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).

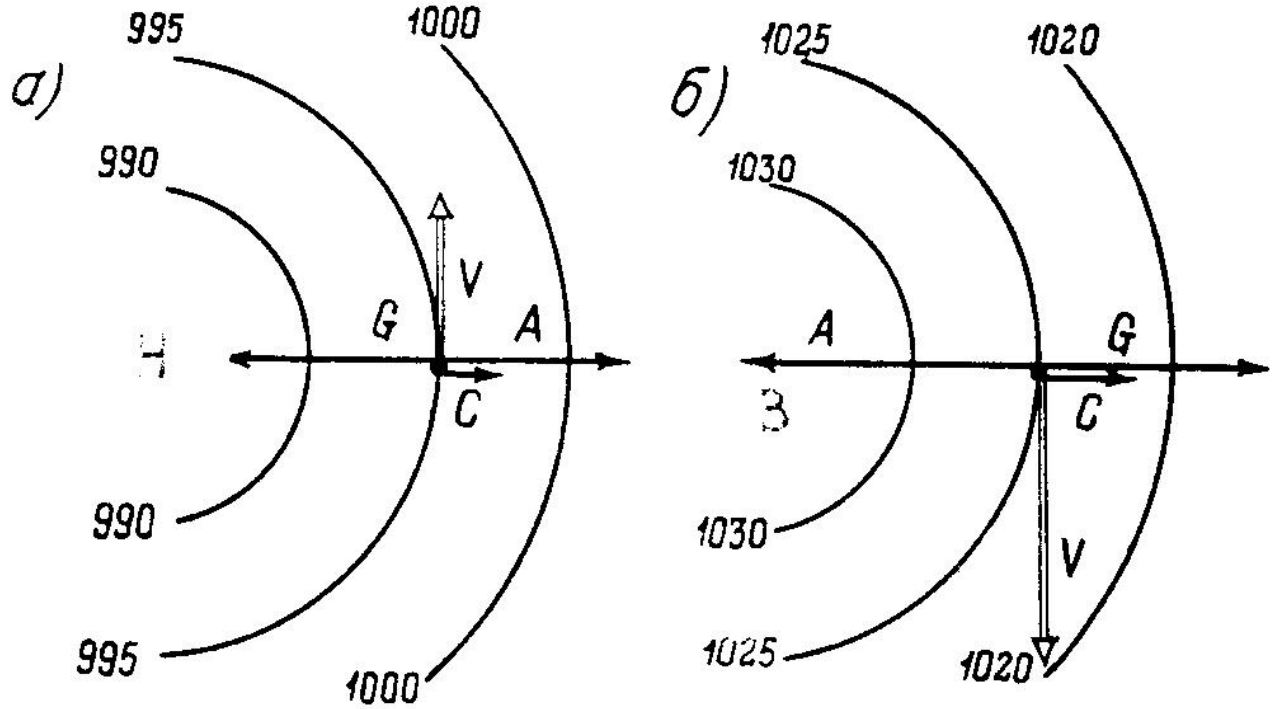
Когда осуществляется равномерное горизонтальное движение воздуха без трения при криволинейных изобарах, то в горизонтальной плоскости уравновешиваются 3 силы: сила барического градиента *G*, сила вращения Земли *K* и центробежная сила *C*.

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 ***К***)



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 $r \to \infty$ 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 уравновешиваются 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 $V_{gr} \approx 1V_g$

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 $V_{gr} \approx 0, V_g$

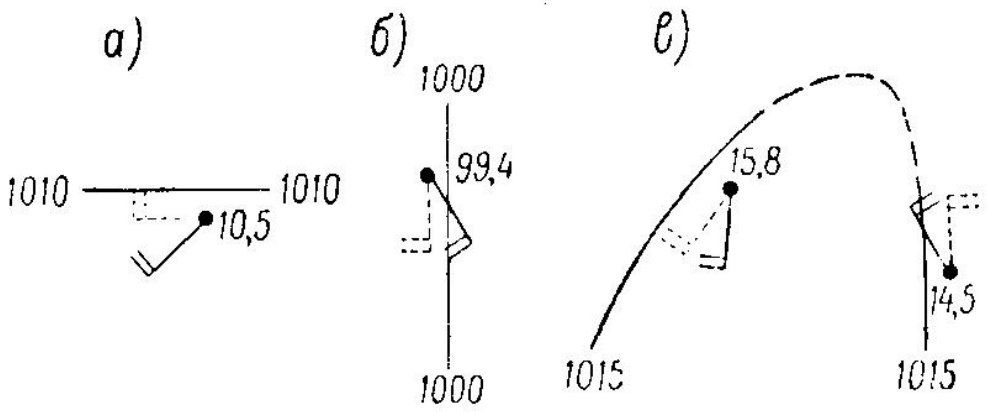
Геострофический ветер используется:

- при прямолинейных изогипсах и изобарах и
- при среднем радиусе кривизны 500 км $< r <$ 1000км,
- 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

$u = u_g + u'$ или $u' = u - u_g$

$v = v_g + v'$ или $v' = v - v_g$

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 геопоте

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

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

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

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:

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

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

Агеострофические отклонения:

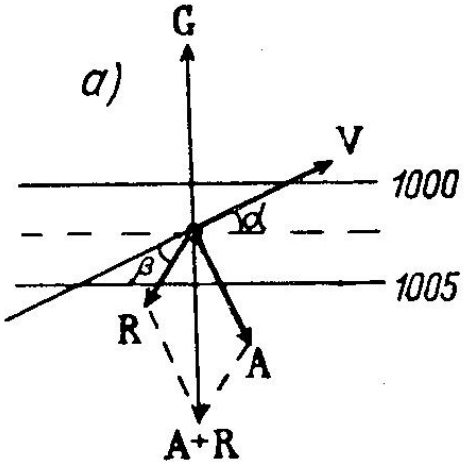
$$u' = -\frac{1}{l}\frac{\partial v}{\partial t}$$

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

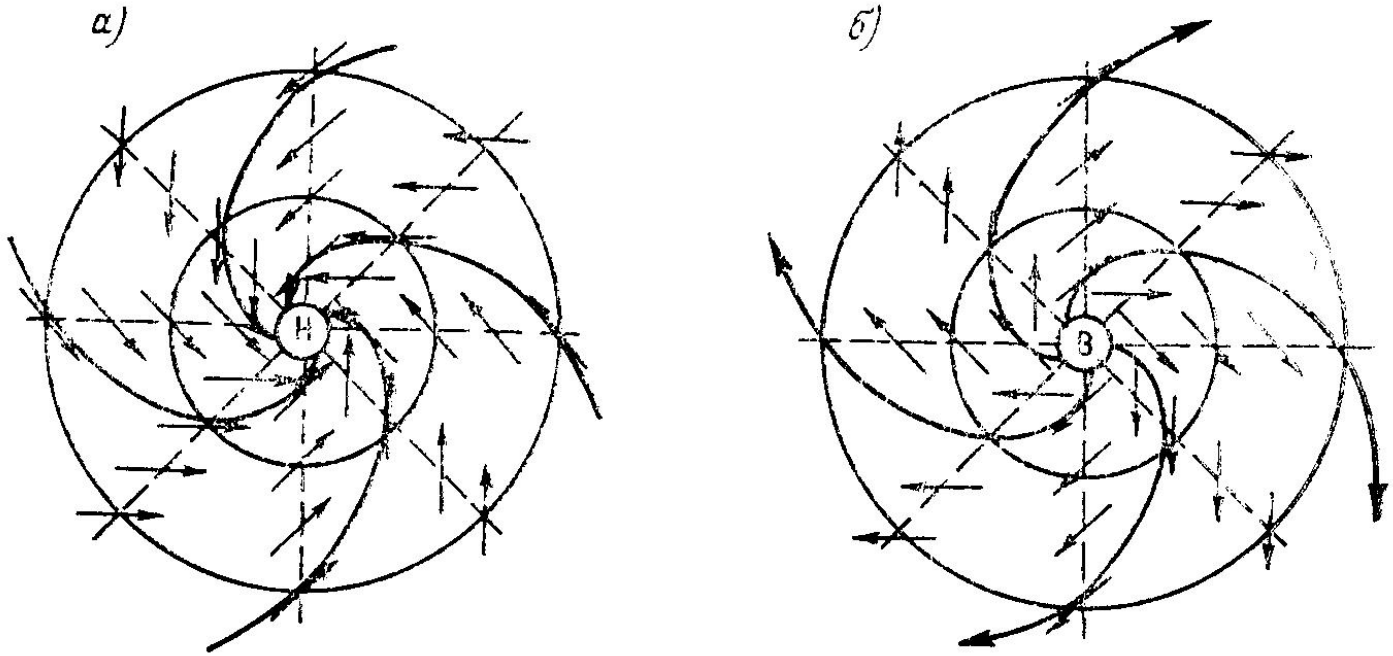
ВЛИЯНИЕ СИЛЫ ТРЕНИЯ НА ВЕТЕР

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.



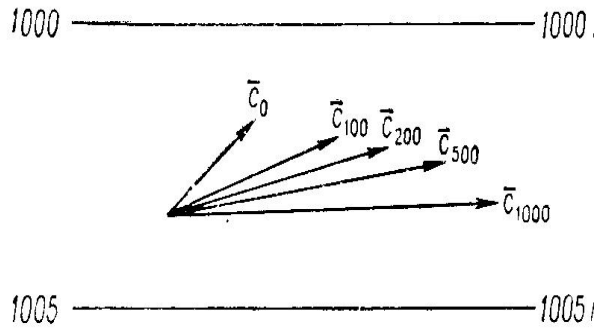
В связи с влиянием трения направление ветра в приземном слое отклонено от касательной к изобаре в сторону низкого давления в среднем примерно на угол 30° (над морем примерно на 15°, над сушей примерно на 40-45°).

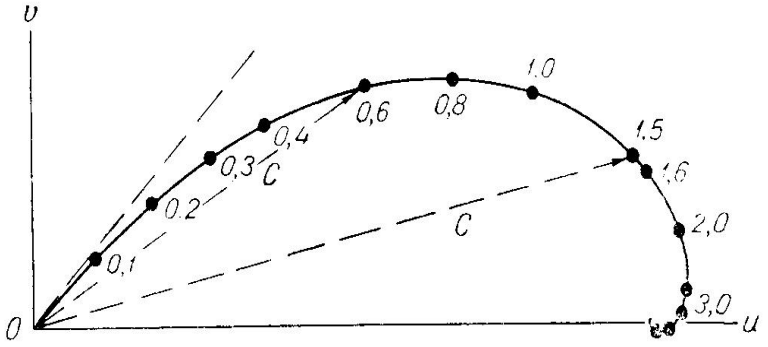
ИЗМЕНЕНИЕ ВЕТРА С ВЫСОТОЙ

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).

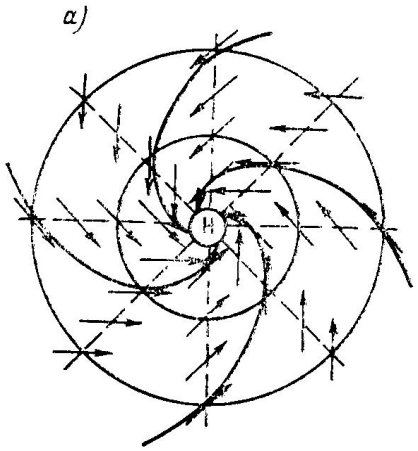
В условиях градиентного или геострофического ветра линии тока будут совпадать с изобарами (изогипсами).

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

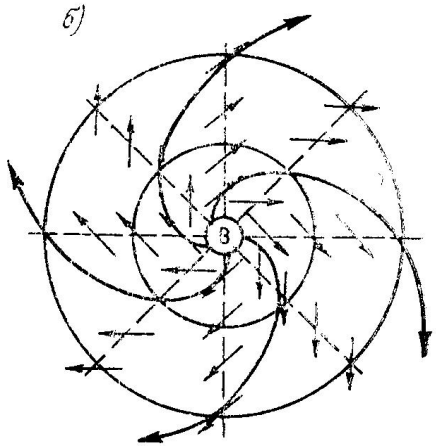
При проведении линий тока учитывают не только направление, но и скорость ветра: чем больше скорость, тем гуще располагаются линии тока.

Примеры линий тока у поверхности Земли

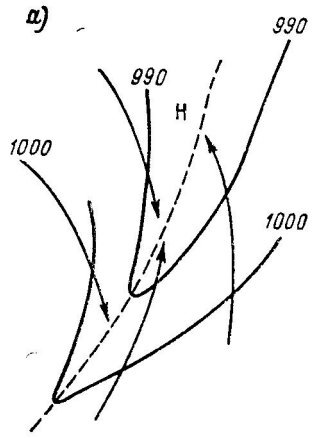
в приземном циклоне



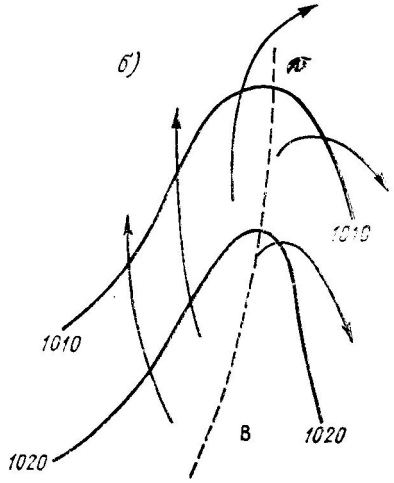
в приземном антициклоне



в ложбине

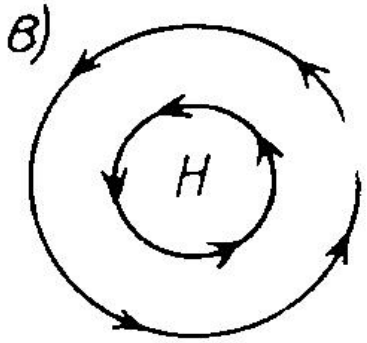


в гребне

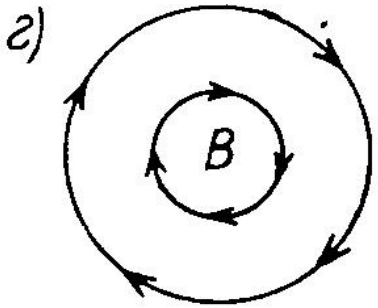


Линии тока в свободной атмосфере

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.

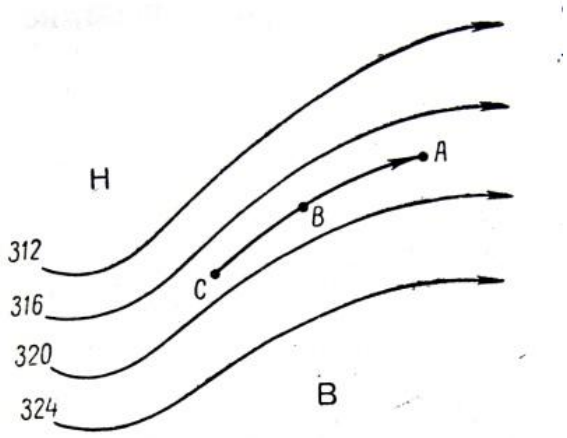
Метод траекторий в синоптической метеорологии позволяет решать две задачи:

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.

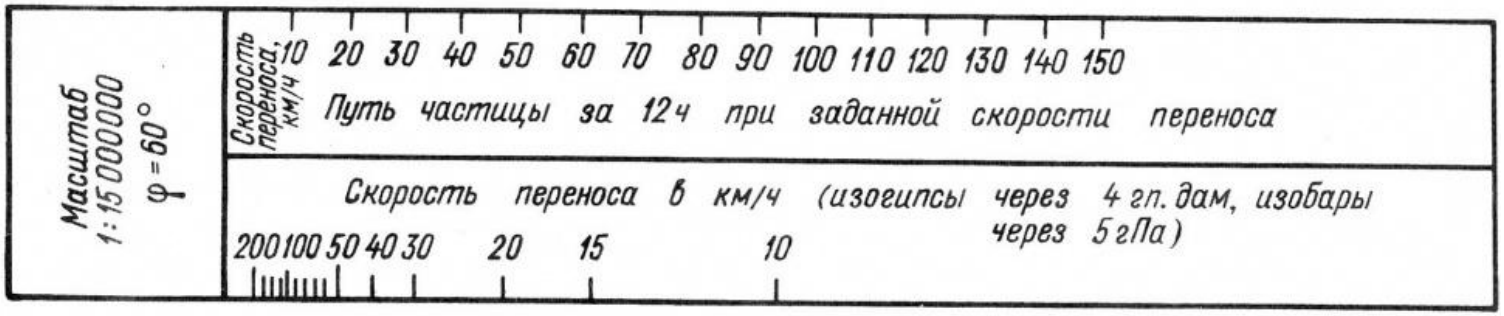
Пример построения траектории частицы воздуха (откуда переместится частица) по одной карте: А – пункт прогноза; В – середина пути частицы;
С – начальная точка траектории



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 $V_{ср}$.

Градиентная линейка для широты 60˚



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