8. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПРОИЗВОДНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ПО КАРТАМ ПОГОДЫ И СПОСОБЫ ИНТЕРПОЛЯЦИИ И ЭКСТРАПОЛЯЦИИ

Карты погоды всех уровней содержат ряд количественных характеристик погоды, отнесенных к точкам пространства. Но этих характеристик часто недостаточно для решения задач диагноза и прогноза погоды.

Во-первых, на картах погоды данные имеются лишь для ограниченного и неравномерно распределённого (неэквидистантного) числа пунктов, а также для определённых уровней атмосферы (дискретность в пространстве). Во-вторых, данные передаются в определённые сроки (дискретность во времени).

Кроме этого, остаются значительные области на земном шаре, где наблюдения либо проводятся время от времени, либо вообще отсутствуют (акватории морей и океанов, пустыни, горные районы, ледники и пр.).

Далее, имеются метеорологические величины, которые в настоящее время не наблюдаются по различным техническим причинам (например, вертикальная составляющая скорости ветра).

В этой связи возникают задачи получения добавочных количественных характеристик путём использования имеющейся на картах погоды информации. Для этого применяют приёмы вычисления производных метеорологических величин, которые затем используют для определения градиентов, лапласианов, якобианов, и приёмы интерполяции и экстраполяции.

8.1. Вычисление производных

Производные вычисляют методом конечных разностей по данным в дискретных точках времени или пространства. При этом значение производной заменяется её средним значением в интервале осреднения. Интервалы осреднения выбираются с учётом поставленной задачи. Часто по горизонтали выбирают интервалы в пределах от 100 до 1000 км, по вертикали – от 50 до 200 гПа. Временные интервалы составляют от 1 часа и более.

Для определения производных используют расчётную сетку любого вида, чаще – прямоугольную (*рис.8.1*).

Обычно прямая между точками 11, 03, 00, 01 и 09 принимается за ось X, перпендикулярная к ней линия, соединяющая точки 12, 04, 00, 02, 10 – за ось Y. Расстояния между двумя любыми точками (узлами сетки) – шаг сетки.

Для определения производных расчётную сетку, обычно сделанную на прозрачной бумаге, прикладывают к карте погоды так, чтобы точка 0 совпала с пунктом, для которого ведётся расчёт, ось Y совмещают с меридианом, ось X – с широтой, проходящими через пункт расчёта. Вычисления производят от востока к западу и от севера к югу.

Поле метеорологической величины (обозначим её через f) при подобных расчётах считается линейным, т.е. значение функции f_i в узле с координатами x_i, y_i задаётся в виде:

$$f_i = f_0 + \frac{\partial f}{\partial x} x_i + \frac{\partial f}{\partial y} y_i ,$$

где f_0 – значение функции в начале координат (точка 0 на сетке), т.е. в точке, для которой ведётся расчёт.

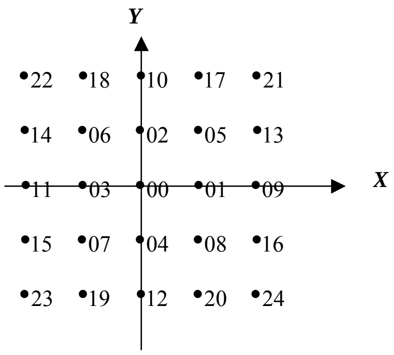

Рис. 8.1. Прямоугольная расчётная сетка

Если f – некоторая функция, $\frac{\partial f}{\partial x}$ – её частная производная, допускаем, что $\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\Delta f}{\Delta x}$, где $\Delta f = f_2 - f_1$, а $\Delta x = x_2 - x_1$. Конечные разности Δf, Δx и др. находят по формулам следующим образом.

Для первой производной:

$$(\frac{\partial f}{\partial x})_0 = \frac{1}{2\Delta s}(f_1 - f_3), \quad (\frac{\partial f}{\partial y})_0 = \frac{1}{2\Delta s}(f_2 - f_4) .$$

Для второй производной:

$$(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2})_0 = \frac{1}{2\Delta s}[(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2})_1 - (\frac{\partial^2 f}{\partial x^2})_3] = \frac{1}{2\Delta s}[\frac{f_9 - f_0}{2\Delta s} - \frac{f_0 - f_{11}}{2\Delta s}] = \frac{1}{4(\Delta s)^2}(f_9 + f_{11} - 2f_0),$$

$$(\frac{\partial^2 f}{\partial y^2})_0 = \frac{1}{2\Delta s}[(\frac{\partial^2 f}{\partial y^2})_2 - (\frac{\partial^2 f}{\partial y^2})_4] = \frac{1}{2\Delta s}[\frac{f_{10} - f_0}{2\Delta s} - \frac{f_0 - f_{12}}{2\Delta s}] = \frac{1}{4(\Delta s)^2}(f_{10} + f_{12} - 2f_0).$$

Для смешанной производной:

$$(\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y})_0 = \frac{1}{2\Delta s}[\frac{\partial}{\partial y}(\frac{\partial f}{\partial x})_0] = \frac{1}{2\Delta s}[\frac{\partial}{\partial y}\frac{(f_1 - f_3)}{2\Delta s}] = \frac{1}{2\Delta s}[\frac{f_5 - f_8}{2\Delta s} - \frac{f_6 - f_7}{2\Delta s}] =$$
$$= \frac{1}{4(\Delta s)^2}[(f_5 - f_6) - (f_8 - f_7)].$$

Для более точных расчётов в данные формулы вводят дополнительные слагаемые, но использование подробных формул с большим числом членов ведёт одновременно к излишнему сглаживанию величин производных.

Приведённые формулы используют при расчёте градиентов, лапласианов, якобианов – характеристик, которые наиболее часто требуются в прогностической работе.

- *Градиент величины f*, показывающий её изменение на единицу расстояния (например, на 100, 300, 500 км), есть вектор вида

$$\overline{\nabla f} = \frac{\partial f}{\partial x}\bar{i} + \frac{\partial f}{\partial y}\bar{j} + \frac{\partial f}{\partial z}\bar{k},$$

где *i, j, k* – единичные векторы.

Для карт погоды (плоскости):

$$\overline{\nabla f} = \frac{\partial f}{\partial x}\bar{i} + \frac{\partial f}{\partial y}\bar{j}.$$

Вектор ∇f может быть определён как диагональ прямоугольника, построенного на отрезках $\frac{\partial f}{\partial x}$ и $\frac{\partial f}{\partial y}$:

$$|\nabla f|_0 = \sqrt{(\frac{\partial f}{\partial x})^2 + (\frac{\partial f}{\partial y})^2} = \frac{1}{2\Delta s}\sqrt{(f_1 - f_3)^2 + (f_2 - f_4)^2} =$$
$$= \frac{1}{2\Delta s}\sqrt{f_1^2 + f_2^2 + f_3^2 + f_4^2 - 2(f_1 f_3 + f_2 f_4)}.$$

Градиент может быть вычислен и другими способами.

На карте погоды вдоль нормали между изолиниями элемента f измеряется расстояние Δn, например, в сотнях километров, тогда градиент вычисляется в единицах f на100 км, как

$$|\nabla f| = \left|\frac{\Delta f}{\Delta n}\right|.$$

Вдоль нормали к изолиниям f определяются величины f_1 и f_2, в точках, расположенных соответственно, слева и справа на расстоянии 50 км от точки, для которой рассчитывается градиент, тогда величина градиента вычисляется в единицах f на100 км:

$$|\nabla f| = |f_1 - f_2|.$$

• *Лапласиан.* При решении многих задач анализа и прогноза погоды используется оператор Лапласа (лапласиан), имеющий для плоскости вид:

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}.$$

После подстановки вторых производных, выраженных в конечных разностях, получим:

$$\nabla^2 f = \frac{1}{4(\Delta s)^2}(f_9 + f_{10} + f_{11} + f_{12} - 4 f_0).$$

• *Адвективные изменения.* Исследуя горизонтальное перемещение какой-либо частицы воздуха, обладающей определёнными свойствами (температурой, влажностью воздуха), используется понятие адвекции или, для давления воздуха, – трансляции. Адвекция (трансляция) характеризуют горизонтальный перенос, в отличие от конвекции (вертикальный перенос).

Расчёт адвективных (трансляционных) изменений метеорологических величин (например, f и l) производится с помощью оператора Якоби (якобиана):

$$(f,l) = \begin{vmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial y} \\ \frac{\partial l}{\partial x} & \frac{\partial l}{\partial y} \end{vmatrix} = \frac{\partial f}{\partial x}\frac{\partial l}{\partial y} + \frac{\partial f}{\partial y}\frac{\partial l}{\partial x}.$$

Для определения адвективных изменений температуры воздуха Т на уровне Н имеем:

$$(H,T) = \begin{vmatrix} \frac{\partial H}{\partial x} & \frac{\partial H}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial x} & \frac{\partial T}{\partial y} \end{vmatrix} = \frac{\partial H}{\partial x}\frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial y}\frac{\partial T}{\partial x},$$

или, с учётом формулы для производных в конечных разностях:

$$(f,l) = \frac{1}{4(\Delta s)^2}(f_1 - f_3)(l_2 - l_4) - (f_2 - f_4)(l_1 - l_3),$$

получим:

$$(H,T) = \frac{1}{4(\Delta s)^2}(H_1 - H_3)(T_2 - T_4) - (H_2 - H_4)(T_1 - T_3).$$

8.2. Способы формальной интерполяции и экстраполяции метеорологических величин

Часто по картам погоды необходимо определить промежуточные значения метеорологической величины по данным в дискретных точках (между станциями или на станции между сроками). Эта процедура называется интерполяцией. При проведении изолиний метеорологических величин как раз и используются приёмы интерполяции.

Различают линейную (прямолинейную) и криволинейную интерполяцию.

8.2.1. Прямолинейная интерполяция

Прямолинейную интерполяцию можно осуществить по наблюдениям в двух точках пространства или по двум последовательным промежуткам времени (*рис. 8.2*).

При этом изменение метеорологической величины от точки **А** к точке **В** в направлении прямой **АВ** (или от момента времени t_1 к t_2) считается постоянным:

$$\frac{\partial f}{\partial s} = \frac{\Delta f}{\Delta s} = C_1, \quad \frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\Delta f}{\Delta t} = C_2, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial s^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = 0.$$

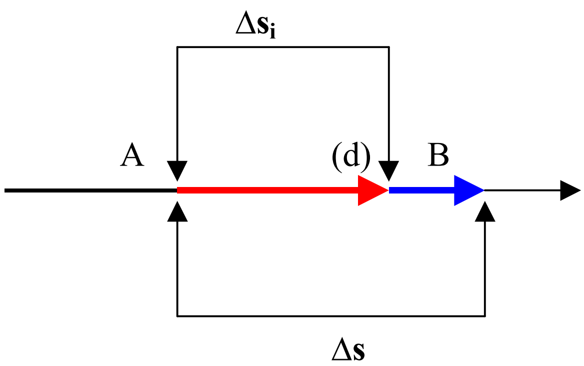

Рис. 8.2. Схема расположения точек при прямолинейной интерполяции

Пусть в т. **А** значение элемента f_1, в точке **В** – f_2. Требуется найти значение f_i в точке (**d**), расположенной на расстоянии Δs_i от т. **А** (или отстоящем по времени на Δt_i):

$$f_i = f_1 + \frac{\partial f}{\partial s}\Delta s_i = f_1 + C_1 \Delta s_i,$$

или, в случае временного интервала Δt_i:

$$f_i = f_1 + \frac{\partial f}{\partial t}\Delta t_i = f_1 + C_1 \Delta t_i.$$

Значение f_i в т.(**d**) может быть определено и от т. **B** для пространственного (Δs_i) или временного (Δt_i) интервала, соответственно:

$$f_i = f_2 - \frac{\partial f}{\partial s}(\Delta s - \Delta s_i) = f_2 + C_1 \Delta s_k,$$

где $(\Delta s - \Delta s_i) = \Delta s_k$,

$$f_i = f_2 + \frac{\partial f}{\partial t}(\Delta t - \Delta t_i) = f_1 + C_1 \Delta t_k,$$

где $(\Delta t - \Delta t_i) = \Delta t_k$.

С учётом вычисленных производных с помощью расчётной сетки можно записать:

$$f_i = f_1 + \frac{f_2 - f_1}{\Delta s}\Delta s_i, \quad f_i = f_1 + \frac{f_2 - f_1}{\Delta t}\Delta t_i.$$

8.2.2. Криволинейная интерполяция

Криволинейная интерполяция или интерполяция с учётом ускорения предусматривает наблюдения в трёх точках пространства или за три последовательных интервала времени.

При криволинейной интерполяции считается, что

$$\frac{\partial f}{\partial s} = \frac{\Delta f}{\Delta s} \neq const, \quad \frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\Delta f}{\Delta t} \neq const, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial s^2} = const, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = const.$$

Требуется определить значение элемента f_i в точке, отстоящей от т.f_2 на расстоянии Δs_i или по времени – на Δt (*рис. 8.3*). При этом шаг сетки Δs (или Δt) для простоты выбирают одинаковым.

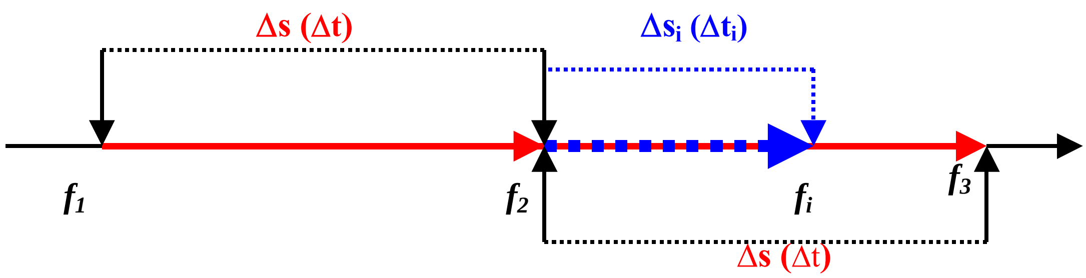

Рис. 8.3. Схема расположения точек при криволинейной интерполяции

Обозначим $\frac{\partial^2 f}{\partial s^2} = a_1$, $\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = a_2$, тогда:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial s^2} = \frac{1}{\Delta s}[\frac{(f_3 - f_2)}{\Delta s} - \frac{(f_2 - f_1)}{\Delta s}] = \frac{1}{\Delta s}(f_1 + f_3 - 2f_2),$$

следовательно,

$$f_i = f_2 \pm \frac{\partial f}{\partial s}\Delta s_i + \frac{\partial^2 f}{\partial s^2}\frac{(\Delta s_i)^2}{2},$$

$$f_i = f_2 \pm \frac{(f_3 - f_1)}{2\Delta s}\Delta s_i + \frac{(f_3 + f_1 - 2f_2)}{(\Delta s)^2}\frac{(\Delta s_i)^2}{2}.$$

Знак минус ставится, если расчёты f производятся слева направо от центральной точки, знак плюс – при расчётах справа налево.

8.2.3. Формальная экстраполяция

Если требуется найти значение метеорологической величины за пределами известных значений в точке пространства или времени, процедура расчёта называется экстраполяцией. При этом расчёты производятся так же, как и при интерполяции.

Например, для точки, лежащей правее т. **В** (*см. рис.8.2*) на расстоянии Δl значение элемента f_l, рассчитанное методом прямолинейной интерполяции, составит:

$$f_l = f_2 + \frac{f_2 - f_1}{\Delta s}\Delta l \ ,$$

методом криволинейной интерполяции:

$$f_l = f_2 + \frac{(f_3 - f_1)}{2\Delta s}(\Delta s + \Delta l) + \frac{(f_3 + f_1 - 2f_2)}{(\Delta s)^2}\frac{(\Delta s + \Delta l)^2}{2},$$

или

$$f_l = f_3 + \frac{(f_3 - f_1)}{2\Delta s}\Delta l + \frac{(f_3 + f_1 - 2f_2)}{(\Delta s)^2}\frac{(\Delta l)^2}{2}.$$

Приёмы интерполяции и экстраполяции используются при расчётах значений метеорологических элементов, положения центров приземных и высотных циклонов и антициклонов, их эволюции.

Рассмотренные приёмы обычно называют приёмами формальной интерполяции и экстраполяции, поскольку при их использовании не учитываются особенности развития атмосферных процессов.

8.3. Физическая экстраполяция

Наиболее широко используемым способом физической экстраполяции является способ ведущего потока, предложенный В.М. Михелем и С.И. Троицким в начале 30-х годов прошлого века:

- **Центры приземных циклонов и антициклонов, атмосферные фронты, оси барических ложбин и гребней, воздушные частицы у поверхности Земли перемещаются в направлении устойчивого воздушного потока над ними на уровне 4-6 километров со скоростью, пропорциональной скорости этого потока**

При использовании этого способа в качестве ведущего потока используют перенос на уровне поверхности 700 или 500 гПа.

Прежде, чем рассматривать практическое использование правила ведущего потока, введём понятия траекторий и линий тока.

8.3.1. Траектории воздушных частиц

Траектория – это набор последовательных положений воздушной частицы (синоптического объекта) за некоторый интервал времени. Траектории частицы имеют горизонтальную и вертикальную составляющие. На практике при расчёте траектории частицы по картам погоды определяют только её горизонтальную проекцию графическим или расчётным способом.

Построение траекторий воздушных частиц позволяет определить, откуда пришла (придет) частица в данный район, а также, куда переместится данная частица со своими свойствами за время t. Эти обе задачи решаются также для синоптических объектов, таких как циклоны, антициклоны, барические ложбины и гребни, атмосферные фронты и др.

- **На картах барической топографии за направление переноса частицы принимают направление изогипсы, у поверхности Земли – промежуточное направление между изобарой и направлением ветра**

При решении задачи о том, откуда пришла (или придет) воздушная частица в данный район (пункт прогноза), траектория откладывается от заданной точки (пункта прогноза) против воздушного потока (способ обратного переноса), при решении задачи о том, куда переместится воздушная частица за время Δt – в направлении воздушного течения (способ прямого переноса).. Обе задачи могут иметь диагностический и прогностический характер.

Например, можно ответить на вопросы, откуда пришел циклон (диагностическая задача), или откуда через сутки в данный пункт придет воздушная масса со своими погодными характеристиками (прогностическая задача). При решении вопроса, где, например, через сутки будет располагаться данный циклон (прогностическая задача), можно определить, будет ли данный циклон влиять на пункт прогноза, если будет, то какая его часть, когда ожидать осадки, смену направления ветра и т.д.

При расчётах на 12 часов используются фактические карты погоды (этого часто бывает достаточно, поскольку атмосферные процессы обладают определённой инерцией, и за 12 часов существенной перестройки высотного барического поля, как правило, не происходит). При расчётах на срок более 12 часов необходимо использовать как фактическую, так и прогностическую карту, построенную на момент прогноза.

Способ обратного переноса:

Пусть необходимо определить, откуда пришла (или придет) воздушная частица в данный пункт через $\Delta t \leq 12$ ч (срок прогноза).

- Обозначим на карте погоды пункт, для которого производится расчёт, т. А (*рис. 8.4*).

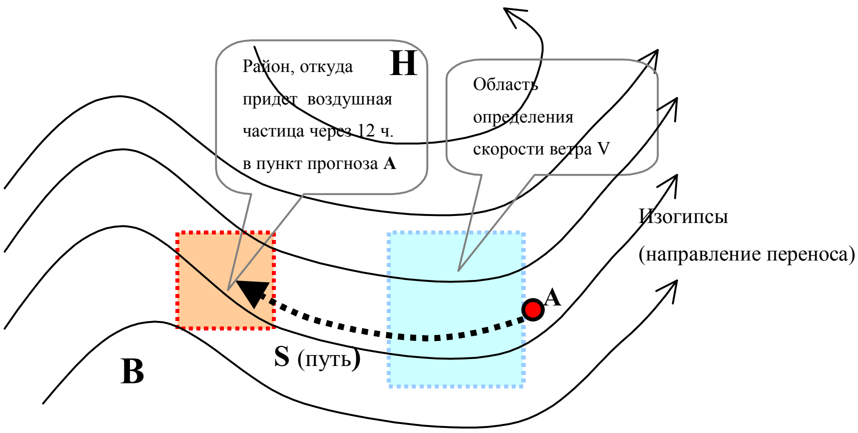

Рис. 8.4. Способ обратного переноса

- В районе **т. А** (немного позади по потоку) определяем по карте погоды среднюю скорость ветра $\overline{V}$ в км/ч, затем рассчитываем расстояние S (путь), на которое может сместиться воздушная частица (синоптический объект) за время Δt:

$$S = \Delta t \cdot \overline{V}\ .$$

• От точки **А** на карте погоды смещаемся против потока на расстояние S примерно параллельно изогипсам АТ, а на приземной карте – между изобарой и направлением ветра Начальная точка траектории укажет район, из которого через время Δt сместится воздушная частица в пункт прогноза.

• Если срок прогноза $\Delta t \geq 12$ ч., то необходимо проводить расчёты по двум картам – прогностической и фактической. Сначала рассчитываем, как указано выше, путь частицы S_1, за время $\frac{\Delta t}{2}$, либо за время (Δt-12ч.) по прогностической карте погоды:

$$S_1 = \frac{\Delta t}{2}\overline{V}$$

• По прогностической карте от т. А смещаемся на путь S_1 назад по потоку. Обозначаем в конце траектории S_1 т.A_1. Точку A_1 переносим на фактическую карту погоды, и аналогичным образом рассчитываем путь частицы S_2 за оставшееся время $\frac{\Delta t}{2}$, либо за 12 ч., если путь рассчитывался за время (Δt-12ч):

• От т. A_1 на фактической карте погоды смещаемся против потока примерно параллельно изогипсам АТ на расстояние S_2, где обозначим начало траектории точкой A_2. Начальная точка траектории (A_2) на фактической карте погоды укажет район, из которого через время Δt сместится воздушная частица в пункт прогноза (конец траектории).

Способом обратного переноса можно оценить свойства воздушной массы, которая находится в данный момент в начале траектории, и через время Δt будет определять погодные условия в пункте прогноза.

Способ прямого переноса:

Решение задачи о том, куда переместится воздушная частица из данного пункта, производится аналогично способу обратного переноса, но траектория строится не назад по потоку, а по направлению потока. При этом, если способ обратного переноса предполагает нахождение района (начала траектории), из которого придет в данный пункт (конец траектории) воздушная частица со своими свойствами, то способ прямого переноса позволяет определять район, куда сместится воздушная частица, циклон, атмосферный фронт и пр. (конец траектории) из данного района (начало траектории).

На срок $\Delta t \leq 12$ ч. расчёты выполняются по одной карте погоды, на срок $\Delta t > 12$ ч. сначала используется фактическая карта АТ, затем прогностическая. Средние скорости переноса при этом определяются не позади точки, для которой производится расчёт, а впереди этой точки.

На практике для решения задач прямого и обратного переноса по приземной карте погоды построение траекторий производится с учётом правила ведущего потока, т.е. используются карты AT_{700} или AT_{500}. Но на высотах скорости ветра значительно выше, чем у поверхности Земли. Правило ведущего потока учитывает эту особенность, путём введения в расчёты соответствующих коэффициентов, учитывающих зависимость скорости перемещения у поверхности Земли от скорости перемещения на высотах.

Координаты точки, для которой производится расчёт на приземной карте (это может быть пункт прогноза, приземный центр барического образования, точка на атмосферном фронте и т.д.), переносятся на карту AT_{700} или AT_{500} (карты уровня ведущего потока).

Затем производятся аналогичные расчёты пути и построения траекторий, но формула для пути будет иметь вид:

$$S = \Delta t \cdot k \cdot \overline{V} \,,$$

где k – коэффициент пропорциональности (коэффициент переноса) между скоростью ветра у Земли и на высотах.

Коэффициент переноса зависит от скорости на высотах (*табл. 8.1*). В среднем коэффициент пропорциональности для AT_{700} принимается равным 0.8, для AT_{500} – 0.6.

После определения начальной точки траектории на высотной карте погоды, эту точку переносят на приземную карту и по ней оценивают свойства воздушной частицы, которая придет в данный район со своими свойствами.

Таблица 8.1

Зависимость коэффициента переноса от скорости ветра на уровнях AT_{700} и AT_{500}

Скорость потока на высотах, км/ч	Коэффициент переноса для уровней	
	AT_{700}	AT_{500}
>=30	1.5	1.2
30-35	1.2	1.0
35-45	1.0	0.8
45-55	0.8	0.7
55-85	0.7	0.6
85-100	0.6	0.4

- **Метод расчёта характеристик метеорологических величин с помощью построения траекторий называют методом траекторий**

Методом траекторий определяют адвективные изменения метеорологических величин, например, температуры воздуха:

$$\Delta T_{адв}=T_н+T_к,$$

где $T_н$ – температура воздуха на данном уровне в начале траектории, $T_к$ – температура воздуха на данном уровне в конце траектории (пункте прогноза).

При построении траекторий воздушных частиц графическим способом по картам погоды удобно пользоваться прозрачными гибкими *градиентными линейками*, по нижней шкале которых определяется скорость ветра на высотах (например, AT_{500}), где не действует сила трения, а на верхней шкале линейки нанесено расстояние, которое пройдет частица при данной скорости за время Δt. Линейка строится для определённой широты.

Линейки различаются для карт различного масштаба, но, учитывая, что на каждом синоптическом бланке карты имеется легенда масштаба по соответствующим широтам, можно, при желании построить линейку для определения пути частицы на любой широте с любой скоростью переноса и за любое время.

8.3.2. Линии тока воздушных частиц

Для изучения атмосферных движений в различных барических системах с помощью карт погоды полезно использовать поля мгновенных скоростей движущейся среды, которые показывают перемещение различных частиц воздуха в один момент времени. Характеристикой такого поля мгновенных скоростей движущейся среды являются линии тока воздушных частиц. В каждой точке линии тока вектор скорости направлен по касательной к ним.

Линии тока могут образовывать области, линии и точки сходимости и расходимости воздушных течений. Каждой барической системе присуща своя система ветров и соответствующая ей система линий тока. Вектор скорости действительного ветра в приземном слое атмосферы пересекает изобары, поэтому и линии тока действительного ветра также пересекают изобары. На высотах, где силами трения можно пренебречь, вектор ветра направлен по касательной к изогипсам, следовательно, линиями тока здесь являются сами изогипсы.

- **Циклон в поле приземного трения представляет собой область сходимости воздушных потоков к центру, антициклон – область расходимости воздушных потоков от центра**

В приземном слое атмосферы воздушные потоки сходятся к центру циклона и расходятся от центра антициклона (*рис. 8.5 а, б*). Воздушные потоки сходятся к оси барической ложбины и расходятся от оси барического гребня.

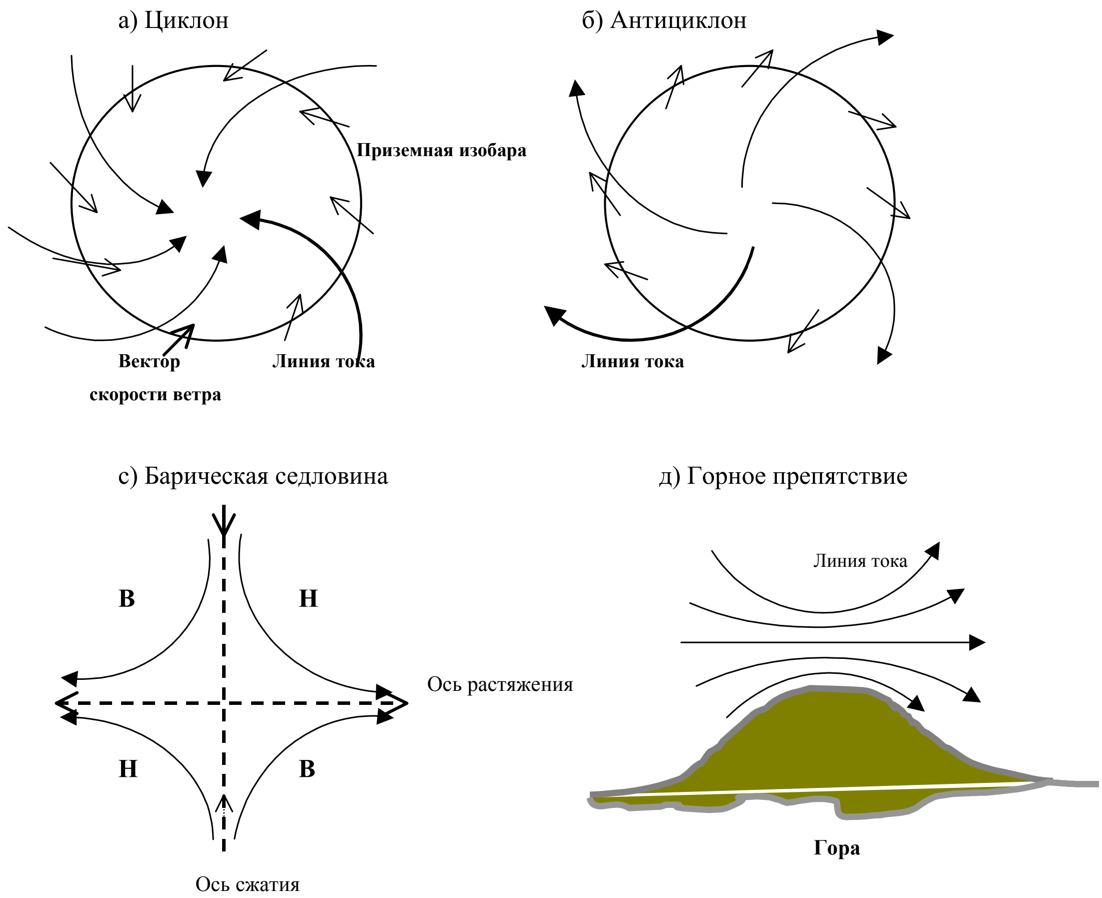

Рис. 8.5. Линии тока в горизонтальной плоскости в циклоне (а), антициклоне (б), барической седловине (с) и в вертикальной плоскости над горой (д)

В барических седловинах выявляются две характерные оси – ось сжатия, где воздушные массы, стремясь навстречу друг другу, растекаются, и ось растяжения, где воздушные массы как бы удаляются друг от друга и затем сходятся (*рис. 8.5 с*).

В вертикальной плоскости, например, при пересечении воздушным потоком горного хребта, наибольшая густота линий тока отмечается над вершинами гор (*рис. 8.5 д*).

Линии тока являются изолиниями функций тока. В пространстве функция тока характеризует количество воздуха, протекающего в единицу времени через поперечное сечение тела вращения, образованного при вращении линии тока вокруг оси симметрии.

На картах погоды с помощью линий тока определяются знак и величина локальных изменений атмосферного давления, зоны образования и усиления атмосферных фронтов и фронтальных зон, либо их размывания.

Линии тока проводятся путём глазомерной интерполяции, чтобы векторы ветра были направлены к линии тока по касательной, а расстояния между линиями тока соответствовали бы величине скорости ветра. Чем больше скорость ветра, тем гуще располагаются линии тока.