

Мельников В.П.,  
Смутьский И.И.  
Механизмы  
атмосферных  
вихрей//Криосфера  
Земли.-1997, х.1,№.1.-  
С.87-96.

## АТМОСФЕРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

УДК 532.527+551.515.3+551.345

### МЕХАНИЗМЫ АТМОСФЕРНЫХ ВИХРЕЙ

В. П. Мельников, И. И. Смутьский

*Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия*

Анализ литературных источников и выполненных нами экспериментальных исследований указывает на решающую роль явления стока вращающейся среды в возникновении вихрей разных масштабов, в том числе и в атмосфере Земли. Важным в научном и практическом отношении являются механизмы формирования циркуляции: при стоке среды с подпиткой; при асимметричном стоке успокоенной среды; при относительном движении стока и при стоке атмосферного воздуха, взаимодействующего с вращающейся планетой. В последнем случае выявляются особенности развития энергии вихрей в аридных и гумидных условиях и их значительная роль в латеральном, в том числе и в трансконтинентальном перемещении разнотемпературных воздушных масс, что не может не отражаться на параметрах многолетней мерзлоты планеты. Очевидно также, что зимние антициклоны с их доминирующим влиянием выхолаживания поверхности благоприятствуют развитию многолетней мерзлоты. В то же время циклоны, продуцирующие обильные снегопады, способствуют предохранению земных недр от сильного переохлаждения.

*Вихри, криосфера, стоковый механизм, образование, циркуляция, энергия стока, изоморфизм*

#### THE MECHANISMS OF THE ATMOSPHERIC VORTEXES

V. P. Melnikov, J. J. Smulsky

*Institute of Earth's Cryosphere, 625000, Tyumen, P.O. 1230, Russia*

The analysis of the experimental researches fulfilled by authors and background shows that the drainage phenomenon of the rotated medium has a decisive role in appearance of the different scales vortexes, including the Earth's atmospheric vortexes. In the scientific and practical aspects the formation mechanisms of circulation is important: at the drainage of liquid with feed; at the asymmetric drainage of previously immovable liquid; at the relative moving drainage and at the atmospheric air drainage interacting with a rotated planet. The features of development of vortexes energy in arid and humid conditions and their significant role in lateral transfer, including transcontinental transfer of the different temperature air flows, may be reflected on the permafrost parameters of planet. It is obviously also, that anticyclones with their winter radiation supercooling of the surface favour to permafrost development. At the same time cyclones, especially in the winter, producing plentiful snowfall, promote protection earthly entrails from strong supercooling.

*Vortex, cryosphere, drainage mechanism, formation, circulation, energy of drainage, isomorphism*

#### ВИХРЕВЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КРИОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Атмосфера играет весьма существенную роль в формировании облика Земли, в образовании криосферы, ее эволюции. Одним из механизмов ее воздействия являются вихри. Например, перенос циклонами снежных масс в Западной и Средней Сибири способствует увеличению теплоизолирующего зимнего покрова. А выхолаживание подстилающей поверхности в период зимних антициклонов в Восточной Сибири способствует понижению температуры подстилающей поверхности. В других условиях обильный снежный покров может в результате

затягивания периода снеготаяния приводить к образованию снежников, ледников и вечной мерзлоты. Это и сейчас наблюдается в горных районах, например вблизи Байкала, и, возможно, в прошлом было одним из механизмов наступления ледниковых эпох.

Вихревые процессы часто приводят к аномальным изменениям погоды. Например, продолжительное потепление в первой половине декабря 1971 г. на 5°—6° выше средней, осуществлялось с помощью циклонов, которые перемещались по северу Европы в течение нескольких

недель и достигали Восточной Сибири [Погосян, 1976]. В другом случае мощный антициклон, в котором, как известно, существует ясная погода и отрицательный радиационный баланс, в конце января 1972 г. привел к резкому похолоданию на территории от Гренландии до юга Кавказа и Средней Азии. Например, температура в г. Кушка упала до  $-25^{\circ}\text{C}$ . Такие аномалии часто наблюдаются. Возможно, что известные в истории случаи замерзания Черного моря были обусловлены влиянием мощных антициклонов.

Циклоны и антициклоны в северном полушарии [Погосян, 1976] обеспечивают перенос теплых и влажных масс воздуха с юга на север, а холодных и сухих — с севера на юг. Аналогичное происходит и в южном полушарии. Специалисты [Погосян, 1976] считают, что если бы не осуществлялся непрерывный обмен воздуха между низкими и высокими широтами, то в тропиках была бы невыносимая жара, а в высоких и средних широтах стояли бы сильные морозы и нулевая изотерма сместилась бы более чем на  $10^{\circ}$  к экватору. Таким образом, при пониженном межширотном обмене, средняя температура поверхности может значительно понизиться и начнется формирование многолетнемерзлых пород. Поэтому смена циркуляции атмосферы в прошлом могла также приводить к наступлению ледниковых эпох.

Приведенные рассуждения свидетельствуют, что без вихревого переноса структура криосферы была бы существенно иной. Поэтому изменение условий на земной поверхности, ведущее к уменьшению или увеличению энергии вихрей, приводит к изменениям в криосфере Земли. Эти условия могли изменяться в прошлом, могут изменяться в будущем, в том числе благодаря деятельности человека. Например, формирование вихрей связано с альбедо земной поверхности, ее влажностным режимом, на которые может оказывать влияние деятельность человека при распашке целинных земель, вырубке лесов, осушении болот и т. д. Поэтому без изучения природы атмосферных вихрей, вскрытия механизмов их возникновения невозможно понять механизмы формирования криосферы Земли в прошлом и предсказать ее поведение в будущем. Сейчас значение вихревых процессов не представляет сомнений и они включены в такие глобальные проекты изучения Земли, как например „Экос-А“ [Аванесов и др., 1992].

### ГЛОБАЛЬНЫЕ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ

Вихри являются одними из замечательных феноменов природы. Они образуются в атмосфере, в водной среде, наблюдаются на других планетах, например, на Юпитере. Звезды образуют

спиральные структуры — галактики, движение в которых напоминает вихревое. Не исключено, что элементарные частицы, как это предполагают многие исследователи, являются вихревыми структурами. По-видимому, наибольшее влияние на жизнь оказывают вихревые явления в атмосфере. Это и повседневно несущие нам дождь или ясную погоду циклоны и антициклоны, это и более редкие явления, но грозные и приносящие бедствия — тропические тайфуны и смерчи. Посредством вихрей, через атмосферу, на Землю оказывает влияние Солнце, а, возможно, и другие небесные тела. Впервые на это обратил внимание алтайский любитель-метеоролог А.В.Дьяков [Дьяков, 1974]. Наблюдая за солнечными пятнами, он определял циклональную и антициклональную деятельность, а через нее погоду и катастрофические ураганы на всем земном шаре. В настоящее время влияние солнечной активности на вихревые процессы в атмосфере становится предметом исследований [Аванесов и др., 1992].

Земля при своем движении в межпланетной космической среде взаимодействует с ней через свою атмосферу. Ее орбитальное движение со скоростью 30 км/с переходит к нулевой скорости среды в некоторой области, по-видимому, частично увлекаемой Землей. В этой области происходит суточное вращение Земли с окружной скоростью на экваторе около 0.5 км/с. В нижнем слое атмосферы эта скорость вначале растет по закону квазитвердого вращения, затем по достижению максимума она должна уменьшиться до нуля на границе увлекаемой области.

Однако вокруг многих вращающихся тел [Цессевич, 1984], в том числе и Земли, в экваториальных областях находится дисперсное вещество, которое образует диски, подобные кольцам Сатурна [Блюх и др., 1991] или Урана. Движение частиц происходит с окружной скоростью (первой космической), которая у поверхности Земли приближается к 8 км/с, что в 16 раз больше приземной скорости атмосферы на экваторе. Если бы во всем этом пространстве среда была однородной, то такая атмосфера вблизи экватора вращалась бы быстрее, чем поверхность Земли. Но плотность атмосферы с удалением от Земли падает, поэтому воздействие экваториаль-

**Таблица 1. Периоды вращения атмосферы небесных тел на разных широтах**

| Небесное тело | Периоды обращения            |                  |                  |
|---------------|------------------------------|------------------|------------------|
|               | Экватор                      | Умеренные широты | Полярные области |
| Юпитер        | 9ч 50 мин                    | 9 ч 55 мин       |                  |
| Сатурн        | 10 ч 14 мин                  | 10 ч 38 мин      |                  |
| Венера        | 4 суток (в обратную сторону) | 243,16 суток     |                  |
| Солнце        | 25,38 суток                  |                  | 34 суток         |

Таблица 2.

Периоды кругосветного обращения объектов в атмосфере Земли относительно ее поверхности

| Наблюдаемый объект                   | Высота, км | Широта                 | Период, сут. | Направление    | Источник                          |
|--------------------------------------|------------|------------------------|--------------|----------------|-----------------------------------|
| Облако вулкана Эль-Чигон, 4.04.82 г. | 16—30      | Экваториальная область | 21           | Восток — Запад | [Комплексный мониторинг..., 1986] |
| Воздушный шар, 1983 г.               | 17—34      | Ю°—25° ю.ш.            | 53           | Восток — Запад | [Первый кругосветный..., 1984]    |
| Зонд                                 | 16         | 30°—60° ю.ш.           | 12           | Запад — Восток | [Борисенков, 1982]                |

ного диска на вращение атмосферы сильно уменьшается. Тем не менее для многих планет прослеживается [Цессевич, 1984] более быстрое вращение экваториальных слоев атмосферы по сравнению со слоями на высоких широтах (табл.1). Например, экваториальные слои Солнца в 1,34 раза вращаются быстрее полярных. Экваториальные слои Венеры вращаются еще быстрее и даже в другую сторону.

Для нижней стратосферы Земли характерно другое изменение скорости по широте. По разным данным [Борисенков и др., 1982; Комплексный мониторинг..., 1986; Первый кругосветный..., 1984], представленным в табл.2, видно, что экваториальные слои атмосферы вращаются медленнее поверхности Земли, а в умеренных широтах — быстрее. Об этом также свидетельствует постоянный западный перенос атмосферных явлений на средних широтах. Вполне возможно, что более высокие слои земной атмосферы, как на других планетах, в области экватора вращаются быстрее. Имеются данные [Манк и др., 1964], что атмосфера вращается быстрее Земли, например, средний период ее равен 23 ч 38 мин, в то время как период вращения Земли — 23 ч 56 мин.

Итак, имеется рассогласование скоростей вращения приземной атмосферы. Оно может приводить к таким серьезным последствиям как глобальная смена циркуляции атмосферы с существенным изменением климата планеты. Предпосылкой этому может быть изменение в прошлом направления магнитного поля Земли, если оно обусловлено вращением атмосферы или

океана, как это предполагают отдельные авторы. Рассогласование скоростей может приводить и к локальным сменам циркуляции атмосферы, например, таким как Эль-Ниньо [Гущина и др., 1993] в тропиках, во время которой западные ветры меняются на восточные, что, в свою очередь, создает катастрофические засухи в Африке и ливни в Индии.

Таким образом, вращающаяся Земля в космическом пространстве инициирует вокруг себя вращающуюся в виде вихря атмосферу. Более отдаленные части среды в экваториальной плоскости имеют на порядок большую окружную скорость, которая должна сопрягаться со скоростью, обусловленной вращением Земли. Дополнительно на все эти движения накладывается солнечный ветер, а также орбитальное движение Земли в межпланетной среде.

В высоких широтах воздушные массы охлаждаются, оседают и растекаются к экватору. Их окружная скорость, направленная с запада на восток, меньше окружной скорости земной поверхности, поэтому они имеют восточное направление, создавая северо-восточный приземный пассат в северном полушарии и юго-восточный — в южном. Нагретые в экваториальной зоне воздушные массы в верхнем ярусе направляются к полюсам. Вследствие более высокой окружной скорости они приобретают на умеренных широтах западное направление, формируя юго-западные антипассаты в северном полушарии и северо-западные — в южном [Шталь, 1965]. Этот межширотный обмен циркуляцией воздушных масс приводит к отставанию вра-

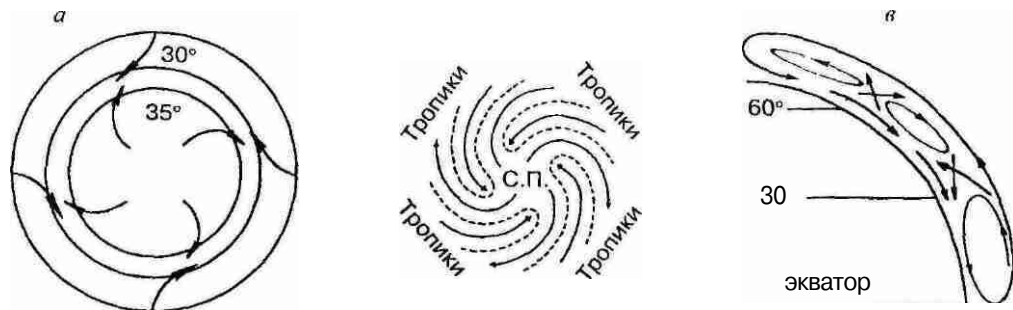


Рис. 1. Схемы циркуляции атмосферы в северном полушарии [Пальмен и др., 1973; Шталь, 1965].

щения атмосферы в экваториальной зоне, то есть к устойчивому восточному переносу (табл.2) и к опережению, то есть к западному переносу — в умеренных широтах. Вследствие теплообмена и фазовых переходов водяного пара происходит изменение температуры движущихся воздушных масс, меняется их высота. Поэтому на широтах 30—35° происходит встреча пассатных и антипассатных течений (рис.1,а) или они отдельными языками (см. рис.1,б) прорываются: холодные массы к экватору, а теплые — к полюсам [Пальмен и др., 1973]. На широтах 60°—70° у Земли происходит встреча языков теплого юго-западного потока с холодным северо-восточным потоком из Арктики (см. рис.1,0). На эту упрощенную схему циркуляции атмосферы накладывается воздействие подстилающей поверхности, различие между сушей и водной поверхностью и их взаимным влиянием друг на друга.

На стыке холодных и теплых потоков возникают крупные атмосферные вихри: циклоны и антициклоны. В процессе межширотной циркуляции атмосферы происходит обмен моментом количества движения. Некоторые исследователи считают [Пальмен и др., 1973], что основной перенос момента количества движения к полюсам осуществляется вихревыми потоками.

## ВИДЫ ВИХРЕВЫХ ДВИЖЕНИЙ И ИХ МАСШТАБЫ

Наблюдаемые в атмосфере вихри имеют различные размеры. В зависимости от масштаба принято их подразделять: на циклоны и антициклоны диаметром тысячи километров, на тропические циклоны (по-другому, ураганы, тайфуны, штормы) — сотни, смерчи (в англоязычной литературе — торнадо) — от десятых долей до единиц километров и пыльные вихри диаметром десятки метров.

Циклоны характеризуются циклическими изобатами на карте давления с понижением давления к центру, а в антициклонах давление к центру повышается. Ветры имеют тангенциальную составляющую, направленную в северном полушарии в циклонах — против часовой стрелки, в антициклонах — по часовой. В южном полушарии направление вращений обратное. Циклоны и антициклоны распространены в умеренных широтах.

В низких широтах возникают тропические циклоны (ТЦ) — вихри меньшего масштаба. Размер их активной зоны составляет 200 км по радиусу с глазом 10—50 км в центре [Зимин и др., 1992]. ТЦ возникают в областях с усиленными конвективными движениями в атмосфере. Падение давления и направление ветра у них такое же как у циклонов. Но скорости ветра чрезвычайно большие, до 100 м/с. Например, в

урагане „Алтай" (1977 г.) максимальная тангенциальная скорость ветра была 65 м/с, скорость подъема воздуха — 10 м/с [Шумс, 1985]. Максимум скорости ветра находится внутри максимума радиолокационной отражаемости в облачной стене глаза циклона. Интенсификация урагана связана со сжатием облачной стены. Отмечаются слабые нисходящие движения с экстремально теплым и сухим воздухом на внутренней части кромки стены „глаза". Если восходящий на периферии воздух сильно насыщен, то нисходящий воздух в центре — сухой и теплый [Шумс, 1985]. Безоблачный „глаз" с нисходящим движением наблюдается также в циклонах умеренных широт.

## СТОКОВЫЙ МЕХАНИЗМ АТМОСФЕРНЫХ ВИХРЕЙ

Многие особенности динамики атмосферных вихрей были установлены при исследовании течения в вихревых камерах [Смульский, 1992]. В вихревых камерах (см. рис.2,а) среда с начальной закруткой движется с периферии, затем через центральное отверстие в одной из торцевых крышек она истекает из камеры. При движении к центру за счет сохранения момента количества движения тангенциальная скорость среды растет, достигает максимума и стремится к нулю в центре. Большие тангенциальные скорости вблизи оси вихря могут существовать при малых скоростях на периферии. Например, максимальная тангенциальная скорость в камере может превышать периферийную скорость в 45 раз [Смульский, 1992]. По радиусу вихря давление падает к его центру и при больших скоростях наблюдаются большие градиенты давления, которые в смерчах являются одним из разрушительных факторов. Например, если давление в центре смерча падает до 90 кПа и смерч набегаёт на здание, в котором сохраняется атмосферное давление (100 кПа), то на каждый метр поверхности здания действует нагрузка в 1 т и здание разрушается. В то же время вблизи с разрушенным зданием могут находиться объекты, на которые смерч не оказал никакого воздействия.

В центре вихря (см. рис. 2,б) образуется противоток с расходящимся от центра потоком [Смульский, 1992]. Именно такие потоки создают глаз циклона [Наливкин, 1970]. В некоторых случаях по центральной линии прохождения смерча остаются вдавленные в земную поверхность предметы, например спрессованный слой соломы из разбросанного вихрем стога или ветки деревьев [Наливкин, 1970]. Этот эффект может быть обусловлен противотоком. Скорость противотока, складываясь со скоростью падения предметов в поле силы тяжести, будет приводить

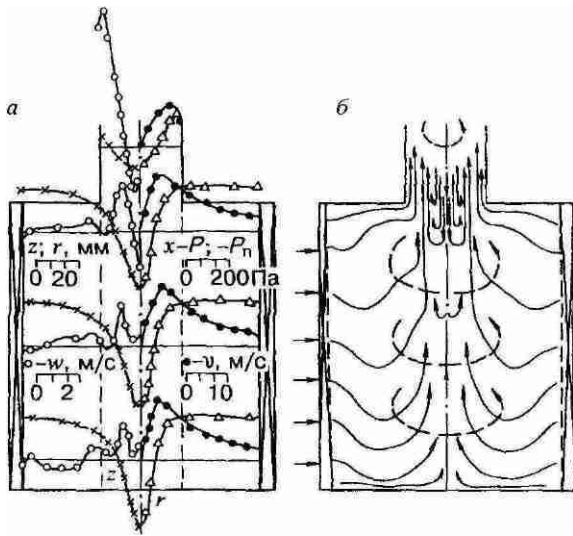


Рис. 2. Профили скорости и давления (а) и схема течения (б) в боковой камере с боковым вдувом.

$P, P_n$  — статическое и полное давления,  $v, w$  — тангенциальная и осевая скорости

к внедрению их в поверхность грунта. Наблюдается сильная электризация вращающегося слоя частиц в вихревой камере и электрические разряды в ней [Смульский, 1992], которые идентичны электрическим явлениям (вспышки молний по каналу смерча, радиоволновые излучения), возникающим в смерчах.

В вихревых камерах вращающаяся среда стекает к центру. Аналогичный стоковый механизм образования вращающихся воронок имеет место при стоке воды из резервуара. Атмосферные вихри образуются таким же образом: перегретые у поверхности слои воздуха, обладая большей плавучестью, истекают вверх через канал меньшего размера чем область стока. Это истечение продолжается до тех пор, пока весь перегретый слой воздуха не иссякнет. В отличие от резервуара здесь точка стока, а следовательно и атмосферный вихрь могут перемещаться относительно земной поверхности.

В вихревой камере первоначальная закрутка потоку сообщается на ее периферии за счет тангенциального входа. При стоке жидкости и атмосферы первоначальная закрутка формируется разными обстоятельствами, которые будут рассмотрены ниже. В вихревой камере сток среды происходит за счет перепада давления между входом и выходом, в резервуаре — за счет сил тяжести, а в атмосфере — за счет сил плавучести. Таким образом, стоковый механизм образования вихрей включает две составляющие: ме-

ханизм образование первоначальной закрутки и механизм движущей силы стока или энергетики вихря.

### МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ЦИРКУЛЯЦИИ

Некоторые случаи возникновения вихрей более часто проявляются при движении воды, например вращающиеся воронки. Наблюдение их образования позволяет выделить два случая истечения жидкости: истечение с подпиткой и без подпитки. При несимметричной подпитке втекающий со скоростью  $u$ , элементарный объем жидкости относительно центра стока имеет момент количества движения, интегрируя который по всему объему втекающей жидкости получим циркуляцию [Смульский, 1997], т.е. момент количества движения единицы массы жидкости, в виде:

$$\Gamma = u_1 R_a \tag{1}$$

где  $R_a$  — среднее прицельное расстояние струи до центра стока. Изменяя параметр  $R_a$  можно создать воронку разной интенсивности и вращающуюся в любом направлении.

Истечение жидкости из резервуара без подпитки может быть при успокоенной и неуспокоенной жидкости. Если  $M_0$  — суммарный момент количества движения неуспокоенной жидкости относительно центра стока, то после открытия отверстия истечение будет совершаться с вращением при циркуляции:

$$\Gamma = M_0 / m, \tag{2}$$

где  $m$  — масса жидкости в резервуаре.

В случае истечения успокоенной жидкости после открытия отверстия жидкость в нем свободно падает. Вследствие непрерывности среды к отверстию стока начинает двигаться кольцевой слой, равноудаленный от центра стока. Так как в силу асимметрии расположения отверстия равноудаленные слои на некотором радиусе разрываются границами резервуара несимметрично, то интегрирования по всему объему резервуара дает следующее выражение для полного момента количества движения:

$$M = GS_a,$$

где

$$S_a = \frac{1}{h} \int_0^h \int_{\varphi_0}^{\varphi_f} r_c^2 d\varphi dz; \tag{4}$$

$G$  — массовый расход жидкости через отверстие;  $\varphi_0$  и  $\varphi_1$  — начальный и конечный полярные углы линий центров масс равноудаленных сечений;  $S_a$  — сечение асимметрии.

При относительном движении атмосферы и стока элемент воздушной массы относительно центра стока создает момент количества движения, после интегрирования которого по всему объему получено:

$$\vec{M} = m[(\vec{v}_s - \vec{v}_v) \times \vec{e}], \quad (5)$$

где  $m$  — масса воздуха в области стока;  $v_s$  — скорость области;  $v$  — скорость центра стока;  $e$  — смещение центра стока относительно центра области.

Циркуляция  $\Gamma$  с помощью (3) и (5) рассчитывается по формуле (2). По этой величине  $\Gamma$  могут быть определены [Смольский, 1992] скорость вращения воронки, ее профиль или профиль давления в вихре. С помощью (3) — (5) в ряде случаев легко могут быть определены ситуации возникновения вихрей и направление вращения воздуха в них [Смольский, 1992].

Механизм образования циркуляции за счет вращения Земли рассматривается на примере стока кольцевого слоя атмосферы, центр которого находится на широте  $\langle p_0 \rangle$ . На элемент кольца действует сила Кориолиса, которая относительно центра стока создает момент. Интегрируя его по всей области стока от периферийного радиуса  $R_2$  до радиуса стока  $L$ , получаем суммарный момент сил, действующий на стекающую среду. Момент сил приводит к циркуляции стекающей среды:

$$\Gamma = -(-1)^c 0,5(R_2^2 - R_1^2) \omega \sin \varphi_0. \quad (6)$$

Из выражения видно, что для циклонального движения ( $c = 1$ ) циркуляция в северном полушарии ( $\langle p_0 \rangle > 0$ ) будет положительна, т. е. направление вращения против стрелки часов, а в южном ( $\langle p_0 \rangle < 0$ ) — в обратном направлении. Для антициклона ( $c = 2$ ) направления вращения будут противоположными.

Рассмотренные механизмы формирования циркуляции могут приводить к образованию вихрей разных масштабов. При некоторых особенностях рельефа местности могут формироваться вихри, обусловленные истечением с подпиткой. Небольшие вихри, визуализированные пылью, иногда образуются в солнечную безветренную погоду. Их циркуляция может быть обусловлена механизмом истечения без подпитки (3), где истекающей вверх средой является область перегретого слоя воздуха.

Образование мощных смерчей часто сопровождается значительными ветрами, например, 2 июня 1980 г. смерчам на Украине сопутствовало перемещение зоны облачности со скоростью 50 км/час [Байбаков и др., 1986]. Поэтому основной механизм образования их циркуляции обусловлен относительным движением эксцентричного стока (5). Например, торнадо с циркуляцией  $\Gamma = 30100 \text{ м}^2/\text{с}$  [Wan et al., 1972] может

образоваться при относительной скорости  $v_s - v = 15 \text{ м/с}$  и эксцентриситете  $e = 2 \text{ км}$ . При движении стока и изменении его положения может появляться циркуляция, усиливаться или ослабевать, и даже изменяться направление вращения воздуха на обратное. Такие вариации имеют место при образовании смерчей. Так 9 июня 1984 г. [Андрюшин и др., 1986] в областях Центральной России смерчи внезапно возникали и исчезали, и направление вращения могло быть разным. А в северном Уэльсе 23 ноября 1985 г. за период около пяти часов зарегистрировано 105 торнадо. Циркуляция (6), обусловленная вращением Земли, становится существенной при больших областях стока, например на широте  $\langle p_0 \rangle = 45^\circ$  вихри с радиусом  $R_2$  будут иметь циркуляции

|                                |    |                  |                  |                  |
|--------------------------------|----|------------------|------------------|------------------|
| $R_2, \text{ км}$              | 1  | 10               | 100              | 1000             |
| $\Gamma, \text{ м}^2/\text{с}$ | 26 | $2,6 \cdot 10^3$ | $2,6 \cdot 10^6$ | $2,6 \cdot 10^9$ |

Пыльные вихри и смерчи с областью стока  $R_2 < 1 \text{ км}$  имеют циркуляцию порядка  $\Gamma = 600\text{—}2000 \text{ м}^2/\text{с}$  [Мартыненко и др., 1984], а тайфун при  $R_2 = 500 \text{ км}$ ,  $\Gamma = 6,6 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$ . Откуда следует, что циркуляция, обусловленная вращением Земли, становится основным механизмом образования таких больших атмосферных вихрей как циклоны, антициклоны, тропические штормы и большие торнадо. Из (6) следует, что в удаляющихся от экватора циклонах циркуляция будет возрастать и следовательно ветры будут усиливаться. Эти явления действительно имеют место в природе [Байбаков и др., 1986; Хриган, 1978]. Из (6) также следует, что циркуляция при стоке среды на экваторе ( $\langle \varphi \rangle = 0$ ) будет равна нулю и вихри на экваторе появляться не будут. Это также подтверждается [Полюян, 1976; Покровская и др., 1994]. На рис. 3 видно, что хотя в экваториальной области перегрев атмосферы наибольший, из 832 случаев зарождения тропических циклонов за 10 лет ни один из них не образовался на экваторе и в  $5^\circ$  широты вблизи него.

Образование циркуляции вихрей может быть обусловлено сочетанием нескольких механизмов. При этом момент количества движения одного вихря может переходить к другому. Например, в наблюдаемых из космоса океанических вихрях [Гинсбург и др., 1986], среда (см. рис.4,а) может вытекать из вихря 1 в одном направлении, а не равномерно. Затем при своем дальнейшем движении сосредоточенная струя разделяется и образует другой вихрь 2. Часть вытекающей струи при этом образует пару малых вихрей 3 и 4. Таких пар вихрей может образовываться даже несколько. Их называют грибовидными течениями в океане [Гинсбург и др., 1984]. Образование этих вихрей обусловлено

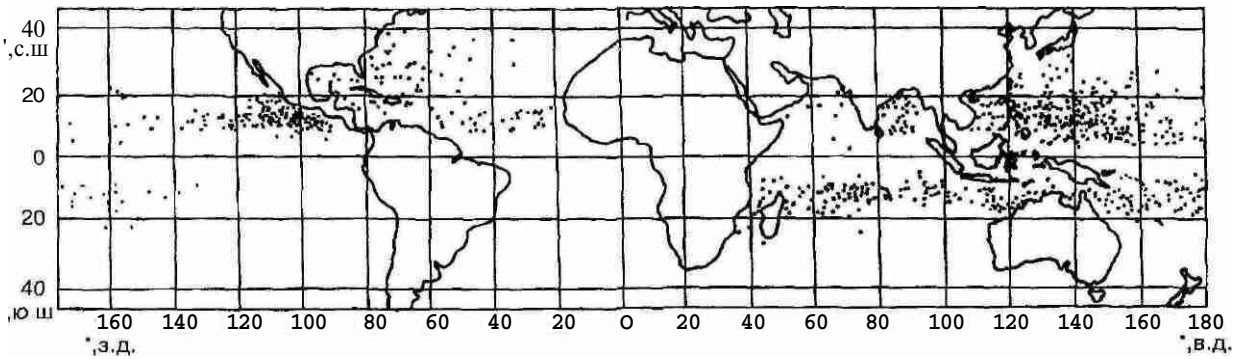


Рис. 3. Очаги зарождения тропических циклонов за 10 лет (1983—1992) [Покровская и др., 1994].

стоком среды с подпиткой, причем подпитывающий поток выходит из другого вихря.

Формирование вихрей втеканием или вытеканием из них сосредоточенных потоков возможно и в атмосфере. На рис. 4,б видно формирование циклона в Сибири 23.03.77 потоком воздушных масс, проходящих западнее Байкала 7. А на рис. 4,а воздушные массы с антициклона на западе от Байкала формируют циклон севернее Обской губы. Такие картины образования больших циклонов свидетельствуют, что здесь также имеет место механизм формирования циркуляции при стоке среды с подпиткой. Этот механизм может усиливать циркуляцию (9), обусловленную стоком на вращающейся Земле.

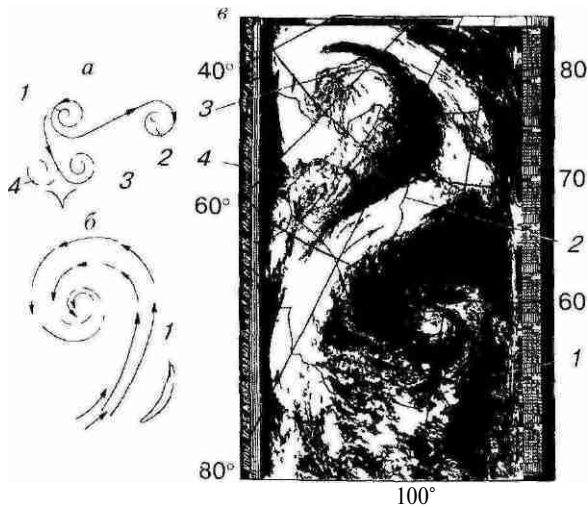


Рис. 4. Формирование естественных вихрей при стоке среды с подпиткой:

а — в океанах [Гисбург и др., 1986], б — циклона в атмосфере 23.03.77 г. северо-западнее Байкала (1); в — перетекание 11.08.77 г. воздушных масс из антициклона в циклон: 1 — Байкал; 2 — Енисей; 3 — Новая Земля; 4 — Обь. На рисунках направление течения предполагается.

Нам представляется, что рассмотренные механизмы образования циркуляции могут иметь место и при гравитационной аккреции массивов вещества при формировании планетарных систем и галактик. В качестве примера на рис. 5 приведены две пары взаимодействующих галактик [Гуревич и др., 1983; Sandage et al, 1994]. Здесь циркуляция создается стоком вещества с подпиткой и момент количества движения от одной галактики переходит к другой. При этом у галактик на рис. 5,а переход момента импульса происходит при одинаковых направлениях их вращения как и для вихрей 1 и 3 на рис. 4,а. А для галактик на рис. 5,б обмен циркуляциями происходит при разных направлениях вращения подобно океаническим вихрям 1 и 2 на рис. 4, а и атмосферным на рис. 4,б. Если это так, то одна из галактик скручивается (циклонального типа), а другая — раскручивается (антициклонального типа). Представленные исследования и примеры свидетельствуют о наличии изоморфизма вихревых явлений разных макромасштабов. Возможно, он распространяется и на микромасштабы.

Итак, рассмотренные четыре механизма формирования циркуляции: сток с подпиткой, сток без подпитки в несимметричной области, движущийся сток и сток на вращающейся Земле могут создавать атмосферные вихри разных масштабов. Чтобы рассмотреть движущую силу стока, перейдем к анализу свойств атмосферы по ее высоте.

## ЭНЕРГЕТИКА АТМОСФЕРНЫХ ВИХРЕЙ

Рассмотрим вначале сухую атмосферу. Пусть с высоты  $H_1$  объем воздуха с давлением  $P_1$  и температурой  $T_1$  по каким-либо причинам (вертикальные пульсации скорости Дч, местный перегрев  $AT$ , взаимодействие теплого и холодного фронтов и т. п.) поднялся на высоту  $H_2 > H_1$  где давление атмосферы  $P_2 < P_1$  и ее температура

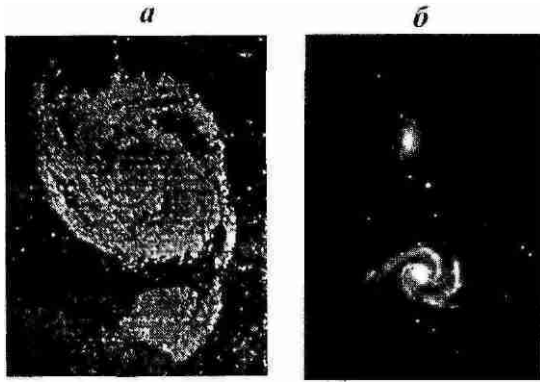


Рис. 5. Переход момента количества движения при взаимодействии:

а — галактики в созвездии Гончих Псов [Гуревич и др., 1983];  
 б — галактик NGC5426 и NGC5427 [Sandage et al, 1994].

$T_2 < T_2$  В результате адиабатического расширения температура объема  $T_u$  уменьшится. Если  $T_u > T_j$ , то плотность объема будет меньше и он продолжит подъем, такая стратификация атмосферы является неустойчивой. Если же  $T_u < T_j$ , то более холодный поднявшийся объем снова опустится. Это будет устойчивая атмосфера. Условие устойчивости можно записать в виде:

$$\Phi(H_1) > \Phi(H_2), \quad (7)$$

где

$$\Phi(H) = \frac{(P/P_e)^{(k-1)/k}}{T/T_e}, \quad (8)$$

$k$  — коэффициент адиабаты воздуха;  $P_e = 1,013 \cdot 10^5$  Па и  $T_e = 288,15$  К — давление и температура на поверхности Земли при стандартных условиях. Из (7) следует, что устойчивой атмосфере соответствует монотонно падающая с высотой функция  $\Phi(H)$ .

Условия для стока нижнего слоя атмосферы вверх могут возникнуть, если потенциал  $\Phi(H)$ , будет не монотонной функцией и на какой-то высоте  $H_\phi$  достигнет максимального значения  $\Phi_{\max}$ . Тогда малое возмущение переведет небольшой приземный объем на высоту  $H_\phi$  и этот объем продолжит движение вверх. В силу непрерывности среды будут приведены в движение прилегающие к этому объему слои, а затем и весь приземный слой начнет истекать в образовавшийся канал. Такое всплывание пузырей теплого воздуха образует кучевые облака хорошей погоды во второй половине летнего дня. В отличие от облаков, при образовании вихрей вся область перегретого воздуха не всплывает одновременно,

а непрерывно истекает через канал меньшего размера, чем размер области. Представим, что это истечение происходит под воздействием внешней силы, которую выразим через давление, эквивалентное давлению в вихревой камере и вынуждающее воздух двигаться в ней.

Если просуммировать все силы плавучести, действующие на элементы столба атмосферы высотой  $H_\phi$  и отнести их к его площади, то получим [Смольский, 1992] потенциальное давление, действующее на весь столб воздуха  $H_\phi$ :

$$\Delta P_p = a_h \frac{g P_\phi (P_e/P_\phi)^{\frac{k-1}{k}} H_\phi}{RT_e} \int_0^{H_\phi} (\Phi_{\max} - \Phi) dH, \quad (9)$$

где  $a_h$  — коэффициент, введенный для учета нерасчетных условий;  $R$  — универсальная газовая постоянная. Из (9) видно, что движущая сила стока, как бы эквивалентна разности потенциалов, поэтому величина  $\Phi(H)$  названа потенциалом атмосферы.

Для конкретной ситуации, за 4 часа до возникновения смерчей 9 июня 1984 г., потенциальное давление стока  $\Delta P = 678$  Па. Если бы у поверхности Земли объем воздуха радиусом  $R_1$  получил импульс движения вверх, то давление реализовалось бы и обеспечило истечение приземного слоя вверх. При наличии циркуляции  $\Gamma$  такое истечение будет происходить с вращением, т. е. образуется атмосферный вихрь. В этом случае течение в атмосфере можно сопоставить с течением в вихревой камере радиусом  $R_2$  с выходным отверстием  $r_p$  в которой избыточное давление равно  $\Delta P$  и циркуляция  $\Gamma$ . По этим параметрам с помощью методики [Смольский, 1992] можно рассчитать профили скорости и давления в атмосферном вихре.

При вертикальных перемещениях влажного воздуха в нем происходят фазовые превращения водяного пара, воды и льда. С учетом только фазовых превращений водяной пар — вода были выполнены расчеты влияния влажности на потенциальное давление стока  $\Delta P$ . Было получено, что превышение потенциального давления стока влажной атмосферы над этим давлением сухой атмосферы составит  $a_h = \Delta P / \Delta P = 2,57$ . Поэтому это значение можно использовать для оценки влияния влажности на потенциальное давление стока.

## БОЛЬШИЕ АТМОСФЕРНЫЕ ВИХРИ

В соответствии с рассмотренным механизмом образования циркуляции и движущей силы стока формируются вихри разных масштабов. Движущей силой стока всех вихрей является потенциальное давление стока. Циркуляция малых вихрей обусловлена рассмотренными ме-



ханизмами асимметрии истечения, больших — стоком на вращающейся Земле.

Для неустойчивой атмосферы с  $\Phi_{\text{так}}$  на высоте  $H_{\phi}$  смещение объема вниз будет приводить к его адиабатическому нагреву. Но при этом температура объема будет ниже температуры окружающего воздуха и опускание его будет продолжаться. Поэтому возможно истечение слоя воздуха с высоты  $H_{\phi}$  в приземные высоты. При наличии циркуляции образуется антициклональный вихрь. Стоковый нисходящий механизм в больших масштабах образует антициклон. Опускающийся сухой и более холодный воздух в антициклоне имеет большую плотность по сравнению с окружающим. Поэтому давление в центре антициклона больше чем на периферии. По-видимому, в некоторых случаях за счет нисходящего движения могут образовываться мелкомасштабные вихри, в том числе и смерчи.

Многие авторы выделяют циклон или антициклон по направлению вращения, например, вращающееся образование за стрелки часов в северном полушарии считается антициклональным [Гинсбург и др., 1986]. Либо циклон и антициклон различают по градиенту давления: в циклоне — пониженное давление к центру, в антициклоне — повышенное. Однако направление вращения и градиент давления не являются абсолютно неизменными признаками. Направление вращения может быть разным как у одного типа вихря, так и у другого. Только у больших вихрей, циркуляция которых обусловлена вращением Земли, направление будет в северном полушарии против стрелки часов у циклона и по стрелке — у антициклона. Что касается градиента давления, то как показывают исследования лабораторных вихрей [Смульский, 1992], он тоже может быть разным. Например, при больших отношениях тангенциальной скорости к осевой (см. [Смульский, 1992], рис.4.29), давление в центре сходящегося вихря может повышаться. С другой стороны, в созданных для пылеулавливания антициклонах, при высоких степенях закрутки [Смульский, 1992] давление к центру понижается. Поэтому характеристика направления стока: сходящийся (конвергентный) у циклона и расходящийся (дивергентный) у антициклона является абсолютным их признаком. Образование вихря сопровождается втеканием и вытеканием среды. Втекающий в приземном слое воздух растекается в верхнем слое циклона, т. е. образует антициклональное течение. Расходящееся в приземном слое течение воздуха в антициклоне сопровождается его опусканием в центральной области. Поэтому над антициклоном образуется циклональное течение, которому характерно стоковое движение воздуха к центру. Таким образом над антициклоном формируется циклон, а над циклоном — антициклон. Кроме

того, противоток в центре циклона, образующего его глаз, в приземном слое представляется расходящимся течением. Поэтому приземный циклон может сопровождаться небольшим приземным антициклоном в области глаза циклона. На снимках из космоса [Байбаков и др., 1986] такие циклоны, преимущественно тропические, представлены темным глазом, в виде круглой дыры в сплошной облачности, имеющей концентрическую структуру.

Наблюдаются также циклоны, в которых облачность организована в спирально-кольцевую структуру, с достаточно большими безоблачными просветами. Это обусловлено более сложной структурой таких циклонов. Расходящийся верхний воздух, в результате фазовых переходов водяного пара, может оказаться тяжелее окружающих слоев и начнется его опускание. В этом случае нарушается радиальный перенос момента импульса, поэтому может быть несколько максимумов на профиле тангенциальной скорости, что и наблюдается. Например, в урагане Гилберт (11—15 сентября 1988 г.) наблюдали два максимума вертикальной скорости, которые свидетельствуют о наличии таких циркуляционных ячеек [Блэк и др., 1993]. Наряду с простой структурой циклона: „сток — подъем — отток“, вертикальная структура ТЦ может быть еще более сложной: „сток — подъем — опускание — подъем — опускание — подъем — опускание — подъем — отток“ [Грей, 1985]. Все это при наличии циркуляции. Такая ячеистая структура циклона приводит к спирально-кольцевой структуре облачности: в кольцах с восходящим движением идет формирование облачности, а в кольцевых областях с нисходящим движением облачность отсутствует.

В настоящее время ведущими механизмами динамики атмосферы считаются горизонтальные движения. Принято считать, что горизонтальные потоки взаимодействуя между собой или с подстилающей поверхностью создают завихрения и вихри. Вертикальные движения в атмосфере при этом, на наш взгляд, недостаточно учитываются. В то же время, как мы видим, вертикальные стоковые движения создают вихри, которые, собственно и определяют погоду, определяют мощные ураганные ветры. По-видимому, вертикальные движения в атмосфере являются ведущими. Они во многих случаях являются первопричиной горизонтальных движений. Вся атмосфера заполнена вертикальными движениями разного масштаба. Она как будто кипит ими. Вертикальное потенциальное движение стока является побудительной силой горизонтальных ветров. Поэтому необходимо, на наш взгляд, более пристальное исследование вертикальных движений. Для этих целей эффективно может быть использована визуализация атмосферных течений с по-

мощью меток зондов с регулируемой эффективной плотностью [А. с., Смутьский и др.].

## Литература

Аванесов Г.А., Галеев А.А., Жуков Б.С. и др. Проект „Экос-А“: научные космические исследования и построение моделей глобальных экологических и климатических процессов и природных кризисных ситуаций // ИЗиК. 1992, №2, с. 3—14.  
 А.с. 1313204 СССР. Способ измерения параметров атмосферы и устройство для его осуществления / И.И.Смутьский, А.Б.Немировский. МКИ G 01 W 1/08; В 64 В1/40.  
 Андрушин А., Быстрова З. По следу смерча// Природа и человек, 1986, № 4, с. 43—45.  
 Байбаков С.Н., Мартынов А.И. С орбиты спутника — в глаз тайфуна. М.: Наука, 1986, 176 с.  
 Блюх П.В., Ярошенко В.В. Спицы в кольце Сатурна // Природа, 1991, № 4, с. 19—25.  
 Блэк П., Литинецкий А.В. Поля метеовеличин в урагане Гилберт — по данным измерений самолетов-лабораторий// Метеорология и гидрология, 1993, № 2, с. 27—37.  
 Борисенков Е.П., Альтер-Залик Ю.Ж., Кузнецов А.Д. Зондирование атмосферы метеорологическими аэростатами. Л.: Гидрометеоздат, 1982, 175 с.  
 Гинзбург А.И., Федоров К.Н. Некоторые закономерности развития грибовидных течений в океане, выявленные путем анализа спутниковых изображений // ИЗК, 1984, № 6, с. 3—13.  
 Гинзбург А.И., Федоров К.Н. О поверхностной циркуляции вод в субарктической фронтальной зоне (по данным ИСЗ )// ИЗК, 1986, № 1, с. 8—13.  
 Грей В.М. Генезис и интенсификация тропических циклонов // Интенсивные атмосферные вихри. М: Мир, 1985, с. 10—31.  
 Гуревич Л.Е. Чернин А.Д. Происхождение галактик и звезд. М.: Наука, 1983, 192с.  
 Гушина Д.Ю., Семенов Б.К. Планетарная перестройка ячеек тропической циркуляции атмосферы в период кульминации Эль-Нинье 1982—1983 гг. // МиГ, — 1993, № 10, с. 5—13.  
 Дьяков А.В. Использование информации об активности солнца в гидрометеорологическом прогнозировании на длительные сроки (1940 г.—1972 г.)//Солнечно-атмосферные связи в теории климата и прогнозах погоды. Л.:Гидрометеоздат, 1974, с. 307—313.

Зимин В.Д., Клепиков И.Н., Лазарев А.А. и др. Исследование крупномасштабных вихревых потоков экологически опасного характера в земной атмосфере // ИЗиК, 1992, № 1, с. 3—10.

Комплексный мониторинг воздействий вулканического аэрозоля на атмосферу и климат. Экспресс-информация. Сер. 37.21, вып.3, 1986, с. 18.

Манк У., Макдональд Г, Вращение Земли. М. 1964 г. (см. Сидоренков Н.С. Неравномерность вращения Земли и движение полюсов//Природа, 1982, № 4.)

Мартыненко О.Г., Соловьев А.А., Солодунин А.Д. Самоорганизация в турбулентных вихревых образованиях. Минск: препринт ИГМО, 1984, № 25, с. 39.

Наливкин Д.В. Ураганы, бури, смерчи. Л.: Наука, 1970, 487 с.

Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1973, 616 с.

Первый кругосветный полет монгольфьера // Природа, 1984, № 10, с. 118—119.

Погосян Х.П. Циклоны. Л.: Гидрометеоздат, 1976, 148 с.  
 Покровская И.В., Шарков Е.А. Исследование пространственно-очаговой структуры тропического циклогенеза применительно к задачам спутникового мониторинга // Исследование Земли из космоса. 1994, № 4, с. 3—12.

Смутьский И.И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. Новосибирск: Наука, 1992, 301 с.

Смутьский И.И. Стоковая теория смерча // ИФЖ, 1997, № 2.  
 Хргиан А.Х. Физика атмосферы в 2-х т. Л.: Гидрометеоздат, 1978.

Цесевич В.П. Что и как наблюдать на небе. М.: Наука, 1984, 304 с.

Шитс Р.С. О структуре ураганов по данным исследовательских самолетов-лабораторий // Интенсивные атмосферные вихри. М.: Мир, 1985, с. 48—65.

Шталь В.А. Физика атмосферы. М.: Знание, 1965, 40 с.  
 Sandage A., Bedke J. Carnegie Atlas of Galaxies. Carnegie Institution of Washington, 1994, 750 p.

Wan C.C., Chang C.C. Measurement of the velocity field in a simulated tornado — like vortex using a three — dimensional velocity probe// J. of the Atmospheric Science, 1972, vol. 29, No. 1, p. 116—126.

Поступила в редакцию  
5 февраля 1997 г.