

**Министерство образования и науки Российской Федерации
САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО**

Кафедра метеорологии и климатологии

Л.М. ФЕТИСОВА, Г.Ф. ИВАНОВА

**РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ ГРАДИЕНТНОЙ
ЛИНЕЙКИ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ДЛЯ ПРОГНОЗА ВЕТРА**

Учебно-методическое пособие по дисциплинам
«Синоптическая метеорология»,
«Специальные методы прогноза погоды»
для студентов, обучающихся по направлению
«Гидрометеорология»
и специальности «Метеорология»

Саратов -2011

Содержание

	Стр.
Введение	
1. Модель геострофического ветра	4
2. Модель градиентного ветра в циклонах и антициклонах.....	5
3. Расчет и построение градиентной линейки.....	9
4. Прогноз ветра в приземном слое.....	16
5. Прогноз ветра на высотах	21
Литература	23

Введение

А. М. Обухов доказал, что при несоответствии полей давления и ветра, вызванном местными возмущениями барического поля, происходит их взаимная адаптация, т.е. эти поля изменяются таким образом, чтобы соответствие между ними вновь было восстановлено. При этом особенно быстро изменяется поле давления, приспособляясь к полю ветра. Благодаря подобной адаптации в среднем в свободной атмосфере действительный ветер близок к геострофическому.

Если рассматривать поле ветра в определенный момент времени, то в свободной атмосфере и особенно в приземном слое выявляется его незначительная неоднородность.

В прогнозе ветра в приземном слое указываются: 1) направление ветра и 2) скорость или сила ветра. При порывистом ветре в приземном слое указывается максимальная скорость при порывах.

Направление ветра в общих прогнозах и для морского флота обычно предсказывается с точностью до четверти горизонта. Например, если предсказывается: «Ветер северо-западный», то это означает, что ожидается перемещение воздуха, в общем, с северо-запада на юго-восток.

Если на протяжении полусуток ожидается переход ветра к следующей четверти горизонта, то в прогнозе отмечается последовательное чередование направлений, например: «Ветер юго-восточный и южный» или «Ветер юго-западный, с переходом к концу дня на северо-западный».

При малых барических градиентах направление ветра может не соответствовать направлению изобар. На соседних станциях слабые ветры под влиянием местных условий могут иметь даже противоположные направления. В таких случаях (при скорости ветра до 3 м/с) разрешается в прогнозе указывать: «Ветер неустойчивый по направлению, слабый».

Для авиации направление ветра на высотах предсказывается) в градусах (восточный — 90° , южный — 180° , западный — 270° северный — 360° и т. д. с округлением до 10°).

Скорость ветра в общих и авиационных прогнозах для аэродрома указывается в м/с с допустимым интервалом 3 м/с при скорости менее 15 м/с и 5 м/с при большей скорости. Скорость ветра на высотах предсказывается в км/час с округлением до 10 км/ч. Для морского флота предсказывается сила ветра в баллах.

В синоптической практике прогноз ветра осуществляется на основе моделей геострофического и градиентного ветра с использованием градиентной линейки.

1. Модель геострофического ветра

Определение: Установившееся горизонтальное движение воздуха в прямолинейных и равноотстоящих изобарах под действием двух сил, силы барического градиента и силы Кориолиса при отсутствии силы трения называют геострофическим ветром, а скорость движения – скоростью геострофического ветра.

Под установившимся (стационарным) движением понимают движение воздуха, при котором в каждой точке пространства величина и направление средней скорости не меняются во времени, т.е. движение без ускорения $dV/dt=0$. Такое движение может быть только в случае, когда равнодействующая всех сил, действующих на воздух в данной точке, равна 0.

Рассмотрим установившееся движение воздуха при отсутствии силы трения при прямолинейных траекториях, т.е. ускорение $dV/dt=0$, сила трения $R=0$, центробежная сила $C=0$. Тогда движение воздуха будет вызываться силой барического градиента G , на которое оказывает воздействие отклоняющая сила вращения Земли A (сила Кориолиса). Эти две силы направлены противоположно и равны по величине. Но так как в северном полушарии сила Кориолиса всегда отклоняет движение вправо (в южном полушарии влево), то модуль геострофического ветра должен быть направлен вдоль изобар так, чтобы низкое давление оставалось слева (рис.1). Это барический закон ветра.

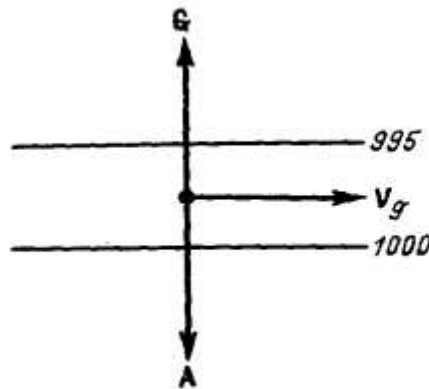


Рис. 1 Взаиморасположение действующих сил при геострофическом ветре в северном полушарии

Таким образом, имеем: $A=-G$ или численно:

$$2\omega \sin\varphi V = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial n}, \quad \text{откуда} \quad V_g = \frac{1}{\rho 2\omega \sin\varphi} \frac{\partial P}{\partial n},$$

где $\ell = 2\omega \sin\varphi$ (параметр Кориолиса), ρ - плотность воздуха, ω - угловая скорость вращения Земли. Обозначив $V=V_g$, для определения скорости геострофического ветра имеем формулу:

$$V_g = \frac{1}{\rho l} \frac{\partial P}{\partial n}.$$

Из формулы следует, что скорость геострофического ветра прямо пропорциональна градиенту давления, уменьшается с увеличением широты и возрастает с уменьшением плотности воздуха. Вблизи экватора ($\varphi=0$) понятие геострофического ветра теряет смысл.

Составляющие геострофического ветра V_g вдоль координатных осей x и y будут выражаться уравнениями:

$$u_g = -\frac{1}{\rho l} \frac{\partial P}{\partial y}; \quad v_g = \frac{1}{\rho l} \frac{\partial P}{\partial x}.$$

Заменяя градиент давления $\frac{\partial P}{\partial n}$ и его составляющие по осям координат $\frac{\partial P}{\partial x}$ и $\frac{\partial P}{\partial y}$ значениями градиента геопотенциальных высот H изобарической поверхности, на уровне которой определяется геострофический ветер, получим:

$$V_g = \frac{9,8}{l} \frac{\partial H}{\partial n}; \quad u_g = -\frac{9,8}{l} \frac{\partial H}{\partial y}; \quad v_g = \frac{9,8}{l} \frac{\partial H}{\partial x}.$$

Скорость геострофического ветра является функцией барического градиента, который тем больше, чем круче наклон изобарических поверхностей к горизонту (угол β). Поэтому имеется однозначная связь между скоростью геострофического ветра и наклоном изобарической

поверхности: $v_g = \frac{g}{l} \operatorname{tg} \beta$.

2. Модель градиентного ветра в циклонах и антициклонах

Определение: Установившееся горизонтальное движение при криволинейных траекториях, обусловленное действием 3-х сил: силы барического градиента G , силы Кориолиса A и центробежной силы C без учета силы трения называется градиентным ветром. Иногда такой ветер при круговых траекториях называют «геоциклострофическим ветром».

При градиентном ветре существует равновесие 3-х сил, и векторное уравнение движения имеет вид: $G+A+C=0$.

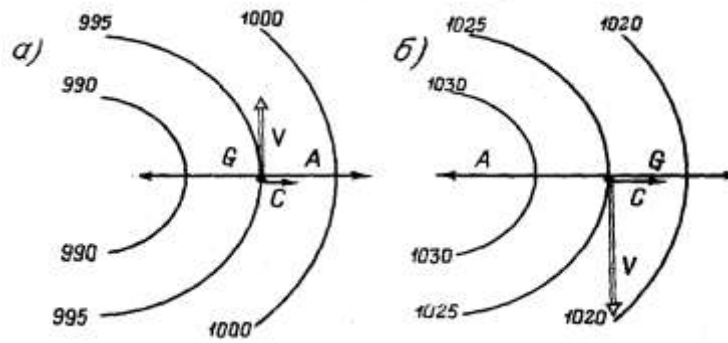


Рис. 2 Взаимное расположение действующих сил в случае градиентного ветра
а) циклон, б) антициклон

На движущуюся частицу действуют три силы: 1) сила барического градиент, модуль которой $G = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial n}$; 2) сила Кориолиса с модулем $A = \ell V_{gr}$, ($\ell = 2\omega \sin \varphi$ - параметр Кориолиса) и центробежная сила C с модулем $C = \frac{V_{gr}^2}{r}$. Мысленно проведем из центров низкого и высокого давления к движущейся точке вектор (r), за положительное направление которого возьмем его направление от центра барического образования на периферию.

Модули всех трех сил (G , A и C) в движущейся точке будут действовать по радиусу-вектору (r) и иметь знаки плюс или минус в зависимости от своей направленности относительно вектора r . Это позволяет достаточно просто определить знаки модулей главных сил G и A .

Рассмотрим действующие силы в циклоне и антициклоне. Равновесие действующих сил достигается при следующем расположении их в циклоне (рис. 2а) и в антициклоне (рис. 2б). Сила барического градиента G всегда направлена по радиусу кривизны изобар (изогипс) в сторону низкого давления. Сила Кориолиса A всегда направлена в противоположную сторону от силы барического градиента. Центробежная сила C всегда направлена от центра барического образования к периферии. При этом вектор градиентного ветра направлен по касательной к изобаре (изогипсе) под прямым углом и всегда вправо в северном полушарии относительно вектора силы барического градиента. Таким образом, сила Кориолиса A направлена под прямым углом к вектору скорости V_{gr} и всегда отклонена вправо от него в северном полушарии. Поэтому вектор градиентной скорости V_{gr} направлен по касательной к изобаре (изогипсе) в циклоне против часовой стрелке, а в антициклоне по часовой стрелке (в северном полушарии).

Соотношение сил в циклоне дает следующее выражение: $-G + A + C = 0$. Все силы рассматриваются в предположении, что масса частицы $m = 1$. Подставляя в это уравнение значение модуля каждой силы, получим:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial n} + \ell V_{gr} + \frac{V_{gr}^2}{r} = 0. \quad (*)$$

Умножив каждый член уравнения (*) на величину r , получим квадратное уравнение:

$$V_{gr}^2 + (\ell r)V_{gr} - \frac{r}{\rho} \frac{\partial P}{\partial n} = 0,$$

где $\frac{\partial P}{\partial n}$ - модуль горизонтального барического градиента давления вдоль радиуса (r). Решение квадратного уравнения имеет следующий вид:

$$V_{gr} = -\frac{\ell r}{2} + \sqrt{\left[\frac{(\ell r)^2}{4} + \frac{r}{\rho} \frac{\partial P}{\partial n} \right]} = -\frac{\ell r}{2} + \sqrt{\frac{(\ell r)^2}{4} + \ell r V_g}.$$

Настоящая формула есть выражение для модуля скорости ветра в циклоне для модели градиентного ветра, т.е. ветра в круговых изобарах циклонической кривизны при отсутствии силы трения. Перед корнем нужно оставить знак плюс, так как при $V_g=0$ $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ и $V_{gr}=0$.

Аналогично для антициклона (рис.2б). Соотношение действующих сил в антициклоне: $-\mathbf{A}+\mathbf{G}+\mathbf{C}=\mathbf{0}$ (**), что соответствует:

$$-\ell V_{gr} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial n} + \frac{V_{gr}^2}{r} = 0 \quad (**)$$

Умножив каждый член уравнения (**) на величину r , получим квадратное уравнение:

$$V_{gr}^2 - (\ell r)V_{gr} + \frac{r}{\rho} \frac{\partial P}{\partial n} = 0,$$

Решение настоящего квадратного уравнения имеет следующий вид:

$$V_{gr} = +\frac{\ell r}{2} - \sqrt{\left[\frac{(\ell r)^2}{4} - \frac{r}{\rho} \frac{\partial P}{\partial n} \right]} = \frac{\ell r}{2} - \sqrt{\frac{(\ell r)^2}{4} - \ell r V_g}. \quad (***)$$

Перед корнем надо оставить знак «минус», так как при $V_g=0$ и $V_{gr}=0$. Последнее уравнение представляет собой выражение модуля скорости ветра в антициклоне для модели градиентного ветра, т.е. ветра в круговых изобарах антициклонической кривизны при отсутствии силы трения.

Разделив уравнение (*) и (**) на ℓ с учетом $V_g = \frac{1}{\rho \ell} \frac{\partial P}{\partial n}$ получим:

$$\text{для циклона: } V_{gr} = Vg - \frac{V_{gr}^2}{\ell r} \quad \text{или} \quad \frac{V_{gr}}{Vg} = 1 - \frac{V_{gr}^2}{Vg \ell r};$$

$$\text{для антициклона: } V_{gr} = Vg + \frac{V_{gr}^2}{\ell r} \quad \text{или} \quad \frac{V_{gr}}{Vg} = 1 + \frac{V_{gr}^2}{Vg \ell r}.$$

Для малых значений геострофической скорости эти формулы упрощают, полагая $V_g = V_{gr}$ и сокращая их во втором члене. В результате получаем:

$$\text{для циклона} \quad V_{gr} = Vg \left(1 - \frac{V_g}{\ell r}\right)$$

$$\text{для антициклона} \quad V_{gr} = Vg \left(1 + \frac{V_g}{\ell r}\right).$$

Для двух последних формул получим отношения V_{gr}/V_g :

$$\frac{V_{gr}}{V_g} = K = 1 \pm \frac{V_g}{\ell r}.$$

Здесь знак «+» для антициклона и знак «-» для циклона.

Таким образом, можно сделать основные выводы:

1. Величина отношения V_{gr}/V_g с уменьшением радиуса циклонической кривизны изогипс уменьшается, а с уменьшением радиуса антициклонической кривизны увеличивается.

2. В центре циклона и антициклона, где $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ скорость градиентного ветра равна 0. При удалении от центра скорость ветра возрастает.

3. В каждой точке циклона вектор скорости градиентного ветра направлен по касательной к изобаре (низкое давление слева), а линия тока и траектория совпадают с изобарами, и соответствует вращению ветра против часовой стрелки. В антициклоне линии тока и траектории направлены также по изобарам, но соответствуют вращению ветра по часовой стрелке (низкое давление также слева).

4. Скорость градиентного ветра в циклоне при одинаковых градиентах давления меньше скорости геострофического ветра, а в антициклоне, наоборот, больше. Это значит, что циклоническая кривизна изобар уменьшает скорость ветра, а антициклоническая – увеличивает.

5. Скорость ветра в циклоне не ограничивается. В антициклоне, исходя из формулы (***), подкоренное выражение должно быть положительным или равно 0, Следовательно, скорость в антициклоне может быть равна или меньше возможного максимального значения: $V_{gr} \leq 1/2 r \ell$.

Это означает, что в антициклоне не может быть барических градиентов выше предельного значения: $\frac{\partial P}{\partial n} \leq \frac{1}{4} \rho r \ell^2$.

6. При криволинейных изогипсах градиентный ветер дает лучшее приближение к действительному ветру, чем геострофический ветер.

7. Если изобары (изогипсы) прямолинейны, геострофический ветер является частным случаем градиентного ветра.

3. Расчет и построение градиентной линейки

Скорость ветра на прогностических картах определяется с помощью градиентной линейки. Эта линейка дает скорость геострофического ветра. Формулы геострофического ветра по полю давления (1) и геопотенциала (2) являются исходными уравнениями, на основе которых можно получить рабочие формулы для построения градиентной линейки.

$$V_g = \frac{1}{\rho \ell} \frac{\partial P}{\partial n} \quad (1) \qquad V_g = \frac{9,8}{\ell} \frac{\partial H}{\partial n} \quad (2)$$

Для этого в формулы (1) и (2) подставим все известные постоянные величины: плотность воздуха $\rho = 1,27 \text{ кг/м}^3$, параметр Кориолиса $\ell = 2\omega \sin\varphi$, угловую скорость вращения Земли $\omega = 7,3 * 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, а производные заменим конечными разностями. Таким образом, получим рабочие формулы для расчета скорости геострофического ветра в м/с и км/час при известных значениях градиента давления в гПа/100 км и геопотенциала в гп. дам/100 км для любых широт φ :

$$V_g = \frac{1}{1,27 \text{ кг/м}^3 * 2 * 7,3 \sin\varphi * 10^{-5} \text{ с}^{-1}} \frac{\Delta P}{\Delta n} \frac{\text{гПа}}{100 \text{ км}} \quad (3')$$

Перепишем уравнение (3'), заменив $1 \text{ гПа} = 100 \text{ Па} = 100 \text{ кг м/с}^2 \text{ м}^2$; $100 \text{ км} = 10^5 \text{ м}$:

$$V_g = \frac{100 \text{ кг м/с}^2 \text{ м}^2}{1,27 \text{ кг/м}^3 * 14,6 \sin\varphi * 10^{-5} \text{ с}^{-1} * 10^5 \text{ м}} \frac{\Delta P}{\Delta n} = \frac{5,4}{\sin\varphi} \frac{\Delta P}{\Delta n} \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Таким образом, получена следующая рабочая формула (3):

$$V_g = \frac{5,4}{\sin\varphi} \frac{\Delta P}{\Delta n} \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (3)$$

Аналогично проделаем для формулы (2) геострофического ветра по полю геопотенциала:

$$V_g = \frac{9,8}{\ell} \frac{\partial H}{\partial n}, \text{ сделав в ней следующую замену: } H \text{ гп. дам} = 10 \text{ гп.м} = 10 \text{ м}^2/\text{с}^2.$$

$$V_g = \frac{9,8 * 10 \text{ м}^2 / \text{с}^2}{14,6 * 10^{-5} \text{ Sin}\varphi * \text{с}^{-1} 10^5 \text{ м}} \frac{\Delta H}{\Delta n} \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$V_g = \frac{6,7}{\text{Sin}\varphi} \frac{\Delta H}{\Delta n} \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (4)$$

В формулах (3) и (4) Δn - расстояние между соседними изобарами или изогипсами в сантиметрах карты масштаба $M 1:10^7$, т.е. в 1 см на карте содержится 100 км на поверхности Земли.

Для карты масштаба $M 1:1,5 * 10^7$ формулы будут выглядеть следующим образом:

$$V_g = \frac{5,4}{\text{Sin}\varphi} \frac{\Delta P}{1,5 \Delta n} = \frac{3,6}{\text{Sin}\varphi} \frac{\Delta P}{\Delta n} \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (5)$$

$$V_g = \frac{6,7}{\text{Sin}\varphi} \frac{\Delta H}{1,5 \Delta n} = \frac{4,5}{\text{Sin}\varphi} \frac{\Delta H}{\Delta n} \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (6)$$

Для карты масштаба $M 1: 3 * 10^7$ эти формулы будут выглядеть так:

$$V_g = \frac{5,4}{\text{Sin}\varphi} \frac{\Delta P}{3 \Delta n} = \frac{1,8}{\text{Sin}\varphi} \frac{\Delta P}{\Delta n} \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (7)$$

$$V_g = \frac{6,7}{\text{Sin}\varphi} \frac{\Delta H}{3 \Delta n} = \frac{2,2}{\text{Sin}\varphi} \frac{\Delta H}{\Delta n} \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (8)$$

Таким же образом можно получить рабочие формулы для расчета геострофической скорости на картах любого масштаба. Для этого необходимо коэффициенты 5,4 или 6,7 в формулах (3) и (4) разделить на число, равное количеству сотен км в 1 см карты того или иного масштаба.

Формулы для расчета скорости ветра в км/час можно получить путем умножения коэффициента в соответствующей формуле на 3,6, так как

$$1 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 1 \frac{10^{-3} \text{ км}}{1/3600 \text{ час}} = 1 \frac{3600 \text{ км}}{1000 \text{ час}} = 3,6 \frac{\text{км}}{\text{час}}.$$

Таким образом, рабочие формулы для расчета геострофической скорости в км/час для карт М 1: 10⁷ получают из формул (3) и (4) и выглядят следующим образом (формулы (9) и (10)):

$$V_g = \frac{5,4 * 3,6 \Delta P \text{ км}}{\text{Sin}\varphi \Delta n \text{ час}}$$

$$V_g = \frac{19,4 \Delta P \text{ км}}{\text{Sin}\varphi \Delta n \text{ час}} \quad (9)$$

$$V_g = \frac{6,7 * 3,6 \Delta H \text{ м}}{\text{Sin}\varphi \Delta n \text{ с}}$$

$$V_g = \frac{24,1 \Delta H \text{ км}}{\text{Sin}\varphi \Delta n \text{ час}} \cdot \quad (10)$$

Для карт масштаба М 1:1,5 * 10⁷, исходя из формул (5) и (6), получим следующие рабочие формулы (11) и (12):

$$V_g = \frac{3,6 * 3,6 \Delta P \text{ км}}{\text{Sin}\varphi \Delta n \text{ час}}$$

$$V_g = \frac{12,96 \Delta P \text{ км}}{\text{Sin}\varphi \Delta n \text{ час}} \quad (11)$$

$$V_g = \frac{4,5 * 3,6 \Delta H \text{ км}}{\text{Sin}\varphi \Delta n \text{ час}}$$

$$V_g = \frac{16,2 \Delta H \text{ км}}{\text{Sin}\varphi \Delta n \text{ час}} \cdot \quad (12)$$

Расчет градиентной линейки производится по рабочим формулам, которые получены для $\frac{\Delta P}{\Delta n}$ в гПа/ 100км и для $\frac{\Delta H}{\Delta n}$ в гп. дам/100 км.

По этим формулам можно построить градиентные линейки для карт погоды любого масштаба. Получим формулы для расчета градиентной линейки для синоптической карты масштаба М 1: 1,5 * 10⁷. Для этого формулы (5), (6) для скорости геострофического ветра в м/с, и (11), (12) для скорости в км/час решим относительно Δn :

$$\Delta n = \frac{3,6\Delta P}{V_g \sin\varphi} \quad (13)$$

$$\Delta n = \frac{4,5\Delta H}{V_g \sin\varphi} \quad (14)$$

Изобары проводятся на синоптических картах через 5 гПа, а изогипсы на картах абсолютной топографии через 4 гп. дам, поэтому в формулу (13) надо подставить $\Delta P=5$ гПа, а в формулу (14) $\Delta H=4$ гп. дам.

Δn по формулам (13) и (14) выражается в см карты $M 1: 1,5 \cdot 10^7$.

Геострофический ветер прямо пропорционален барическому градиенту или градиенту геопотенциала. А градиент давления зависит от расстояния между соседними изобарами или изогипсами и от вида проекции, в которой построена карта. Поэтому в формулах (13) и (14) должен учитываться масштабный множитель m , который равен отношению расстояния между двумя пунктами на карте к реальному расстоянию между этими пунктами на поверхности сферической Земли.

При использовании карт, составленных в стереографической проекции, этот множитель зависит от широты следующим образом:

$$m = \frac{1 + \sin 60^\circ}{1 + \sin\varphi} = 0,933 \left(1 + \frac{r^2}{r_0^2}\right),$$

где r - расстояние на бланке карты от полюса до рассматриваемой точки на широте φ , а r_0 - расстояние на том же бланке от полюса до экватора.

Подставим в формулы (13) и (14) $\Delta P=5$ гПа и $\Delta H=4$ гп. дам и масштабный множитель m , получим значение Δn в см карты масштаба $M 1:1,5 \cdot 10^7$:

для приземной карты

$$\Delta n = \frac{3,6 * 5 * m}{V_g \sin\varphi} = \frac{18m}{V_g \sin\varphi} \quad (15)$$

для карт абсолютной топографии

$$\Delta n = \frac{4,5 * 4 * m}{V_g \sin\varphi} = \frac{18m}{V_g \sin\varphi}.$$

Таким образом, из формул (15) видно, что формулы для расчета градиентной линейки для приземной карты и карты барической топографии одинаковые, поэтому и линейка для этих карт нужна одна. Другими словами изогипсы на карте барической топографии, проведенные через 4 гп. дам соответствуют изобарам, проведенным через 5 гПа на ближайшей поверхности уровня высотой z .

Теперь преобразуем формулы (11) и (12), рассчитанные для V_g в км/час, относительно Δn , подставив $\Delta P=5$ гПа и $\Delta H=4$ гп. дам и масштабный множитель m :

$$\Delta n = \frac{12,96 * 5 * m}{v_g \sin \varphi} = \frac{64,8m}{v_g \sin \varphi} \quad (16)$$

$$\Delta n = \frac{16,2 * 4 * m}{v_g \sin \varphi} = \frac{64,8m}{v_g \sin \varphi}$$

В формулах (15) скорость геострофического ветра V_g задается в м/с от 5 до 50 м/с, а в формулах (16) V_g задается в км/час от 10 до 200 км/час. В соответствии с этими заданными значениями скоростей рассчитываются соответствующие расстояния Δn , между соседними изобарами (изогипсами), которые используются для построения градиентных линеек.

В табл. 1 и табл. 2 представлены результаты расчета градиентных линеек для карт масштаба $M 1:1,5 * 10^7$. В табл. 1 представлены расчеты Δn для скоростей градиентного ветра V_g в м/с, а в табл. 2 для V_g в км/час.

Таблиц 1 Расчет градиентной линейки (V_g м/с) с учетом стереографической проекции для карт масштаба $M 1: 1,5 * 10^7$ (по формуле 15)

φ	V_g , м/с										m
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
70	3,68	1,85	1,23	0,88	0,74	0,62	0,53	0,44	0,41	0,37	0,962
60	4,16	2,08	1,39	1,04	0,83	0,70	0,59	0,52	0,46	0,42	1,000
50	5,00	2,48	1,66	1,25	0,99	0,84	0,71	0,62	0,55	0,50	1,057
40	6,38	3,18	2,12	1,59	1,27	1,07	0,91	0,80	0,70	0,64	1,136

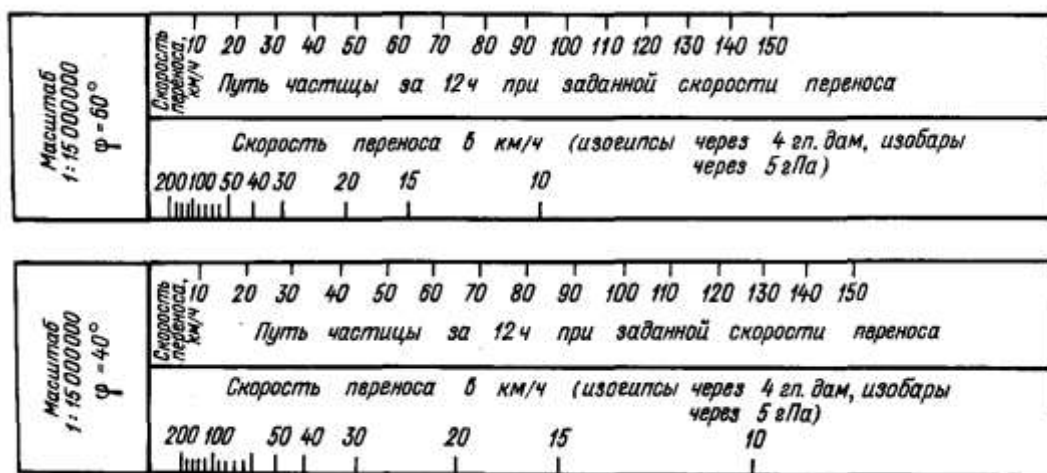


Рис. 3 Градиентные линейки для определения скорости ветра V_g в км/час для широты 40^0 и 60^0

Таблиц 2 Расчет градиентной линейки (V_g км/час) с учетом стереографической проекции для карт масштаба $M 1: 1,5 * 10^7$ (по формуле 16)

φ	V_g , км/час														
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
70	6,64	3,32	2,21	1,65	1,33	1,11	0,95	0,83	0,74	0,66	0,55	0,47	0,41	0,37	0,33
60	7,48	3,74	2,49	1,87	1,50	1,25	1,07	0,94	0,83	0,75	0,62	0,53	0,47	0,42	0,37
50	8,94	4,47	2,98	2,24	1,79	1,49	1,28	1,12	0,99	0,90	0,75	0,63	0,56	0,50	0,44
40	11,45	5,73	3,82	2,86	2,29	1,91	1,64	1,43	1,27	1,15	0,95	0,82	0,72	0,64	0,57

Градиентную линейку (рис.3) строят следующим образом: по оси абсцисс откладывают Δn - расстояния между соседними изогипсами или изобарами, полученные для заданных скоростей, а по оси ординат – широты. В гидрометеослужбе используются градиентные линейки для двух широт – 60^0 и 40^0 , на которую еще нанесен путь частицы за 12 часов.

Путь частицы за 12 часов для карты масштаба $M 1: 1,5 \cdot 10^7$ рассчитывается по формулам (17) и (18):

$$S = \frac{V_g \cdot 3,6 \cdot 12m}{150} \quad (17), \quad \text{где } S \text{ в см карты, а } V_g \text{ в м/с,}$$

$$S = \frac{V_g \cdot 12m}{150} \quad (18), \quad \text{где } S \text{ в см карты, а } V_g \text{ в км/час.}$$

Градиентную линейку необходимо выполнять на прозрачной и изгибающейся пленке. При измерении геострофической скорости ветра необходимо ось y на линейке направить по касательной к одной изобаре (изогипсе), а с деления, проходящего через вторую изолинию, надо снимать скорость ветра. При этом ось x выставляют перпендикулярно изолиниям, так чтобы пункт прогноза находился между двумя изобарами.

Таблица 3. Путь частицы (в см карты) за 12 часов для карт $M 1:1,5 \cdot 10^7$ при скорости ветра V_g в м/с

φ	V_g , м/с									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
70	2,77	4,16	5,54	6,93	8,31	9,70	11,08	12,47	13,85	
60	2,88	4,32	5,76	7,20	8,64	10,08	11,52	12,96	14,40	
50	3,04	4,57	6,09	7,61	9,13	10,65	12,18	13,70	15,22	
40	3,27	4,91	6,54	8,18	9,82	11,45	13,09	14,72	16,36	

Результаты расчета пути движения частицы за 12 часов представлены в табл. 3, где скорость ветра V_g в м/с и в табл. 4, где скорость ветра V_g в км/час.

Таблица 4. Путь частицы (в см карты) за 12 часов для карт $M 1:1,5 \cdot 10^7$

при скорости ветра V_g в км/час

φ	V_g , км/час														
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
70	0,76	1,54	2,31	3,07	3,80	4,62	5,39	6,16	6,93	7,60	9,24	10,77	12,31	13,85	15,40
60	0,80	1,60	2,40	3,20	4,00	4,80	5,60	6,40	7,20	8,00	9,60	11,20	12,80	14,40	16,00
50	0,85	1,69	2,54	3,38	4,23	5,07	5,92	6,76	7,61	8,46	10,15	11,84	13,53	15,22	16,91
40	0,91	1,82	2,73	3,64	4,54	5,45	6,36	7,27	8,18	9,09	10,91	12,72	14,54	16,36	18,18

Чтобы определить поправку к геострофической скорости на кривизну изобар (изогипс) необходимо определить радиус кривизны изобар или изогипс. Он определяется с помощью лекала, которое представляет собой сочетание сопряженных дуг α , описанных радиусами различной длины. Исходные данные для построения номограммы (лекала) для определения радиуса кривизны по картам, представлены в табл. 5.

Таблица 5. Исходные данные для расчета номограммы для определения радиуса кривизны изолиний

R, км	3000	2500	2000	1500	1000	800	600	400	200
α , град.	10	12	15	20	50	30	30	45	80
R, см карты M 1:1,5*10 ⁷	20	16,7	13,3	10	6,7	5,3	4,0	2,7	1,3

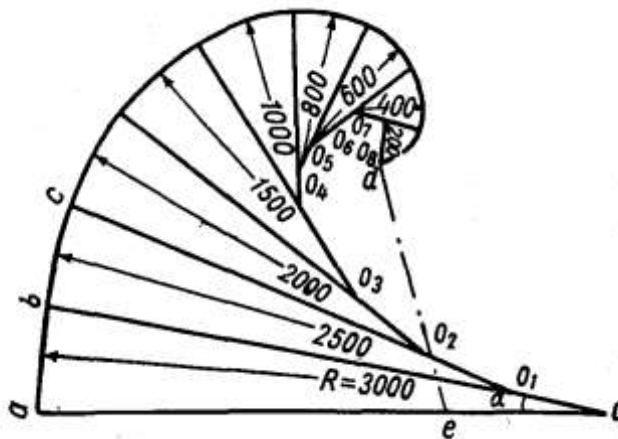


Рис. 4 Номограмма для определения радиуса кривизны изогипс (траекторий)

Номограмма (рис.4) строится следующим образом. Из точки O проводится радиус Oa и описывается дуга ab радиусом 3000 км на карте определенного масштаба. При этом угол α отсчитывается с помощью транспортира и проводится радиус Ob.

От точки b на радиусе Ob откладывается отрезок bO_1 , соответствующий расстоянию 2500 км, и из точки O_1 радиусом O_1b описывается вторая дуга bc , сопряженная с дугой ab . Аналогично проводятся построения до радиуса 200 км и точки d .

Построив номограмму на плотной бумаге или на другом материале, ее нужно вырезать точно по профилю кривой. Для измерения кривизны траектории огибающая дуга $abcd$ прикладывается к искривленной изобаре или изогипсе, и в области дуги, наибольшей частью соприкасающейся с изолинией, определяется соответствующая величина радиуса кривизны.

4. Прогноз ветра в приземном слое

В краткосрочных прогнозах погоды общего пользования указываются наиболее вероятные градации осредненных за некоторый момент времени скорости и направления ветра на уровне флюгера. Направление ветра в прогнозах общего пользования и для морских акваторий указывается в четвертях горизонта, на высотах (в авиационных прогнозах) - в десятках градусов через 1 км. Скорость ветра в прогнозах общего пользования дается в м/с в интервале до 5 м/с, а в авиационных прогнозах - одним наиболее вероятным значением.

Если ожидаются кратковременные усиления ветра до значений, соответствующих опасному явлению (ОЯ) и более, то в формулировке прогноза указывается, что он будет порывистым, причем максимальная скорость ветра (градация) дается при порывах.

Прогноз средних скоростей и направления ветра в суточном прогнозе погоды (на ночь и на день) в первом приближении в данном районе или пункте составляют на основании прогноза поля давления - направления и густоты изобар. Для прогноза ветра учитывают:

- 1) изменение барического градиента (его увеличение или уменьшение сопровождается соответственно усилением или ослаблением ветра);
- 2) изменение термодинамической устойчивости воздушной массы в приземном слое (с возрастанием неустойчивости воздушной массы ветер в приземном слое усиливается, а его направление приближается к направлению геострофического ветра);
- 3) усиление ветра при прохождении атмосферного фронта;
- 4) суточный ход ветра (усиление днем, ослабление ночью; чем больше неустойчивость воздушной массы и суточный ход температуры воздуха, тем больше суточный ход скорости ветра);
- 5) влияние трения и других условий (трение ослабляет ветер; в сужениях рельефа, при гравитационном стоке и при других условиях ветер усиливается);
- 6) кривизну траекторий движения воздуха (циклоническая способствует ослаблению ветра, антициклоническая - усилению);

7) отклонение ветра от изобар под углом, близким к прямому (отклонение в сторону низкого давления способствует усилению ветра, отклонение в сторону высокого давления - его ослаблению).

Прогноз ветра базируется на прогнозе градиента давления, на основании которого рассчитывается скорость геострофического ветра. Рассчитанная скорость геострофического ветра принимается как первое приближение реального ветра. Согласно методике, предложенной Е.П. Веселовым, для прогноза скорости ветра у поверхности земли на 24 ч можно использовать формулу вида:

$$V = V_1 + \Delta V_{кр.} + \Delta V_{фр.} + \Delta V_{н.с} + \Delta V_{обм} + \Delta V_{кв.} \quad (19)$$

Первое слагаемое (V_1) в правой части представляет основную слагающую скорости ветра. Она зависит от градиента давления и некоторых физико-географических условий. Другие слагаемые представляют собой следующие поправки: $\Delta V_{кр}$ - на кривизну изобар, $\Delta V_{фр}$ - на влияние атмосферных фронтов, $\Delta V_{н.с}$ - на нестационарность в поле давления, $\Delta V_{обм}$ - на межуровневый обмен количеством движения и $\Delta V_{кв}$ - на влияние нисходящих конвективных движений.

Барический градиент $\frac{\Delta P_0}{\Delta n}$ (в гПа/300 км) измеряется в данном пункте по разности давления в двух точках по нормали к изобаре (по 150 км в каждую сторону от выбранного пункта). Если окажется, что изобары сильно меняются и по потоку, и по нормали, то градиент давления при выбранном $\Delta n = 300$ км (шаг 150 км) следует определить с помощью формулы:

$$\frac{\Delta P_0}{\Delta n} = \sqrt{\left(\frac{P_1 - P_3}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{P_2 - P_4}{\Delta y}\right)^2} \quad (20)$$

Палетка устанавливается таким образом, чтобы ось x была направлена вдоль изобар.

С помощью графика (рис. 5) определяется величина V_1 . На рисунке цифрами обозначены зависимости скорости ветра при следующих физико-географических условиях: 1- равнина, низкие берега, 2 - невысокие (20 - 30 м) берега заливов, рек; 3- долины равнинной реки или в направлении их расширения; длинные узкие заливы с большой шероховатостью (сильная изрезанность берегов, шхеры и т.д.); 4 - высокие берега (100 - 200 м), изрезанные речными долинами; 5- мысы, высокие острова, ветер на станциях, возвышающихся над морем на 50 - 100 м, когда суша остается справа от потока воздуха; 6- ветер с моря (или с равнины) на станциях, имеющих превышение 50 - 200 м и более.; 7 - открытая часть моря.

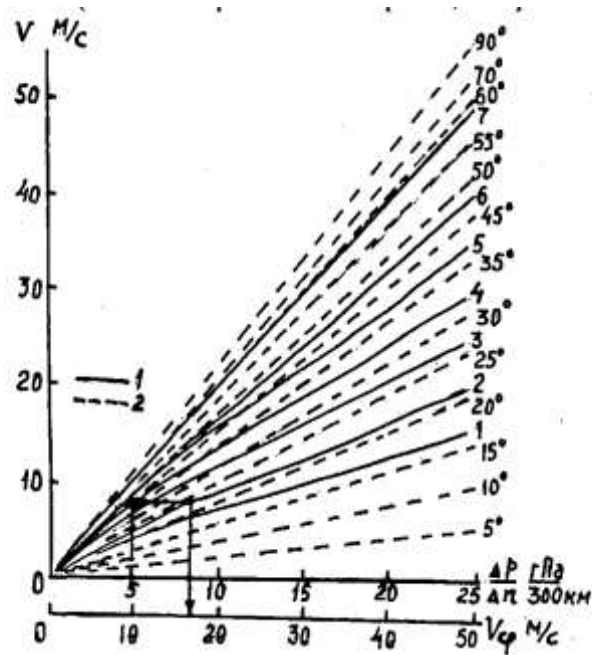


Рис. 5 График для расчета скорости приземного ветра при различных физико-географических условиях (1) и широтах (2)

Первые две составляющие в формуле (19) представляют градиентный ветер, что также позволяет рассчитать V_1 , а затем и поправку на кривизну изобар $\Delta V_{кр}$:

$$V_{gr} = k(k_1 \frac{\Delta p_0}{\Delta n} \pm \Delta V_{кр}) = V_1 \pm \Delta V_{кр} , \quad (21)$$

где $k=V_\phi/V_g$, V_ϕ - фактическая скорость, k_1 - коэффициент, связанный с выбором единицы измерения градиента давления (гПа/300 км). В зависимости от широты местами k_1 имеет следующие значения (табл. 6).

Таблица 6 Значение коэффициента k_1

ϕ°	70-65	65-60	60-55	55-50	50-45	45-40	40-35
k_1	1,9	2,0	2,1	2,2	2,4	2,6	3,0

Поправку на кривизну изобар следует выбирать на основании данных табл. 7 (при циклонической кривизне эта поправка отрицательная, при антициклонической - положительная).

Сопоставление скорости фактического и рассчитанного ветра показало, что второе слагаемое в формуле (24) оказывает меньшее влияние на фактический ветер. Поэтому при небольших градиентах давления и

циклонической кривизне изобар можно использовать формулу:

$$V_{gr} = kk_1 \frac{\Delta p_0}{\Delta n}.$$

Таблица 7 Поправка $\Delta V_{кр}$ к скорости ветра (м/с) на кривизну изобар (по Е.П. Веселову)

$\frac{\Delta P_0}{\Delta n}$, в гПа/300 км	φ^0		φ^0	
	90-55	55-35	90-55	55-35
	При циклонической кривизне изобар		При антициклонической кривизне изобар	
0-5	0,0-0,5	0,0-0,6	0,0-1,5	0,0-1,9
5-10	0,5-1,0	0,6-1,2	1,5-3,0	1,9-3,8
10-15	1,0-1,5	1,2-1,8	3,0-4,5	3,8-5,7
15-20	1,5-2,0	1,8-2,4	4,5-6,0	5,7-7,6
20-25	2,0-2,5	2,4-3,0	6,0-7,5	7,6-9,5
25-30	2,5-3,0	3,0-3,6	7,5-9,0	9,5-11,4

Поправка на влияние атмосферного фронта $\Delta V_{фр}$ составляет 2 м/с. Для теплого фронта $\Delta V_{фр} = 2$ м/с учитывается при его юго-западном смещении, а для холодных фронтов - при любых направлениях перемещения.

Поправка на нестационарность барического поля $\Delta V_{н.с}$ вводится в тех случаях, когда ожидается быстрое перемещение и значительное углубление циклона. При этом угол между направлениями изобар и ветра приближается к 90°. Такие ситуации отмечаются на периферии антициклона при интенсивном росте давления. Например, при развитии антициклона, перемещающегося на Европейскую территорию России со стороны Таймыра. Поправка $\Delta V_{н.с}$ имеет следующие значения:

$\frac{\Delta P_0}{\Delta n}$, в гПа/300 км	1-10	11-12	13-14	15	16-17	18-19	20	21-22	23-24	25
$\Delta V_{н.с}$, м/с	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5

Вводится поправка $\Delta V_{обм}$ на межуровенный обмен количеством движения, когда ожидается неустойчивое состояние атмосферы от поверхности земли до уровня конвекции. Возможно сухо-адиабатическое распределение температуры ($\gamma=1^\circ\text{C}/100\text{м}$) до верхней границы распространения сухоадиабатического градиента.

Величина $\Delta V_{обм}$ рассчитывается по формуле

$$\Delta V_{обм} = 0,6(V_{\text{макс}} - V_0),$$

Где $V_0 = V_1 + \Delta V_{кр.} + \Delta V_{фр.} + \Delta V_{н.с.}$; $V_{макс}$ - фактическая максимальная скорость ветра в исходный срок по данным зондирования или на основании данных карт барической топографии.

Поправка на влияние конвективных нисходящих движения $\Delta V_{кв.}$ вводится при наличии или возможном развитии мощной кучево-дождевой облачности. Она рассчитывается по формуле:

$$\Delta V_{кв} = \frac{w_k v \cos \varphi}{1.8 \frac{\Delta P_0}{\Delta n}}, \quad (22)$$

где w_k - средняя скорость вертикальных конвективных движений в кучево-дождевом облаке, м/с; $v = v_1 + v_{кр}$ - скорость градиентного ветра.

Значение средней скорости вертикальных конвективных движений определяется по номограмме (рис. 6). Значительное усиление ветра возможно за холодным фронтом, особенно на тех участках, где отмечаются большие изаллобарические градиенты.

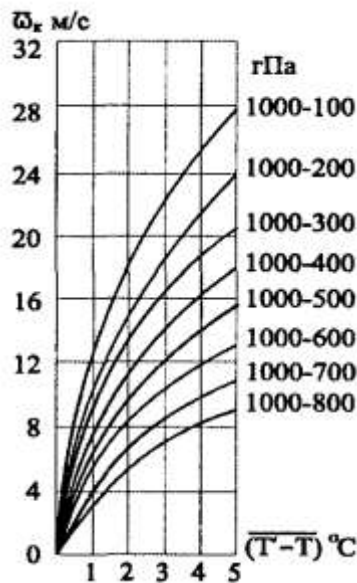


Рис. 6 Номограмма для определения средней вертикальной скорости частицы в конвективном движении по отклонению кривой состояния от кривой стратификации на АД

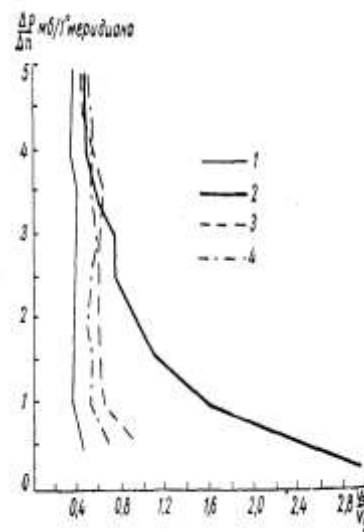


Рис. 7. График для определения величины $V_{ф}/V_g$
1- лето, ночь; 2- лето, день;
3- зима, день; 4- зима, ночь

Действительный ветер отличается по величине и направлению от геострофического и градиентного ветра, особенно сильно в пограничном и приземном слоях атмосферы. Однако и в этом случае для расчета скорости ветра используют геострофическую и градиентную модели, вводя поправки, найденные в результате статистической обработки результатов сравнения

действительного и рассчитанного ветров. Так, скорость действительного V_{ϕ} (фактического) ветра на уровне флюгера рассчитывают по формулам:

$$V_{\phi} = 0.7 V_g \quad (\text{море}), \quad (23)$$

$$V_{\phi} = 0.55 V_g \quad (\text{суша}). \quad (24)$$

Для определения фактического ветра по значениям геострофического ветра для каждой станции желательно иметь графики связи $k = V_{\phi}/V_g$ и $\frac{\Delta P_0}{\Delta n}$, построенные с учетом местных условий (рис. 7). Такие графики следует составлять по многолетним данным, причем отдельно для различных сезонов, времени суток, характера стратификации воздушной массы, направления ветра и других условий, оказывающих влияние на скорость ветра.

Действительный ветер на уровне флюгера по скорости обычно меньше градиентного и отклоняется от направления изобар в сторону низкого давления в среднем над морем на 15° , над равниной на 30° , а над холмистой местностью на 45° и более. Отличие действительного ветра от градиентного в первую очередь зависит от шероховатости подстилающей поверхности. Поэтому, как уже упоминалось ранее, значение k над сушей примерно равно 0,5—0,6, а над водной поверхностью 0,7. Естественно, что над равниной действительный ветер по скорости и направлению ближе к градиентному, чем над холмистой, а тем более горной местностью. При больших скоростях действительного ветра его отклонение от направления изобар меньше, чем при малых скоростях.

5. Прогноз ветра на высотах

Прогноз ветра на высотах составляется главным образом по прогностическим картам абсолютной топографии различных изобарических поверхностей. В настоящее время эти карты предвычисляются на ЭВМ на 12, 18, 21 и 24 часа вперед по данным двух основных сроков наблюдений (3 и 15 час.). Каждая предвычисленная карта может быть использована в течение ± 3 часов от срока, на который она составлена.

Если высота, для которой необходимо составить прогноз ветра, располагается вблизи уровня изобарической поверхности, то используется та прогностическая карта абсолютной топографии, которая соответствует этому уровню. Так, для прогноза ветра на высотах 1,5; 3; 5; 7; 9 и 12 км используются прогностические карты абсолютной топографии поверхностей 850, 700, 500, 400, 300 и 200 гПа соответственно.

Составление прогноза ветра по высотам осуществляется с использованием градиентной линейки

Предсказание ветра по предвычисленным картам барической топографии сводится к определению направления и скорости градиентного ветра. Для этого:

- а) выбирается ближайшая к заданной высоте карта барической топографии, предвычисленная на момент времени, ближайший к сроку прогноза;
- б) на выбранной карте в интересующем районе с помощью градиентной линейки (рис.3) определяется скорость геострофического ветра V_g , а с помощью номограммы (рис. 4) - радиус кривизны изогипс. Если радиус кривизны изогипс больше 3000 км или скорость геострофического ветра меньше 60 км/час, то за прогностическую скорость ветра принимается найденное значение скорости геострофического ветра;
- в) если радиус кривизны меньше 3000 км, а скорость геострофического ветра больше 60 км/час, то по их значениям с помощью номограмм, приведенных на рис. 8а и рис. 8б, в зависимости от кривизны изогипс определяется коэффициент k для перехода от геострофической к градиентной скорости, которая и принимается за прогностическое значение $V = kV_g$.

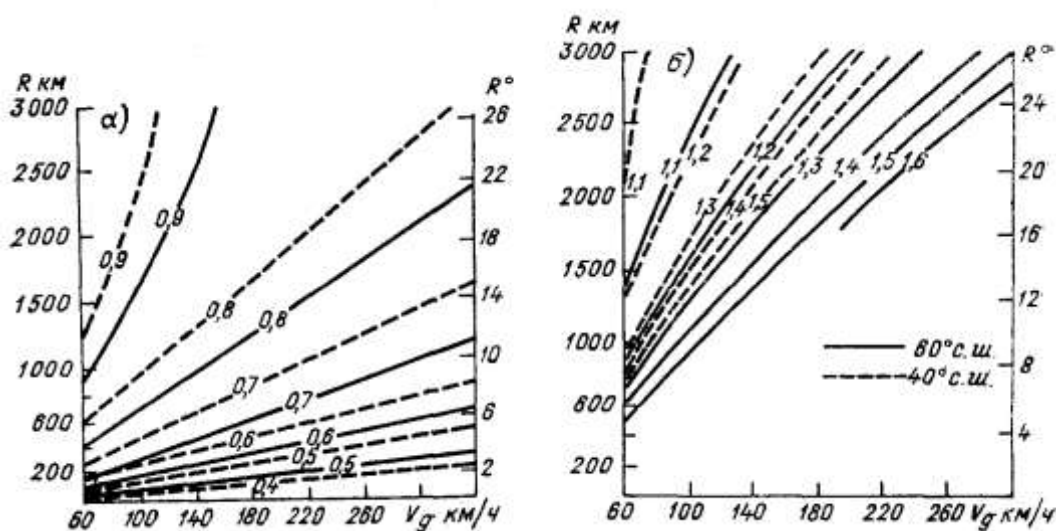


Рис. 8. Номограмма для определения коэффициента перехода от геострофического ветра к градиентному при циклонической (а) и антициклонической (б) кривизне изогипс

г) в первом приближении принимается, что прогностическое направление ветра на высотах совпадает с направлением изогипс на прогностических картах АТ.

Однако, в областях сходимости и расходимости изогипс, резкого изменения их кривизны вдоль воздушного потока, которое отмечается в вершинах гребней и подошвах ложбин, при быстрых перестройках барического поля, как правило, действительный ветер отклоняется от направления изогипс. В среднем эти отклонения не очень велики. Так, например, действительный ветер на изобарической поверхности 500 гПа во

внетропических широтах отклоняется от направления изогипс в 67 % случаев менее чем на 15°, а на изобарической поверхности 300 гПа — в 85 % случаев менее чем на 20°. В вершинах гребней и подошвах ложбин действительный ветер отклоняется от изогипс в среднем на 10—13°. Таким образом, отклонения направления действительного ветра от градиентного в среднем близки к точности измерения направления при температурно-ветровом радиозондировании.

Литература

1. Воробьев В.И. Основные понятия синоптической метеорологии Л.: Изд-во РГГМУ, 2003.
2. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 616 с.
3. Зверев А.С. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1977. - 436 с.
4. Подрезов О.А., Подрезов А.О. Физическая метеорология. Бишкек: КРСУ, 2008.- 349 с.
5. Практикум по синоптической метеорологии. Руководство к лабораторным работам по синоптической метеорологии и атлас синоптических материалов. Под ред. проф. В.И. Воробьева. Издание 2-е, перераб. и доп.- СПб.: изд. РГГМУ, 2005.- 304 с.
6. Практикум по синоптической метеорологии. Под. Ред. В.И.Воробьева. Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 288 с.
7. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды, ч.1.- Л.: Гидрометеиздат., 1986. – 702 с.
8. Русин И.Н. Современные методы метеорологических прогнозов. / Учебное пособие/ Л.: Изд. ЛГМИ, 1987.