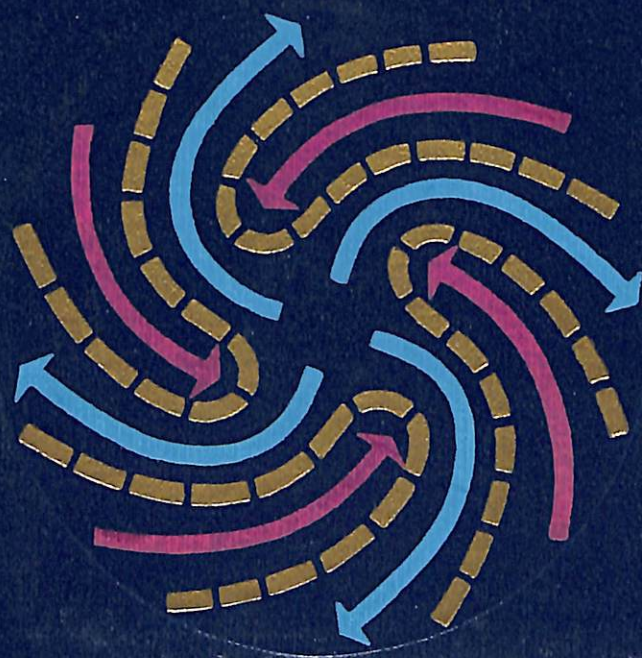


Э. Пальмен, Ч. Ньютон

ЦИРКУЛЯЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ АТМОСФЕРЫ



ATMOSPHERIC CIRCULATION SYSTEMS

Their Structure and Physical Interpretation

E. PALMÉN
ACADEMY OF FINLAND
AND UNIVERSITY OF HELSINKI
HELSINKI, FINLAND

AND

C. W. NEWTON
NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH
BOULDER, COLORADO

1969
ACADEMIC PRESS • NEW YORK AND LONDON

Э. Пальмен, Ч. Ньютон

ЦИРКУЛЯЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ АТМОСФЕРЫ

Перевод с английского
И. М. ШЕЙНИСА

Под редакцией и с предисловием
С. П. ХРОМОВА

ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ
ЛЕНИНГРАД • 1973

551
П-146

686134

*

Дается подробная характеристика главных особенностей основных циркуляционных систем в тропосфере. Рассматриваются различные гипотезы и теории, относящиеся к частным проблемам циркуляции. Особое внимание уделяется вопросам преобразования и переноса энергии и количества движения в атмосфере. Книга имеет некоторую географическую направленность, причем при описании синоптических систем наибольшее внимание уделяется Северной Америке и прилегающим к ней районам, хотя выводы, относящиеся к особенностям этих систем, вполне применимы и для других районов.

Книга представляет интерес для географов, метеорологов, гидрологов, геофизиков, студентов гидрометеорологических вузов и географических факультетов университетов.

*

Читатель получает в русском переводе одну из самых замечательных метеорологических монографий последнего времени.

Циркуляционные системы атмосферы в понимании авторов — это, во-первых, синоптические системы, такие, как тропические и внетропические циклоны и другие атмосферные возмущения близкого масштаба; с другой стороны — мезомасштабные конвективные возмущения. Речь идет, таким образом, именно о тех атмосферных объектах и процессах, которыми с давних пор занималась синоптическая метеорология; книга Пальмена и Ньютона тем самым имеет ближайшее отношение к синоптическому прогнозу погоды, хотя собственно вопросы прогноза в ней не рассматриваются. Суть книги — уточнение на основе нового, особенно аэрологического, материала наблюдений тех схем атмосферных циркуляционных систем, которые уже стали классическими, и построение новых моделей. Авторы не берут всю тяжесть этой задачи на себя, хотя их собственные исследования занимают должное место в книге. Они суммируют опыт современной аэрологической синоптики, опираясь на большую литературу вопроса. Следует вспомнить, что на русском языке обобщений такого рода материала не было уже много лет после книг Хромова, Зверева и Петерсона¹; небогата ими и зарубежная литература. Это позволяет оценить всю важность издания данного перевода для советского читателя: имеется в виду практик-синоптик, студент и преподаватель; наконец, теоретик, которому книга может дать и фактические сведения, и вдохновляющие идеи.

При этом нас, конечно, огорчает, что немалая и немаловажная советская литература вопроса нашла в книге недостаточное отражение: авторы старались, правда, учесть те советские работы, которые они могли найти в переводах, но не затронули основного массива этой литературы на русском языке. Мы же не сочли возможным ни механически внести в книгу те или иные дополнения, ни тем более перерабатывать текст с учетом советской литературы: это было бы не только чрезвычайно сложной и трудоемкой задачей, но

¹ Уже после сдачи этой книги в производство вышла еще «Общая циркуляция атмосферы» Х. П. Погосяна (Л., 1972).

и нарушило бы целостность и стройность концепции книги, принадлежащей не начинающим авторам, а всемирно известным ученым. Советские метеорологи могут видеть в этой книге импульс к самостоятельному обобщению материала в данной области. Все же указанный недостаток больше отзывается на читателе оригинала книги, незнакомом с советской литературой вопроса, чем на нашем читателе, более осведомленном в отечественных работах.

В переводе мы стремились к максимальной точности передачи оригинала, хотя и невозможно было сохранить на русском языке лаконизм английского изложения. Точность передачи терминологии была нашей основной заботой. Здесь следует сделать несколько пояснений относительно перевода отдельных терминов. Мы отказались от передачи терминов *eddy transfer* и т. п. как *турбулентный перенос* и т. п. В оригинале речь идет, как правило, о *макротурбулентных* процессах, а не о турбулентности обычного масштаба, и элементами турбулентности предполагаются атмосферные возмущения масштаба циклонов или мезомасштабные вихри, а *eddy transfer* противопоставляется упорядоченному переносу основными течениями общей циркуляции (циркуляционному). Поэтому, чтобы не вводить вместо *eddy* отяжеляющего выражения макротурбулентный, мы всюду применяли в этом смысле эквивалент *вихревой*, оставляя термин *турбулентный* для явлений турбулентности обычного масштаба. Термины *diffluence* и *confluence* всегда переводились как *расходимость* и *сходимость*, но *divergence* и *convergence* всегда как *дивергенция* и *конвергенция*. Мы не нашли возможности всегда единообразно передавать термин *draft* (*updraft*, *downdraft*); приходилось употреблять в качестве эквивалентов *поток*, *движение*, *течение*, *перенос*, хотя в оригинале *draft*, *flux*, *motion*, *transfer* всегда разграничены. Также не было возможности строго разделять и переводить единообразно термины *system*, *pattern*, *field*. По-разному переводились и термины *region* и *area*. Термин *storm* в применении к конвективной системе переводился как *возмущение*, но иногда и как *система* или *гроза*.

Местоимение «мы» относится выше к переводчику и редактору.

С. П. Хромов.

Москва, январь 1972 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

✱

«Ложные факты наносят большой вред развитию науки, так как часто удерживаются надолго; ложные взгляды менее пагубны, поскольку все находят особое удовлетворение в доказательстве их ложности».

Чарльз Дарвин. Происхождение человека.
Глава 6.

Цель настоящей книги состоит в том, чтобы описать главные особенности природы основных циркуляционных систем в атмосфере в том виде, в каком они предстают перед нами в свете современных знаний. Мы ограничиваем свое изложение «нижней атмосферой», т. е. слоем, расположенным приблизительно ниже 100 мб. Р. А. Крейг в своей книге «Физика верхней атмосферы», которая входит в состав данной серии публикаций («Международная геофизическая серия»), подробно рассматривает более высокие слои. Но мы стремились рассмотреть процессы, наиболее непосредственно связанные с формированием явлений погоды и климата в обычном смысле. Сейчас еще не вполне ясно, в какой степени эти явления находятся под влиянием процессов верхней атмосферы; связи здесь, несомненно, существуют, но все же установлено, что главные движущие механизмы для нижней атмосферы находятся в ней самой.

Несмотря на исключительный прогресс в наблюдениях и их обработке за последние 20—30 лет, данные наблюдений все еще не обеспечивают полного описания всей сложной природы различных циркуляционных систем, существующих в атмосфере. Поэтому необходимо прибегать к упрощениям и обобщениям с помощью соответствующих методов анализа, основанных частично на принципе исключения второстепенных явлений. Ограниченное число данных наблюдений в каждой такой системе может быть проанализировано различными путями; цель синоптической метеорологии и состоит в том, чтобы отыскать частные, но физически обоснованные решения. В поисках таких решений могут выдвигаться различные гипотезы, достоверность или ложность которых выясняется по мере появления дополнительных данных наблюдений или разработки

более правильных теорий. В данной книге читатель найдет такие частные описания и интерпретации, и мы надеемся, что мерой его неудовлетворенности будет стремление к усовершенствованию этих описаний.

Одна из основных задач метеорологии состоит в том, чтобы на основании данных о притоке энергии в атмосферу и о свойствах газовой среды, составляющей ее, выяснить, что определяет ее фактическое поведение. Природа создала рабочие механизмы, как нельзя лучше приспособленные для преобразования различных форм энергии и для ее переноса из одних мест в другие именно так, как это необходимо. Обоснованность любой гипотезы, относящейся к циркуляционным системам, определяется в первую очередь тем, насколько удовлетворительно она в конечном счете объясняет функции этих систем.

Наша цель состоит в том, чтобы описать характер циркуляционных систем в свете выполнения ими различных функций. Системы могут быть различными на разных географических широтах, на которых они обнаруживаются, поскольку необходимые функции различаются по своим масштабам. Различия могут наблюдаться и на одной и той же широте, в соответствии с региональными физико-географическими условиями. Таким образом, для обеспечения относительной полноты описания оно должно охватывать довольно значительное разнообразие систем, хотя бы и в очень схематичной форме. В то же время мы попытались снабдить книгу достаточно полной библиографией, чтобы дать читателю возможность познакомиться с более подробными описаниями отдельных явлений, которые могут его особенно заинтересовать.

Существуют ограничения и практического порядка в отношении возможностей охвата материала в одной книге. Пожалуй, наиболее обескураживающим является то обстоятельство, что есть обширные вопросы, которые имеют непосредственное отношение к излагаемой проблеме, но не могут быть рассмотрены достаточно адекватно на нескольких страницах, а потому их приходится опускать полностью. Во-вторых, очень досадно, что в значительной части материала мы не имели возможности останавливаться на происхождении современных понятий. Нам приходилось балансировать между включением в книгу слишком большого количества такого рода исторических материалов и перегрузкой текста библиографическими ссылками. В результате мы не даем полной исторической сводки, но там, где это возможно, пытаемся указать источники тех или иных аспектов рассматриваемой проблемы. Лишь в главу 5 специально включен краткий исторический обзор раннего этапа развития синоптической аэрологии и теории полярного фронта, чтобы подчеркнуть их особое значение для наших современных представлений.

Мы совершенно не касаемся аэрологической техники и прогноза погоды, поскольку обе эти проблемы рассматриваются в имеющейся литературе. Мы не пытались также изложить материал в форме учебника; например, не даются выводы уравнений, которые можно

найти в других местах. Однако мы надеемся, что эта книга может быть использована в качестве пособия для углубления своих познаний лицами, обладающими знанием основ теории и, что весьма желательно, некоторым практическим опытом синоптического анализа.

Лишь в небольшом числе случаев мы ссылаемся на эксперименты по численному моделированию для решения общих и частных проблем атмосферной циркуляции. Нет сомнения, что появление этой методики и использование спутниковых данных открыли новую эру в изучении атмосферы и ее систем движения. Работа в этих областях настолько велика по объему, что мы даже не пытались подытожить ее здесь; лучше предоставить это специалистам в указанных вопросах. Возможно, учитывая перечисленные проблемы, некоторые читатели найдут, что эта книга носит слишком качественный или описательный характер и не во всех отношениях современна. Однако основные принципы метеорологии в ходе технического прогресса не изменились: традиционные методы синоптической аэрологии и современная методика лишь дополняют друг друга в изучении атмосферы.

Следует признать, что когда по тому или иному вопросу существуют различные точки зрения, мы не приводим их все, чтобы не загромождать изложение и не нарушать его стройность. Читатель, возможно, обратит внимание, что значительная часть иллюстративного материала взята из наших собственных публикаций или из публикаций наших ближайших коллег. Это в какой-то степени объясняется его доступностью, а в какой-то является естественным следствием того факта, что нам легче писать о материале, с которым мы уже свыклись.

Главным образом по этой причине наши иллюстрации имеют некоторую географическую направленность; особенно это относится к синоптическим системам над Северной Америкой и прилегающими к ней районами. Читателям, интересующимся другими районами, следует иметь в виду, что описанные системы могут существенно различаться в разных географических областях. Поскольку одна из основных наших задач заключалась в том, чтобы сосредоточить внимание на физических принципах, мы надеемся, что они не слишком пострадали из-за того, что иллюстрированы циркуляционными системами частных типов; основные принципы остаются независимыми от географической обстановки. Тем не менее мы должны принести извинения за то, что не распространили свое описание на некоторые обширные районы.

Таким образом, во многих отношениях эта книга оказалась не тем, чем мы хотели ее сделать, а тем, что смогли сделать. Мы надеемся, что в ней точно излагаются работы других авторов. Такое впечатление нелегко проверить, поскольку смысл прочитанного часто окрашивается в цвета, подсказанные собственными мыслями по этому вопросу, и поэтому можно либо ошибочно изложить первоисточник, либо подчеркнуть те или иные моменты, вопреки намерениям самого автора. Больше всего мы хотели бы думать, что

сумели отличить факты от гипотез и тем самым не нарушили принципа Дарвина, приведенного в качестве эпиграфа к этой книге.

В подготовке книги нам оказали материальную помощь многие лица и учреждения. Особое чувство благодарности мы хотели бы выразить Чикагскому университету, Стокгольмскому университету, Хельсинкскому университету, Бюро погоды США и Национальному центру атмосферных исследований США за оказанные ими поддержку и помощь, без которых осуществление этой работы было бы невозможным. Мы выражаем благодарность лично профессорам Сверре Петерсену, Бертру Болину, Бо Десу и Лоури А. Вуорела, а также д-ру Роберту Симпсону за советы по построению книги. Многие наши сотрудники сделали замечания по отдельным частям рукописи и дали ценные советы в отношении ее подготовки. Ральф Л. Колеман оказал нам особую помощь в анализе некоторых чертежей и вычертил большую часть новых иллюстраций. Мы выражаем признательность мисс Маргарет Джонстон, миссис Ненси Сайлер, миссис Лоис Грис и миссис Айлин Уоркмен, героически перенесшим все трудности при перепечатке и считке рукописи. В особом долгу мы находимся перед профессором Карлом Крейцбергом, который взял на себя труд прочитать рукопись и привлек наше внимание к ряду ошибок, ранее оставшихся незамеченными.

*Эрик Пальмен
Честер Ньютон*

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

*

Специальные условные обозначения

- $C(E_1, E_2)$ — преобразование энергии из формы E_1 в форму E_2 , где в качестве E могут выступать либо A_m, A_s, K_m , либо K_s
- \dot{Q} — dQ/dt
- \bar{Q} — среднее значение вдоль круга широты
- $\langle Q \rangle$ — среднее значение вдоль произвольной границы
- $[Q]$ — среднее значение по площади
- Q' — локальное отклонение от средней величины
- Q'' — локальное отклонение от средней по площади $[Q]$ в тех случаях, когда используются также отклонения (Q') от средних вдоль границы
- Q_0 — значения Q на земной поверхности (в случаях, если не оговорено другое обозначение)
- Q_g — геострофическая величина
- Q_x, Q_{xy} — составляющие Q в направлении x или в плоскости xy и т. д.

Общепринятые обозначения

Здесь перечислены только обозначения, употребляемые многократно в неизменном значении. Остальные обозначения при необходимости объясняются в тексте, иногда с использованием тех же букв. Полужирным шрифтом выделены векторные величины.

- a — радиус Земли
- c — скорость движения циркуляционной системы, например волны
- c_p — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении
- c_v — удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме
- f — параметр Кориолиса $2\Omega \sin \varphi$
- g — ускорение силы тяжести
- h — 1) толщина слоя между двумя изобарическими поверхностями; 2) содержание ощутимости тепла на единицу массы
- k — 1) кинетическая энергия на единицу массы; 2) кривизна траектории
- k_m — кинетическая энергия зонально осредненного движения на единицу массы
- k_λ, k_φ — кинетическая энергия среднего зонального (λ) и меридионального (φ) движения на единицу массы
- k_s — кривизна линий тока
- n — расстояние в направлении, нормальном к направлению ветра или к специально оговоренной кривой
- p — давление
- q — 1) удельная влажность; 2) количество тепла на единицу массы
- r — 1) радиус в цилиндрической системе координат; 2) радиус кривизны течения
- s — расстояние вниз по течению вдоль линии тока

t — время
 u, v, w — восточная, северная и вертикальная составляющие скорости ветра
 x, y, z — расстояние на восток, север и вверх от уровня моря
 A — 1) площадь; 2) амплитуда волны
 A_e, A_m — интегральная вихревая или средняя доступная потенциальная энергия в заданном объеме
 A_s — амплитуда линий тока
 C — скорость горизонтального движения изолинии
 D — 1) дивергенция (горизонтальная, если с помощью индекса не оговорен другой ее вид); 2) скорость диссипации кинетической энергии в результате трения в определенном объеме
 E — 1) масса воды, испарившейся с земной поверхности за единицу времени с единицы площади; 2) статическая энергия ($C_p T + gz + Lq$)
 F_{xy}, F_{xz} — конвергенция вихревого потока восточного линейного количества движения в полярном или вертикальном направлении
 I — суммарная энергия в определенном объеме
 J — турбулентный поток абсолютного момента количества движения в направлении, определяемом индексом
 K — суммарная кинетическая энергия в определенном объеме
 K_e, K_m — интегральная кинетическая энергия вихревого или среднего движения в определенном объеме
 K_φ — перенос кинетической энергии через широту φ
 K_y — средняя кинетическая энергия меридионального движения, проинтегрированная по объему, ограниченному кругами широты и изобарическими поверхностями
 L — 1) длина волны (L_s — длина стационарной волны); 2) протяженность границы; 3) скрытое тепло испарения
 M — суммарный абсолютный момент количества движения в кольце, ограниченном двумя кругами широты и двумя изобарическими поверхностями
 $(M)_p$ — нисходящий поток массы через изобарическую поверхность над определенной площадью, занимаемой холодным воздухом
 M_r — абсолютный момент количества движения относительно оси циклона на единицу массы на расстоянии r от центра вращающейся системы
 $(M_r)_r$ — радиальный приток абсолютного момента количества движения через поверхность цилиндра на расстоянии r от центра вращающейся системы
 $(M_r)_z$ — восходящий поток абсолютного момента количества движения через изобарическую поверхность между двумя радиусами циркуляционной системы
 M_φ — абсолютный момент количества движения, переносимый в направлении к полюсу через широту φ между двумя изобарическими поверхностями
 M_z — суммарный вертикальный поток абсолютного момента количества движения через изобарическую поверхность над определенной площадью
 P — 1) масса осадков, достигающих земной поверхности за единицу времени на единицу площади; 2) общая потенциальная энергия в определенном объеме
 Q_a, Q_e — теплосодержание атмосферы или Земли
 R — газовая постоянная воздуха
 R_a, R_e, R_{ac} — средняя широтная результирующая радиация (превышение поглощаемой радиации над излучаемой) за единицу времени на единицу площади, получаемая атмосферой, Землей или системой Земля—атмосфера
 Q_s — перенос ощутимого тепла от земной поверхности в атмосферу за единицу времени на единицу площади
 T — температура (в некоторых случаях виртуальная температура)

ΔT — избыток температуры воздушной частицы в конвективном облаке по сравнению с температурой невозмущенной окружающей среды
 V — суммарная скорость ветра
 V_a — скалярная величина агеострофической скорости ветра $V_a = (V - V_g)$
 \mathcal{W} — энергия на единицу площади (исключая скрытое тепло)
 $\overline{\mathcal{W}}_\varphi$ — средний поток энергии, направленный к полюсу (исключая скрытое тепло), на единицу длины широтного круга в атмосфере или на Земле в зависимости от вторичного индекса a или e ; $\overline{\mathcal{W}}_{\varphi a}$ — то же, включая поток скрытого тепла
 α — удельный объем
 β — df/dy , изменение параметра Корнолиса в направлении к полюсу
 γ — вертикальный градиент температуры ($-\partial T/\partial z$)
 γ_a — сухо- или влажноадиабатический температурный градиент в зависимости от ненасыщения или насыщения воздуха
 ζ — относительная завихренность
 ζ_a — абсолютная завихренность ($f + \zeta$)
 ζ_θ — относительная завихренность на изэнтропической поверхности
 η — абсолютная завихренность ($f + \bar{v}_\theta/r + \partial \bar{v}_\theta/\partial r$) в симметричном циклоне
 Θ — потенциальная температура
 θ — угловая мера в цилиндрической системе координат, возрастающая в направлении циклонического вращения
 Θ_e, Θ_w — эквивалентно-потенциальная температура и потенциальная температура смоченного термометра
 λ — долгота
 μ — коэффициент турбулентной вязкости
 ρ — плотность
 σ — 1) вертикальный сдвиг $\partial u/\partial z$; 2) горизонтальная скорость ветра внутри конвективного облака; 3) площадь поверхности, ограничивающей определенный объем
 τ — горизонтальное напряжение трения
 φ — широта
 ψ — 1) функция тока Монтгомери ($c_p T + gz$); 2) угол между фронтальной и горизонтальной поверхностями; 3) наклон линий тока в вертикальной плоскости
 ω — вертикальная составляющая ветра ($\partial p/\partial t$) в изобарической системе координат
 Γ — вертикальный градиент температуры ($\partial T/\partial p$) в изобарической системе координат
 Γ_a — сухо- или влажноадиабатический вертикальный градиент температуры
 Φ — геопотенциал (gz)
 Ω — угловая скорость вращения Земли
 F — 1) функция фронтогенеза с составляющими F_x, F_y, F_z ; 2) сила трения на единицу массы
 \mathcal{F} — тензор напряжений вязкости Навье—Стокса

*

СРЕДНЯЯ СТРУКТУРА АТМОСФЕРЫ И СОХРАНЕНИЕ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ

Удобнее всего начать наше описание процессов атмосферной циркуляции с широкого обзора требований, удовлетворяющих сохранению количества движения и балансу энергии. Циркуляционные системы принимают такие формы, которые наиболее эффективны для возникновения и переноса этих свойств. Дальше будет показано, что наиболее характерные формы циркуляции меняются в соответствии с функциями, отвечающим условиям различных географических районов и сезонов. В связи с такими различиями в полях температуры, давления и ветра полезно будет ознакомиться со средним состоянием атмосферы прежде, чем заниматься природой ее возмущений.

Наиболее сжатый способ описания атмосферы — это представление ее средней структуры одним меридиональным разрезом, осредненным по земному шару от Северного до Южного полюса. Такая картина, конечно, может служить основой для обсуждения. Однако с достаточной убедительностью было показано, что осредненные условия на таком разрезе не могут быть удовлетворительно объяснены средними движениями воздуха в связи с существующими источниками и стоками тепла и количества движения. Это подчеркивал В. Бьеркнес с соавторами (V. Bjerknes e.a., 1933) в «Физической гидродинамике». Там доказывается, что общую циркуляцию невозможно объяснить, исходя из атмосферных течений, обладающих осевой симметрией относительно земного шара. Так, например, простая тороидальная циркуляция с восходящим движением в низких широтах и нисходящим движением в высоких привела бы на вращающейся Земле к исключительно большому зо-

нальным скоростям ветра в связующих меридиональных ветвях циркуляции. Наблюдаемый распад циркуляции в субтропиках и умеренных широтах на циклонические и антициклонические вихри рассматривался как необходимое условие преодоления этой трудности. Указывалось, что эти вихри обеспечивают значительную часть необходимого меридионального теплообмена именно благодаря асимметрии их термических свойств. Авторы «Физической гидродинамики» построили также схему упорядоченных вертикальных движений в ячейочной циркуляции, создающих возможность непрерывного преобразования потенциальной энергии в кинетическую.

Таким образом, очень важно принимать во внимание потоки упомянутых свойств, обусловленные *вихрями*, существующими в широком диапазоне размеров и типов. Эти вихри, будучи неустойчивыми и подвижными, сглаживаются при осреднении свойств атмосферы за значительный промежуток времени и по каждому широтному кругу. Очевидно также, что учет одних лишь вихрей даст только частичное представление о процессах. И средняя циркуляция, и атмосферные возмущения вносят существенный вклад в эти процессы и действуют совместно физически согласованным образом, удовлетворяя условиям сохранения энергии и количества движения.

1.1. Среднее меридиональное распределение температуры и ветра

В обоих полушариях (рис. 1.1) распределение средней температуры характеризуется ее понижением к полюсам в горизонтальном направлении (или на изобарической поверхности) на всех уровнях тропосферы, исключая слои выше 200 мб в тропиках. Общий контраст температуры между полюсом и экватором в тропосфере обоих полушарий в холодное время года больше, чем в теплое. Наиболее характерными чертами таких средних вертикальных разрезов являются сильная бароклинность в умеренных широтах и четкое разграничение между тропопаузой низких широт и тропопаузой умеренных и высоких широт.

Если учитывать изменения параметра Кориолиса с широтой, то поле среднего зонального ветра приблизительно согласуется с меридиональным распределением температуры. Это видно из рис. 1.2 (Mintz, 1954), на котором показаны средние зональные составляющие ветра в обоих полушариях для зимы и лета. Характерными особенностями этой схемы являются пояс восточного переноса в низких широтах и западные переносы в умеренных и высоких широтах. Тропический восточный перенос охватывает зону, ширина которой в нижних слоях атмосферы превышает 60°, но с высотой уменьшается. В годовом ходе осевые линии пояса восточных ветров несколько перемещаются к северу и югу вместе с экваториальной ложбиной (экваториальной депрессией).

Зимой циркумполярные максимумы западных ветров особенно хорошо выражены вблизи уровня 200 мб и несколько смещены

*

От редактора	5
Предисловие	7
Список обозначений	11
1 Средняя структура атмосферы и сохранение общей циркуляции в северном полушарии	14
1.1. Среднее меридиональное распределение температуры и ветра	15
1.2. Сохранение момента количества движения в атмосфере	20
1.3. Количественные оценки потока момента количества движения	23
1.4. Сохранение зональной циркуляции	29
1.5. Генерация и перенос кинетической энергии	32
1.6. Общие выводы, относящиеся к меридиональному и вертикальному обмену моментом количества движения	35
Литература	36
2 Тепловой баланс земной атмосферы и меридиональный и вертикальный перенос энергии	39
2.1. Общие принципы, относящиеся к потоку и накоплению энергии	39
2.2. Средний годовой баланс энергии для всего земного шара	47
2.3. Баланс энергии в северном полушарии зимой и летом	54
2.4. Вертикальный поток тепла в северном полушарии зимой	63
2.5. Вертикальный поток тепла в тропиках	66
2.6. Вертикальный поток тепла во внетропических областях и соответствующая генерация кинетической энергии	68
2.7. Выводы, относящиеся к меридиональному и вертикальному обмену энергией	72
Литература	75
3 Сезонные и зональные изменения средней структуры атмосферы и систем воздушных течений	78
3.1. Осредненные системы воздушных течений в средней тропосфере	78
3.2. Средние сезонные структуры на меридиональных разрезах	84
3.3. Ветер и температура в высоких слоях атмосферы	89
3.4. Сезонные характеристики поля ветра в верхней тропосфере	95
3.5. Распределение циклонов и антициклонов	104
Литература	110
4 Основные воздушные массы и фронты, струйные течения и виды тропопauses	114
4.1. Основные типы воздушных масс	115
4.2. Полярный фронт и полярнофронтовое струйное течение	121
4.3. Субтропическое струйное течение и «субтропический фронт»	124
4.4. Схема характерной структуры атмосферы	125
Литература	128

5 Теория полярного фронта и зарождение синоптической аэрологии	130
5.1. Краткий исторический обзор	131
5.2. Теория полярного фронта	134
5.3. Семейства циклонов	139
5.4. Связь семейств циклонов с общей циркуляцией атмосферы	140
5.5. Ранние исследования высотной структуры циклонов	143
5.6. Связь между высотными волнами и приземными возмущениями	145
Литература	148
6 Связь внетропических возмущений с высотными волнами	152
6.1. Планетарный контроль высотных волн	152
6.2. Бароклинные волны	156
6.3. Дивергенция и вертикальная скорость в реальных возмущениях	159
6.4. Длинные и короткие волны и их связь с синоптическими возмущениями	162
6.5. Трехмерные движения и меридиональный обмен воздушными массами	168
6.6. Примеры волн различного масштаба	171
6.7. Концепция бокового перемешивания	175
Литература	177
7 Термическая структура фронтов и соответствующее поле ветра	179
7.1. Фронты как поверхности разрыва или переходные слои	179
7.2. Наклон поверхности разрыва нулевого порядка	182
7.3. Наклон поверхности разрыва первого порядка	184
7.4. Обобщенная структура атмосферы вблизи полярного фронта	186
7.5. Различные интерпретации фронтов и тропопаз	191
7.6. Упрощенная термическая структура возмущения на полярном фронте	193
7.7. Синоптический пример фронтальной структуры фронта в волне большой амплитуды	195
7.8. Дополнительные соображения относительно фронтов	199
Литература	204
8 Основные струйные течения тропосферы	205
8.1. Общие свойства струйных течений	205
8.2. Системы, связанные с высотными волнами	211
8.3. Природа и размеры струйных течений	216
8.4. Крупномасштабные характеристики субтропического струйного течения	222
8.5. Сходимость и расходимость течений в основных системах ветра	225
8.6. Детализированная структура субтропического струйного течения	229
8.7. Тропическое восточное струйное течение	236
8.8. Струйное течение низких уровней	238
8.9. Обобщенное представление о струях во вращающихся жидких системах	241
Литература	242

