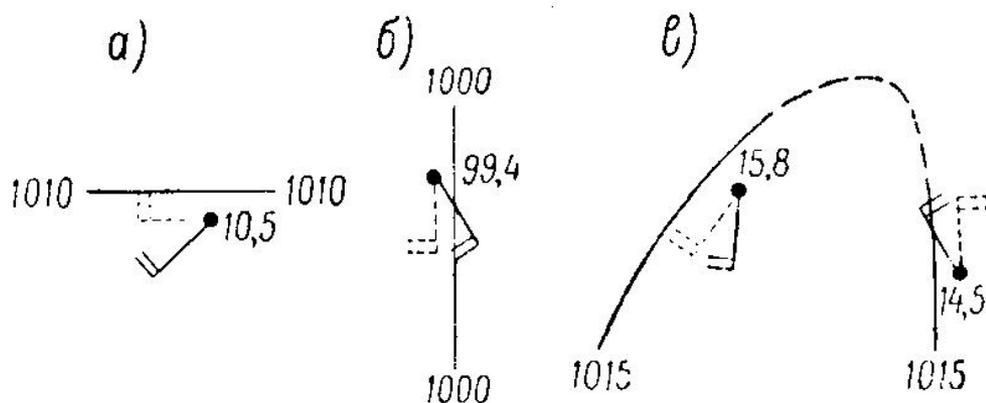
Геострофический ветер используется:

- при прямолинейных изогипсах и изобарах и
- при среднем радиусе кривизны  $500 \text{ км} < r < 1000 \text{ км}$ ,
- а также при большой кривизне изобар ( $r < 500$  км) в быстро перемещающихся барических образованиях.

# ЗАКОН ВЕТРА

Связь направления приземного ветра с направлением горизонтального барического градиента была сформулирована в 19 веке голландским ученым **Бейс-Балло** в виде правила (закона).

**ЗАКОН ВЕТРА: Если смотреть по направлению ветра, то низкое давление будет слева и несколько впереди, а высокое – справа и несколько позади (в северном полушарии).** При проведении изобар на синоптических картах учитывают направление ветра: направление изобары получают, повернув стрелку ветра вправо (по часовой стрелке) примерно на 30-45°.



# ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫЙ ВЕТЕР

Реальные движения воздуха не стационарны. Поэтому характеристики действительного ветра у земной поверхности отличаются от характеристик геострофического ветра.

Рассмотрим действительный ветер в виде двух слагаемых:

$$V = V_g + V'$$

$V'$  – агеострофическое отклонение

$$u = u_g + u' \quad \text{или} \quad u' = u - u_g$$

$$v = v_g + v' \quad \text{или} \quad v' = v - v_g$$

Запишем уравнения движения без учета силы трения:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + lv;$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - lu$$

Используем соотношение между горизонтальным градиентом давления и геопотенциалом

$$\frac{-\partial p}{\partial n} = -g\rho \frac{\partial H}{\partial n}$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -g\rho \frac{\partial H}{\partial x}$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -g\rho \frac{\partial H}{\partial y}$$

Подставим в уравнения движения:

$$\frac{du}{dt} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + lv;$$

$$\frac{dv}{dt} = -g \frac{\partial H}{\partial y} - lu$$

Поделим обе части уравнений на  $l$  и подставим в уравнение геострофического ветра. Получим:

$$\frac{1}{l} \frac{du}{dt} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + lv; \quad u = u_g - \frac{1}{l} \frac{\partial v}{\partial t}$$

$$\frac{1}{l} \frac{dv}{dt} = -g \frac{\partial H}{\partial y} - lu \quad v = v_g + \frac{1}{l} \frac{\partial u}{\partial t}$$

Агеострофические отклонения:

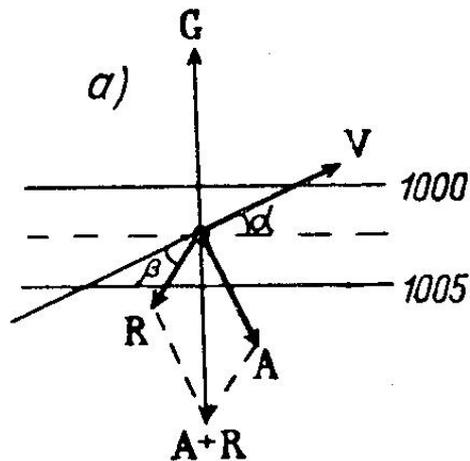
$$u' = -\frac{1}{l} \frac{\partial v}{\partial t}$$

$$v' = \frac{1}{l} \frac{\partial u}{\partial t}$$

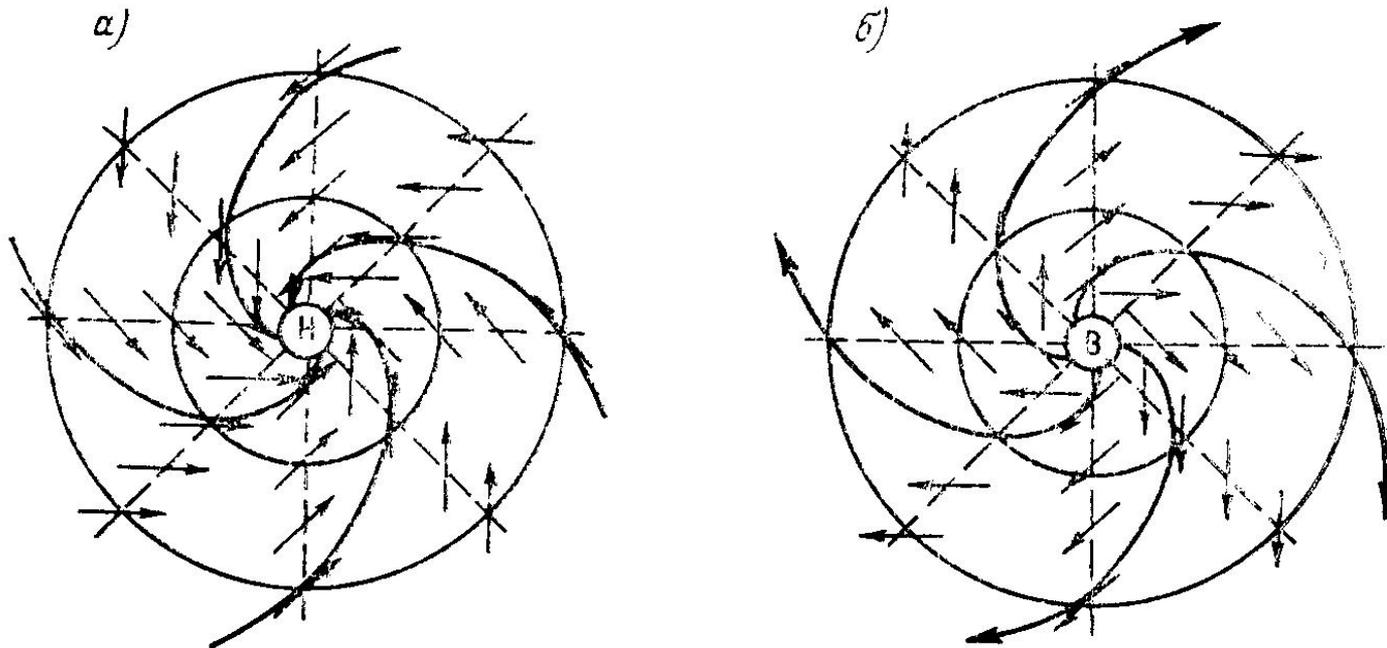
# ВЛИЯНИЕ СИЛЫ ТРЕНИЯ НА ВЕТЕР

Под влиянием трения скорость приземного ветра в среднем в два раза меньше скорости геострофического ветра, а направление его отклоняется от геострофического в сторону барического градиента. Таким образом, **действительный ветер отклоняется** у поверхности земли **от геострофического влево** в северном полушарии и **вправо** – в южном.

Взаимное расположение сил. Прямолинейные изобары



В циклоне под влиянием трения направление ветра отклоняется к центру циклона, в антициклоне – от центра антициклона к периферии.



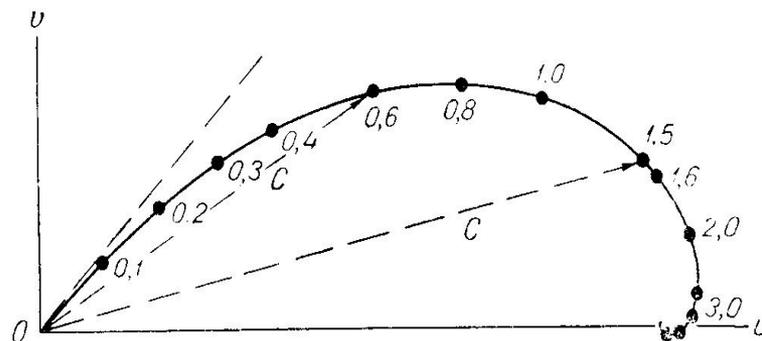
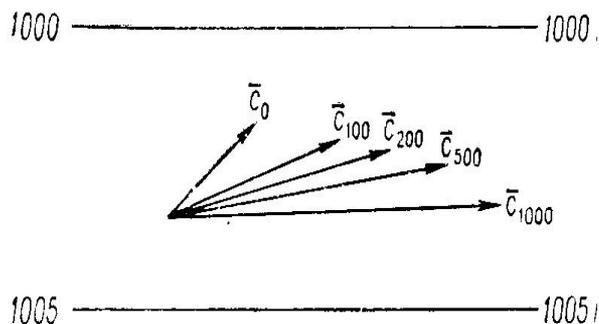
В связи с влиянием трения направление ветра в приземном слое отклонено от касательной к изобаре в сторону низкого давления в среднем примерно на угол  $30^\circ$  (над морем примерно на  $15^\circ$ , над сушей примерно на  $40-45^\circ$ ).

# ИЗМЕНЕНИЕ ВЕТРА С ВЫСОТОЙ

С высотой сила трения уменьшается. В пограничном слое атмосферы (слое трения) ветер с высотой приближается к геострофическому, который направлен по изобаре. Таким образом, с высотой ветер будет усиливаться и поворачивать вправо (в северном полушарии) до тех пор, пока не будет направлен по изобаре.

Изменение скорости и направления ветра с высотой в пограничном слое атмосферы (1-1,5 км) можно представить **годографом**.

Годограф – кривая, соединяющая концы векторов, изображающих ветер на разных высотах и проведенных из одной точки. Эта кривая представляет собой логарифмическую спираль, называемую спиралью Экмана.



# ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯ ВЕТРА

## ЛИНИИ ТОКА

Линия тока – линия, в каждой точке которой вектор скорости ветра направлен по касательной в данный момент времени.

Таким образом, они дают представление о структуре поля ветра в данный момент времени (мгновенное поле скоростей).

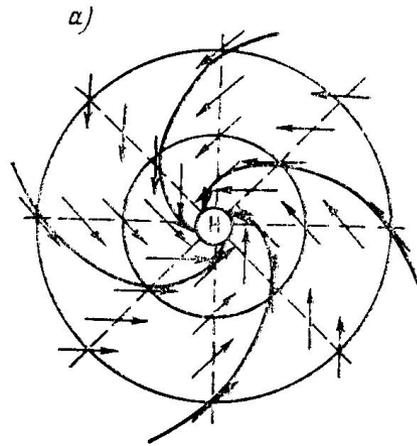
В условиях градиентного или геострофического ветра линии тока будут совпадать с изобарами (изогипсами).

Вектор скорости действительного ветра в пограничном слое не параллелен изобарам (изогипсам). Поэтому линии тока действительного ветра пересекают изобары (изогипсы).

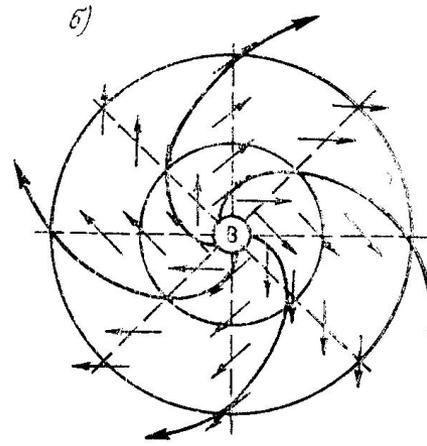
При проведении линий тока учитывают не только направление, но и скорость ветра: чем больше скорость, тем гуще располагаются линии тока.

# Примеры линий тока у поверхности Земли

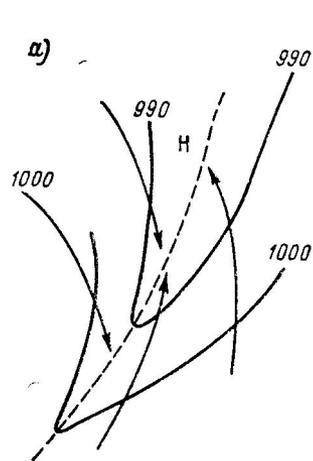
в приземном циклоне



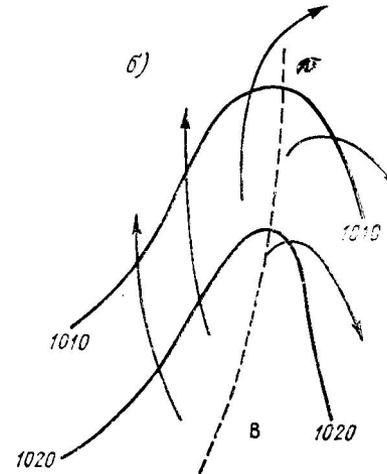
в приземном антициклоне



в ложбине

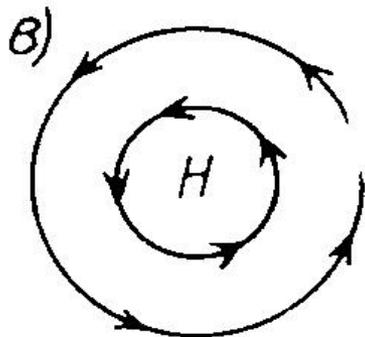


в гребне

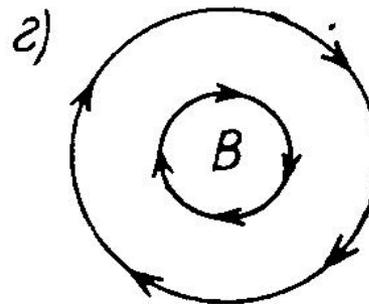


# Линии тока в свободной атмосфере

в циклоне



в антициклоне



# ТРАЕКТОРИИ ЧАСТИЦ ВОЗДУХА

Траектории частиц – пути индивидуальных воздушных частиц.

Т.е. траектория характеризует перемещение одной и той же частицы воздуха в последовательные моменты времени.

Траектории частиц можно приближенно рассчитать по последовательным синоптическим картам.

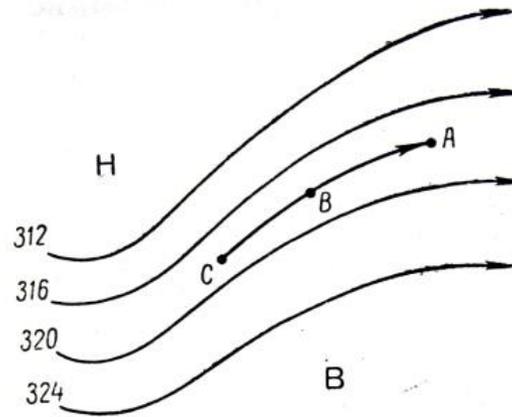
Метод траекторий в синоптической метеорологии позволяет решать две задачи:

- 1) определить, откуда переместится частица воздуха в данную точку за определенный промежуток времени;
- 2) определить, куда переместится частица воздуха из данной точки за определенный промежуток времени.

Траектории можно строить по картам АТ (чаще по АТ-700) и по приземным картам.

Используется графический способ расчета траектории с помощью градиентной линейки.

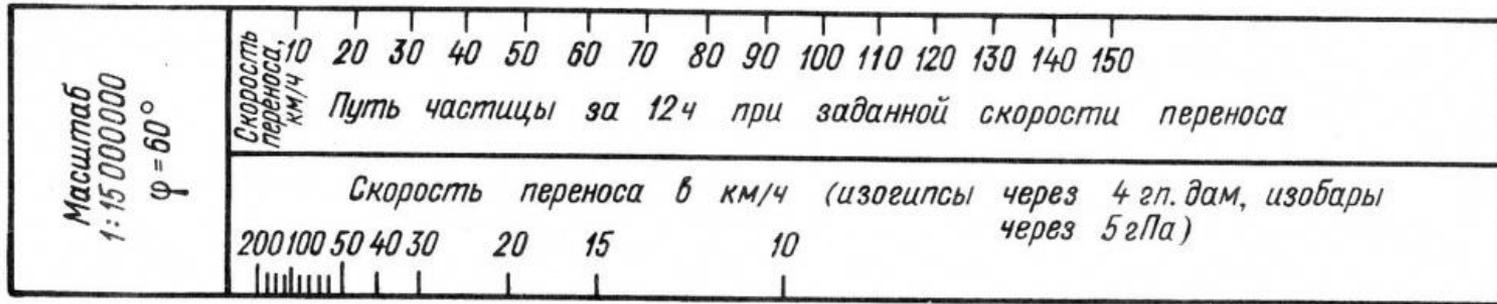
Пример построения траектории частицы воздуха (откуда переместится частица) по одной карте: А – пункт прогноза; В – середина пути частицы;  
С – начальная точка траектории



С помощью нижней части градиентной линейки по расстоянию между изогипсами определяют скорость геострофического ветра ( $V$ , км/ч).

Линейку прикладывают нижней шкалой ( $V$ , км/ч) по нормали к изогипсам примерно в середине пути. По шкале ( $V$ , км/ч) между двумя изогипсами (в точке пересечения со второй изогипсой) определяют среднюю скорость  $V_{\text{ср}}$ .

## Градиентная линейка для широты 60°



Далее определяют путь частицы за 12 ч ( $S_{12}$ ) при заданной скорости переноса. Он численно равен скорости переноса частицы  $V_{\text{ч}}$ .

Путь частицы за 24 ч равен  $S_{24} = 2 \cdot S_{12}$ ; путь частицы за 36 ч равен  $S_{36} = 3 \cdot S_{12}$ .

По верхней шкале линейки откладывают путь частицы от пункта прогноза в направлении, противоположном направлению изогипс, с учётом их изгиба.