

Мельников В.П., Смульский И.И. Вихревые явления в атмосфере /Деп. в ВИНТИ 21.04.97 - N1304-B97. - 45с.

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ КРИОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

УДК 532.527+551.515.3+551.345

В.П. Мельников, И.И. Смульский

ВИХРЕВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

№ 1304-B97 ДЕП.

© ВИНТИ, 1997 г.

Тюмень - 1997

1. 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 $5-6^\circ$ выше средней, осуществлялось с помощью циклонов, которые перемещались по северу Европы в течение нескольких недель и достигали Восточной Сибири [1]. 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 Кушке упала до -25°C . Такие аномалии часто наблюдаются. Возможно, что известные из истории случаи замерзания Черного моря были обусловлены влиянием мощных антициклонов.

Циклоны и антициклоны в северном полушарии [1] 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 [1] считают, что если бы не осуществлялся непрерывный обмен воздуха между низкими и высокими широтами, то, как следует из рис.1, 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° 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.

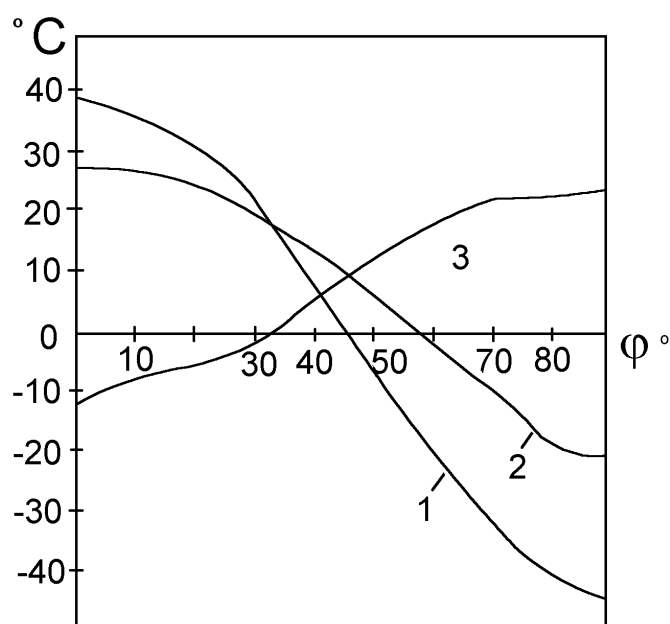


Рис.1. Средняя температура земной поверхности в зависимости от широты [1].

1- рассчитанная из условия лучистого равновесия;

2- действительно наблюдаемая;

3- разность между ними.

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 изменению криосферы 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 оказать 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" [2].

2. Глобальные циркуляции атмосферы

Вихри являются одними из замечательных феноменов природы. Они наблюдаются 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 вихревые структуры, как это предполагают многие авторы, образуют элементарные частицы. 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 пристальное внимание алтайский любитель-метеоролог А.В. Дьяков [3]. 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 одним из пунктов глобальной программы исследований [2].

Земля, двигаясь 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, и окружная скорость среды падает от скорости 0.5 км/с, которую имеет поверхность Земли на ее экваторе, до нулевой на границе области. Скорость земной поверхности изменяется по широте φ как

$$v_{\varphi} = R_e w_e \cos \varphi$$

где $w_e = 0.73 \cdot 10^{-4}$ 1/сек - угловая скорость вращения Земли;

$R_e = 6372$ км - средний радиус Земли.

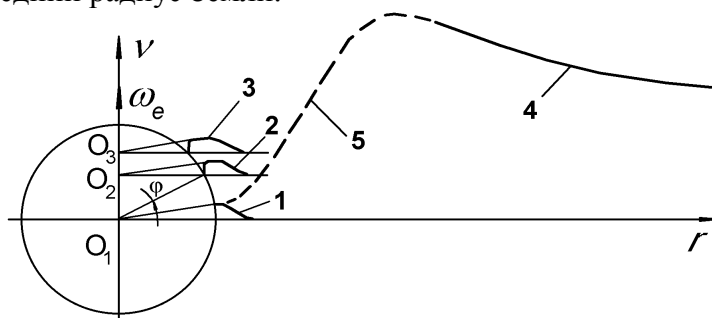


Рис. 2. Окружные скорости в атмосфере Земли.

Размеры приземного слоя атмосферы искусственно увеличены.

1,2,3- на разных широтах, вызванные вращением Земли.

4- окружная скорость частиц на равновесной орбите;

5- возможная окружная скорость отдаленных слоев атмосферы.

С удалением от оси вращения окружная скорость для твердого тела растет как $u = \omega r$. Но для газообразной атмосферы этот рост сохранится как некоторая тенденция, после которой скорость вращения газа начнет уменьшаться. Поэтому профили окружной скорости атмосферы на разных широтах должны иметь качественный вид, представленный на рис. 2.

Вокруг многих вращающихся тел [4], в том числе и Земли в экваториальных областях находится дисперсное вещество, которое образует диски, подобные кольцам Сатурна [5] или Урана. Движение частиц, находящихся в этих дисках, без учета аэродинамических сил определяется равенством между гравитационным ускорением $w_g = GM_e / r^2$ и центробежным $w_c = v^2 / r$. Отсюда получаем следующую зависимость для равновесной окружной скорости частиц от радиуса

$$v_r = \sqrt{GM_e / r}$$

где G - гравитационная постоянная;

M_e - масса Земли.

У поверхности Земли эта скорость приближается к 8 км/с, что в 16 раз больше скорости ее поверхности на экваторе, а с удалением равновесная скорость уменьшается и на радиусе, равном 6 земных радиусов, сравнивается с квазитвердой u . 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 экваториального диска на вращение атмосферы сильно уменьшается. Тем не менее для многих планет прослеживается [4] более быстрое вращение экваториальных слоев атмосферы по сравнению со слоями на высоких широтах (см. табл. 1). Как видно из таблицы, экваториальные слои Солнца в 1.34 раза вращаются быстрее

Табл.1

Периоды вращения атмосферы небесных тел на разных широтах

Небесное тело	Периоды обращения		
	Экватор	Умеренные широты	Полярные области
Юпитер	9 ч 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

полярных. Экваториальные слои Венеры вращаются еще быстрее и даже в другую сторону, но последние данные еще надежно не проверены.

Табл.2.

Периоды кругосветного обращения объектов в атмосфере Земли относительно ее поверхности

Наблюдаемый объект	Высота, км	Широта	Период, сутки	Направление	Источник
Облако вулкана Эль-Чигон 4.04.82 г.	16-30	экв. Область	21	восток-запад	[6]
Воздушный шар, 1983 г.	17-34	10°-25° ю.ш.	53	восток-запад	[7]
Зонд	16	30°-60° ю.ш.	12	запад-восток	[8]

Для нижней стратосферы Земли характерно другое изменение скорости по широте. По разным данным, 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 и для других планет, в области экватора вращаются быстрее. Имеются сообщения, 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 [9].

Итак, имеется рассогласование скоростей вращения приземной атмосферы. Оно может приводить к таким серьезным последствиям как глобальная смена циркуляции атмосферы с существенным изменением климата планеты. Подтверждением этому могут 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-Нинье [10] в тропиках, во время которой западные ветры меняются на восточные, что в свою очередь создает катастрофические засухи в Африке и ливни в Индии.

Следует отметить взаимодействие атмосферы с космической средой, обусловленное потоком частиц, испускаемых Солнцем. Это солнечно-радиальный поток плазмы со скоростью порядка 300 – 400 км/сек, который подобно электрическому ветру в электрофильтрах, оказывает механическое воздействие на атмосферу Земли, деформирует ее, вытягивая в теневую область (см. рис. 3) [11]. В такой плазменной каверне, обтекаемой солнечным веществом, происходит скольжение слоев атмосферы вокруг вращающейся Земли. Оно может приводить к усилению восточных ветров утром и западных ветров вечером.

Таким образом, вращающаяся Земля в космическом пространстве инициирует вокруг себя вращающуюся в виде вихря атмосферу, скорость в которой убывает с удалением от Земли. Более отдаленные части среды в экваториальной плоскости имеют на порядок большую окружную скорость (см. рис.2), которая должна сопрягаться со скоростью, обусловленной вращением Земли. Дополнительно на все эти движения накладывается солнечный ветер, а также орбитальное движение Земли в межпланетной среде.

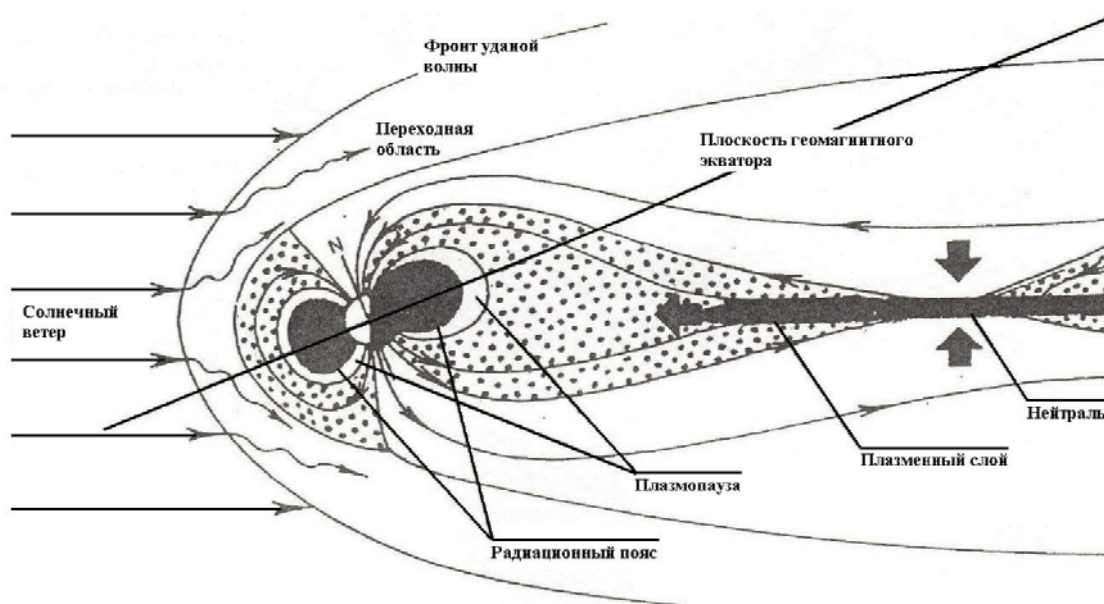


Рис. 3. Деформация земной атмосферы солнечным ветром [11].
Размеры Земли искусственно увеличены в 2-3 раза

Кроме прямого механического воздействия Солнца на атмосферу существуют и косвенное, посредством теплового. Солнечная радиация приводит к перегреву и подъему атмосферных масс в экваториальной зоне. 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 (см. рис. 4). 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 [12]. Этот межширотный обмен циркуляцией воздушных масс приводит к отставанию вращения атмосферы в экваториальной зоне, т. е. к устойчивому восточному переносу (см. табл.2) и к опережению, т. е. к западному переносу - в умеренных широтах. Вследствие теплообмена и фазовых переходов водяного пара происходит изменение температуры движущихся воздушных масс, изменяется их высота. Поэтому на широтах 30-35° происходит встреча пассатных и антипассатных течений (см. рис.5а) или они отдельными языками (см. рис.5б) прорываются: холодные массы к экватору, а теплые – к полюсам [13]. На широтах 60 - 70° у Земли происходит встреча языков теплого юго-западного потока с холодным северо-восточным потоком из Арктики (см. рис.5в). 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 [13], что основной перенос момента количества движения к полюсам осуществляется вихревыми потоками.

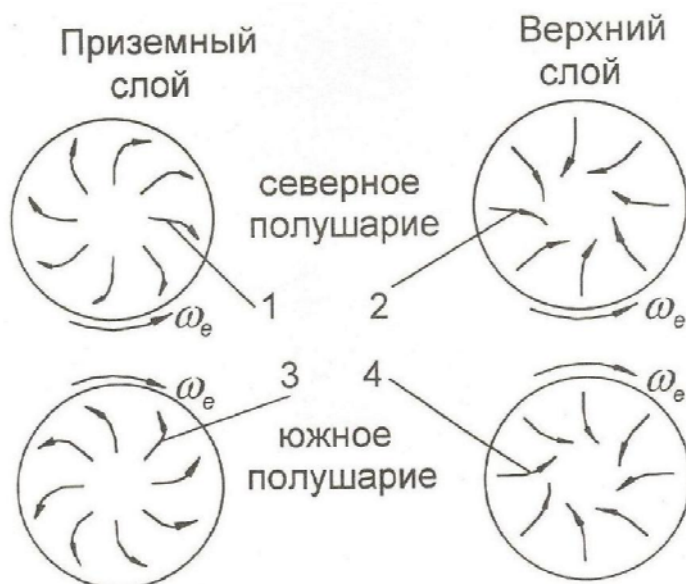


Рис. 4. Пассатные течения в атмосфере Земли при межширотном обмене:

- 1- северо-восточный приземный пассат;
- 2- юго-западный антипассат;
- 3- юго-восточный приземный пассат;
- 4- северо-западный антипассат.

3. 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, 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 давления 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 [14]. 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 [15]. 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 [15]. Безоблачный "глаз" с нисходящим движением наблюдается также в циклонах умеренных широт.

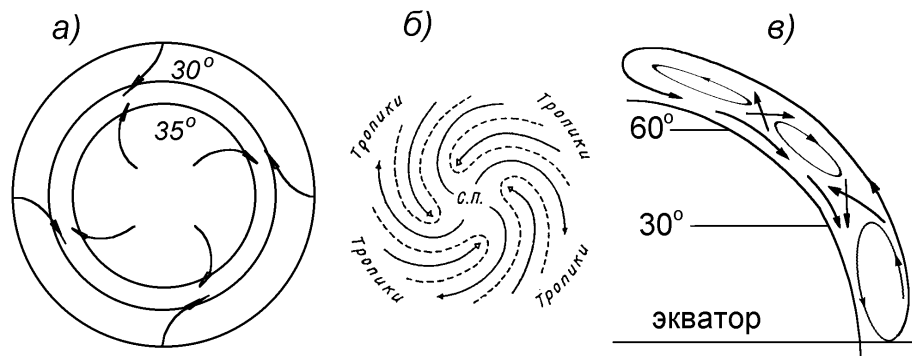


Рис. 5. Схемы циркуляции атмосферы в северном полушарии [12], [13].

4. Существующие представления об атмосферных вихрях.

В литературе отсутствует цельное описание явления атмосферного вихря. Один человек не в силах обозреть такое явление как циклон или тропический циклон. Он наблюдает лишь какую-то одну его часть, даже сторону или микроскопическую деталь. А для обзора явления в целом он вынужден привлекать наблюдения других, причем разными средствами (визуальные, радарные, аэрокосмические и т.д.) и разных свойств (осадки, облачность, давление, температура и т.п.). Практически всегда эти наблюдения даются в интерпретации сложившихся представлений (теплый или холодный фронт, барические образования: гребни, ложбины, седловины). Поэтому существует огромное поле для фантазии при объединении этих разнохарактерных сведений в одно описание атмосферного вихря. В связи

с этим представления разных авторов об атмосферном вихре сильно отличаются друг от друга. Хотя могут иметь одинаковые детали и составляющие механизмы, как, например, для циклона: сходящееся течение воздуха в нижней части, затем подъем с конденсацией влаги и расхождение в верхней части. Но интерпретация их, причина их возникновения и движущие силы представляются разнообразными способами.

В связи с этим не представляется возможным построить изучение атмосферных вихрей на основе их описаний, их анализе, систематизации типичных черт и их классификации, как обычно проводятся научные исследования. В данном случае важно создать базу экспериментальных фактов, т. е. фактов наблюдений, которые представят физическую картину явления, из каких простых физических процессов она складывается и в каких количествах. Такая фактическая база позволяет апробировать на ней различные теоретические модели.

Мы попытаемся более-менее достоверные сведения нанизать на скелет хорошо исследованного вихря, который образуется в вихревых и циклонных камерах, относительно процессов, в которых у специалистов существует более устойчивое понимание, чем для атмосферных вихрей

Из атмосферных вихрей наиболее известны циклоны и антициклоны. Синоптики ежедневно сталкиваются с ними в своей работе. Тропические циклоны менее изучены. Тем не менее, наибольший научный интерес вызывают они, а также вихри меньшего масштаба - смерчи. Отдельные тропические циклоны стали предметом специальных самолетных и радарных исследований [16]. Смерчам также посвящено множество различных гипотез об их механизмах возникновения.

Существуют некоторые общие представления об атмосферных вихрях, признаваемые многими специалистами [17], [18]. Детальное измерение ветра вокруг центров циклонических погодных систем почти всегда указывает на наличие стока в центр системы от поверхности Земли или океана вплоть до высоты 400 мбар, который обуславливает адвективный вынос влажностатической энергии через вертикальный тропосферный столб [19]. Сток воздуха в верхней атмосфере играет решающую роль в сохранении общего углового момента воздушных масс, который обуславливает рост тангенциальной скорости при приближении к центру атмосферного вихря. Специалистам не совсем ясна еще природа факторов, определяющих радиальные потоки и формы их развития [20]. Например, Щербинин Э. В. [21] предлагает электромагнитный механизм образования смерчей. Ряд исследователей, в том числе Яницкий И. Н. [22], связывает процесс зарождения смерчей с разломами в земной коре. Никулин В. В. [23] рассматривает термический механизм образования смерча, согласно которому усиление вращения жидкости над нагретой поверхностью может моделировать атмосферные вихри. В работе [24] предлагается механизм образования смерча за счет вертикальных колебаний воздуха. Авторами работы [25] предлагается механизм образования смерча за счет концентрации энергии турбулентных пульсаций. Симпсон Дж. [26] и другие авторы придерживаются гипотезы, согласно которой смерчи возникают, когда интенсивные горизонтальные вихревые трубки в нижней части пограничного слоя внезапно становятся вертикальными.

В большинстве работ, например [14], предлагается хаотический механизм образования атмосферных вихрей. Предполагается, что они носят вероятностный характер, например: отдельные вихревые возмущения, горизонтально и вертикально-расположенные, ориентируются и само организуются в один мощный вихрь-торнадо. Либо генезис ТЦ представляется как серия явлений, случайно возникающих из количественных флуктуаций обычных возмущений со своими вероятностями дальнейших изменений, постепенно увеличивающимися по мере развития [27]. Согласно такому представлению отдельные конвективные облака само организуются в тропический циклон. Для характеристики этого хаотического процесса авторы [14] вводят спиральность

$$H = (\vec{v} \cdot \text{rot} \vec{v})$$

Они считают, что тайфун черпает энергию от сравнительно мелкомасштабной атмосферной конвекции. А спиральность поля скорости в нем приводит к положительной обратной связи между вертикальной и горизонтальной циркуляциями, которая обеспечивает нарастание первоначальных малых вихревых возмущений.

Другие считают, что главным механизмом интенсификации вихрей в природе является растяжение вихревых трубок, обусловленное сдвигами в потоке [17]. Среди ряда западных ученых рассматриваются [19] разные разновидности теории УНВР (условная неустойчивость второго рода), предложенной Чарни и Элиассеном. В ней трение в пограничном слое рассматривается как основной фактор, определяющий радиальный поток и связанный с ними перенос влаги, необходимый для развития вихревой системы.

Во многих теоретических моделях [14], [26] анализируется появление завихренности $\vec{\zeta} = \text{rot} \vec{v}$, которая в частном случае квазитвердого вращения является угловой скоростью $w = v/r$. Исследуется ее развитие, усиление, как будто эта характеристика, подобно энергии или массе, должна быть присуща жидкости. В действительности, интегральной характеристикой вращения является циркуляция $\Gamma = ur$, которая представляет собой момент количества движения единицы массы. А это именно та характеристика, которая должна для замкнутой системы сохраняться. Если же она изменяется, то это свидетельствует о воздействии на систему внешних сил. Как раз вихрь характеризуется неизменной циркуляцией по радиусу $\Gamma = \text{const}$ и при этом тангенциальная скорость растет к центру как $v = \Gamma/r$. В таком вихре по радиусу сильно изменяется завихренность $\zeta = v/r = \Gamma/r^2$, поэтому она не может являться характеристикой вихря.

Метеорологи рассматривают поведение атмосферных вихрей на основании синоптических признаков: структуры барических полей, взаимодействие теплых и холодных фронтов, облачность и осадки и т. п. Однако многие из этих признаков являются не причиной, а следствием возникновения атмосферных вихрей. Поэтому без детального исследования вихревого движения невозможно понять механизмы образования вихрей.

5. Стоковый механизм атмосферных вихрей.

Несмотря на обилие метеорологических данных, результатов радарных и аэрокосмических методов исследования, отсутствует, на наш взгляд, центральная идея, которая могла бы увязать наблюдаемые явления в одну цельную картину. С другой стороны, вихревые камеры, созданные в 50-ые годы для изучения атмосферных вихрей, широко распространились в различных технологиях и образующийся в них вихрь достаточно хорошо исследован. Эти результаты практически не используются при анализе атмосферных вихрей, несмотря на то, что они позволяют объяснить многие их свойства. В вихревых камерах среда с начальной закруткой (рис.6а) 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 u в камере может превышать периферийную скорость в 45 раз [28]. 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 набегаем на здание, в котором сохраняется атмосферное давление (100 кПа), то на каждый м поверхности здания действует нагрузка в 1т и здание разрывается. В то же время вблизи с разрушенным зданием могут находиться объекты, на которые смерч не оказал никакого воздействия.

В центре вихря образуется противоток (см. рис.6а,6б) с расходящимся от центра потоком [28]. Именно такие потоки создают глаз циклона [29]. 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 [29]. Этот эффект может быть обусловлен противотоком. Скорость противотока, складываясь со скоростью падения предметов в поле силы тяжести, будет приводить к внедрению их в поверхность грунта. Наблюдается сильная электризация вращающегося слоя частиц в вихревой камере и электрические разряды в ней [28], 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: механизм образования первоначальной закрутки и механизм движущей силы стока или энергетики вихря.

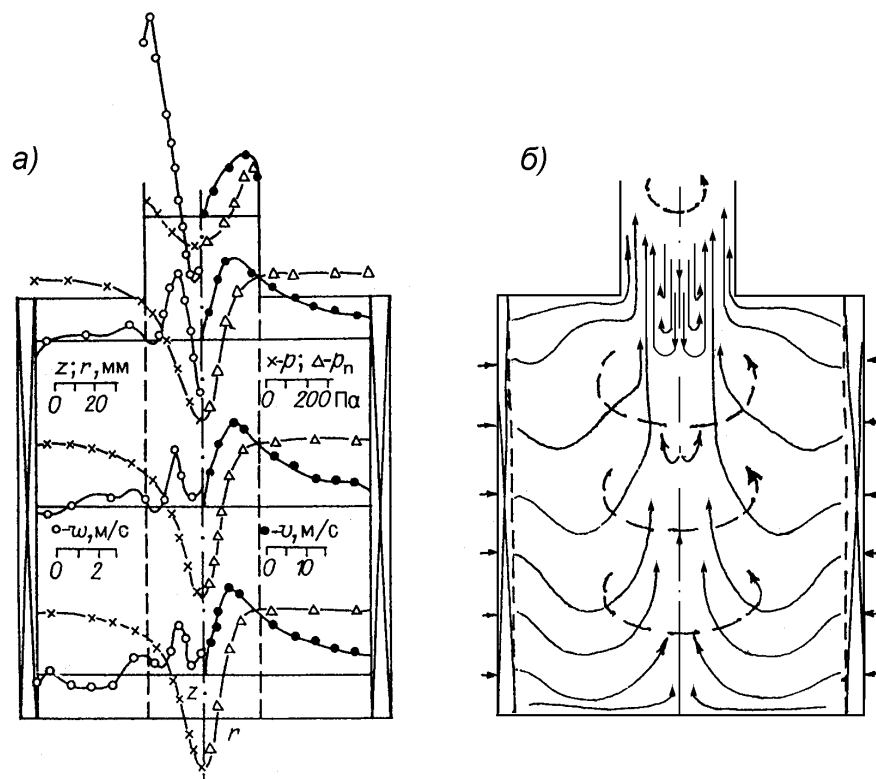


Рис. 6. Профили скорости и давления (а) и схема течения (б) в вихревой камере с боковым вдувом:
 p, p_n – статическое и полное давление;
 v, w – тангенциальная и осевая скорости.

6. Возникновение вращения при стоке жидкости

Наблюдение образования воронок позволяет выделить два случая истечения жидкости: истечение с подпиткой (рис.7а) и без подпитки (рис.7б). При неосесимметричной подпитке втекающий элементарный объем жидкости $dm = \rho h b d y$ относительно центра стока имеет момент количества движения

$$dM = dm u_i R_a \quad (1)$$

где u - средняя по сечению $h \cdot b$ скорость подпитки;

R_a - средний по расходу радиус сечения.

Тогда момент количества движения единицы массы жидкости будет

$$dM/dm = u_i R_a \quad (2)$$

В соответствии с этой циркуляцией образуется воронка над стоком. Изменяя периметр R_a можно создать воронку разной интенсивности и вращающуюся в любом направлении.

Истечение вращающейся жидкости через отверстие идентично движению среды в вихревой камере [28], в соответствии с которым изменение тангенциальной скорости и давления по радиусу воронки можно приближенно описать следующим образом:

$$v = \frac{2v_{\max} r / R_v}{1 + (r / R_v)^2}, \quad (3)$$

$$P = 2\rho v_{\max}^2 \left(0.5 - \frac{1}{1 + r^2 / R_v^2}\right) + C, \quad (4)$$

где R_v - расстояние от центра воронки O_1 до точки с наибольшей тангенциальной скоростью $v = v_{\max}$. Выражая константу C через давление в центре P_0 , определенное из (4), перепишем последнее так:

$$P - P_0 = 2\rho v_{\max}^2 \left(1 - \frac{1}{1 + r^2 / R_v^2}\right), \quad (5)$$

Заменяя P гидростатическим давлением $\rho g h$, где h - глубина поверхности воронки, получаем профиль воронки в виде:

$$h = h_0 - \frac{2v_{\max}^2}{g} \left(1 - \frac{1}{1 + r^2 / R_v^2}\right), \quad (6)$$

где h - глубина воронки в центре. Так как при $r \rightarrow \infty$ величина $h \rightarrow 0$, то из (6) глубина воронки будет:

$$h_0 = \frac{2v_{\max}^2}{g}. \quad (7)$$

Входящие в соотношения (6) и (7) параметры при $8.2 > u / w > 0.36$ 1 согласно [28] равны

$$v_{\max} = \frac{v_1 \left[1 + (R_1 / R_v)^2\right]}{2R_1 / R_v}; \quad v_1 = \frac{\Gamma}{R_1}; \quad w_a = \frac{Q}{\pi R_1^2}; \quad R_v = 3.5 \sqrt{\frac{v_1}{w_a}}, \quad (8)$$

где Q - объемный расход вытекаемой из отверстия жидкости.

Полученные выражения определяют глубину и профиль воронки в зависимости от параметров подпитки v_1 и R_a . Из (6) и (7) следует, что на половине глубины воронки ее радиус будет равен R_v . Тогда, согласно (3), поверхность воронки будет вращаться со скоростью v_{\max} . Выше и ниже скорость вращения воронки будет меньше. Полученные выражения (6) и(7) можно применять для определения параметров естественных вихрей, которые образуются в реках или океанах.

Истечение жидкости из резервуара без подпитки может быть при успокоенной и неуспокоенной жидкости. Если M_0 - суммарный момент количества движения

центров масс всех равноудаленных слоев образуют линию центров масс и т. к. они зависят от положения разрыва, то эта линия будет функцией угла φ т. е. $r_c = r_c(\varphi)$. Эта функция определяется положением отверстия и конфигурацией резервуара. Вектор количества движения равноудаленного слоя (13) направлен по касательной к этой линии. С учетом этого выражение (13) запишем в следующем виде:

$$d\vec{K} = dm_1 \frac{ur_c}{r \cos \beta} \vec{t}, \quad (14)$$

где t - орт касательной к линии $r_c(\varphi)$.

Тангенциальная составляющая $d\vec{K}$ относительно центра стока создает момент количества движения

$$d\vec{M} = d\vec{K}r \sin \beta = \frac{ur_c^2 dm_1}{r \cos \beta}.$$

Угол касательной β к линии центров масс $r(\varphi)$ можно выразить так

$$\operatorname{ctg} \beta = \frac{1}{r_c} \frac{dr_c}{d\varphi} = \frac{1}{r} \frac{dr}{d\varphi}.$$

Тогда после подстановки u , dm и $\operatorname{ctg} \beta$ момент количества движения будет

$$dM = \frac{Q\rho r_c^2 dz d\varphi}{h}.$$

Интегрируя это выражение по всем равноудаленным слоям резервуара и по высоте z , получим следующее выражение для полного момента количества движения:

$$M = GS_a, \quad (15)$$

где

$$S_a = \frac{1}{h} \int_0^h \int_{\varphi_0}^{\varphi_f} r_c^2 d\varphi dz, \quad (16)$$

$G = Qr$ - массовый расход жидкости через отверстие;

φ_0 и φ_f - начальный и конечный полярные углы линий центров масс равноудаленных сечений.

Величину S_a назовем сечением асимметрии. Как видно из (16), она определяется конфигурацией сосуда и положением отверстия стока.

Итак, в успокоенной жидкости за счет несимметричности истекания может возникнуть момент количества движения (15). В этом случае циркуляция определяется соотношением (9), а все параметры воронки - по (6) -(8). Для многих резервуаров линии центров масс и величины S могут быть оценены без расчетов, что позволяет сделать вывод о возможности образования воронки и направлении ее вращения. Полученные результаты подтверждаются известными [30] и выполненными нами экспериментами [28].

7. Образование циркуляции при относительном движении атмосферы и стока.

Рассмотрим истечение движущейся со скоростью v_s воздушной массы, ограниченной поверхностью S (рис. 7в), через отверстие с центром в т. O_1 , смещенное относительно центра области на расстояние e . Если скорость движения центра стока $\vec{v}_v = v_{vx}\vec{i} + v_{vy}\vec{j}$, то элемент воздушной массы $dm = \rho h \cdot dx \cdot dy$ относительно центра стока O_1 будет создавать момент количества движения

$$dM = dm(v_s - v_{vx})(e - y) - v_{vy} \cdot x dm. \quad (17)$$

Весь объем создает момент количества движения

$$M = \rho h \int_{-R-y_1}^R \int_{-y_1}^{y_1} [(\nu_s - \nu_{vx})(e - y) - \nu_{vx}x] dy dx,$$

где R - радиус области S ;

$y_1 = \sqrt{R^2 - x^2}$ - уравнение полуокружности, ограничивающей воздушную массу.

После интегрирования получаем выражение для момента количества движения

$$M = \pi R^2 h \rho e (\nu_s - \nu_{vx}),$$

которое в векторном виде можно записать так

$$\vec{M} = m [(\vec{\nu}_s - \vec{\nu}_v) x \vec{e}], \quad (18)$$

где m - масса воздуха в области S .

Возникающая циркуляция при стоке определяется соотношением (9), а по формулам (3), (4) и (8) при $C = 0$ можно определить параметры и профили тангенциальной скорости и давления в вихре.

С помощью (18) в ряде случаев легко могут быть определены ситуации возникновения вихрей и направление вращения воздуха в них [28].

8. Образование циркуляции за счет вращения Земли.

Рассмотрим сток атмосферы с центром в т. O , широта которого φ (см. рис. 8). Средняя радиальная стоковая скорость в точках кольца радиусом r будет:

$$u = (-1)^c \frac{Q}{2\pi r H}, \quad (19)$$

где H - высота кольцевого слоя,

c - индекс равный для стока 1 , для источника $c = 2$.

На элемент $dm = \rho H r dr d\alpha$ вследствие вращения Земли с угловой скоростью ω_e , действует сила Кориолиса:

$$d\vec{F}_c = 2dm [\vec{\omega}_e \times \vec{u}] = 2dm \omega_e u_R \vec{\tau}, \quad (20)$$

где $\vec{\tau}$ - единичный вектор, направленный по касательной в сторону вращения Земли;

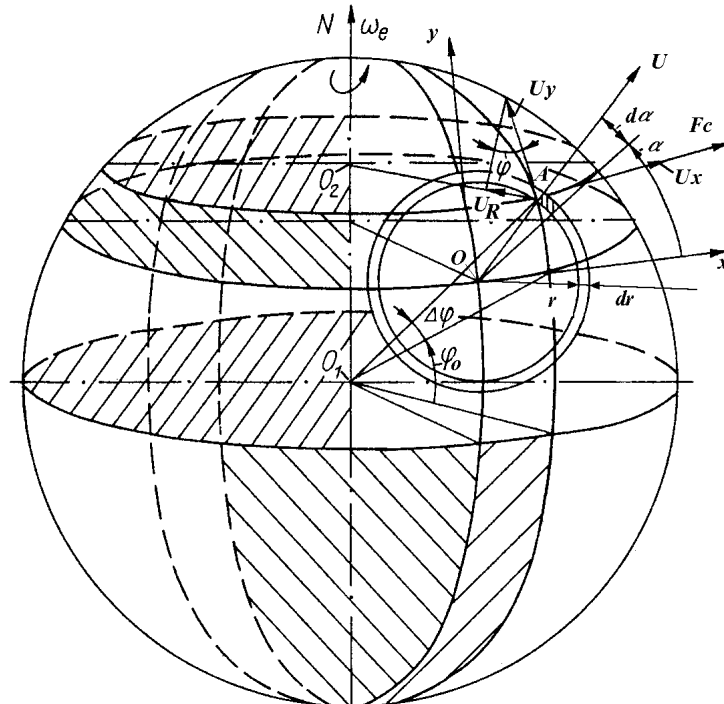


Рис. 8. Образование циркуляции при стоке атмосферы на вращающейся Земле.

$u_R = CB \cdot \sin \varphi = u \sin \alpha \sin \varphi$ - проекция скорости u на расстояние R до оси вращения Земли (см. рис. 8);

$$R = R_e \cos \varphi;$$

R_e - радиус Земли.

Широту φ элемента dm в т. А (см. рис. 8) можно выразить в следующем виде:

$$\varphi = \varphi_0 + \Delta \varphi \approx DB / R_e = \varphi_0 + r \sin \alpha / R_e.$$

Так как $\Delta \varphi \ll 1$, то выражение для u_R можно упростить

$$u_R \approx u (\sin \alpha \sin \varphi + \frac{r}{R} \sin^2 \alpha \cos \varphi_0). \quad (21)$$

Сила (20) относительно центра стока O создает момент $d\Omega = -dF_c r \sin \alpha$, который для всего кольца запишется в виде:

$$d\Omega = -2\rho\omega_e H u r^2 dr \int_0^{2\pi} \left(\sin^2 \alpha \sin \varphi_0 + \frac{r}{R_e} \sin^3 \alpha \cos \varphi_0 \right) d\alpha = -2\pi\rho\omega_e u r^2 \sin \varphi_0 dr. \quad (22)$$

Интегрируя (22) по всей области стока от периферийного радиуса R_2 до радиуса стока R_1 с учетом (19) получаем суммарный момент сил, действующий на стекающую среду

$$\Omega = -(-1)^c 0.5 G \omega_e \sin \varphi_0 (R_2^2 - R_1^2). \quad (23)$$

Из механики известно, что момент сил приводит к изменению момента количества движения для системы тел, а для проточной среды - к созданию потока момента количества движения, т. е. $\Omega = G\Gamma$. Откуда усредненная по времени и пространству циркуляция в стекающей среде будет

$$\Gamma = -(-1)^c 0.5 (R_2^2 - R_1^2) \omega_e \sin \varphi_0. \quad (24)$$

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

9. Механизмы циркуляции и естественные вихри.

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 (5), где истекающей вверх средой является область перегретого слоя воздуха.

Образование мощных смерчей часто сопровождается значительными ветрами. Так, 2 июня 1980 г. смерчам на Украине сопутствовало перемещение зоны облачности со скоростью 50 км/час [31]. Такие вихри являются движущимися. Поэтому основной механизм образования их циркуляции обусловлен относительным движением эксцентричного стока (7). Например, торнадо с циркуляцией $\Gamma = 30100$ м/с [32] может образоваться при относительной скорости $(v_s - v_v) = 15$ м/с и эксцентриситете $e = 2$ км. При движении стока и изменении его положения может появляться циркуляция, усиливаться или ослабевать, и даже изменяться вращение воздуха на обратное. Такие вариации имеют место при образовании смерчей. Так 9 июня 1984 г. [22] 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 (9), обусловленная вращением Земли, становится существенной при больших областях стока, например на широте $\varphi = 45^\circ$ вихри с радиусом R будут иметь циркуляции

R , км	1	10	100	1000
Γ , м ² /с	26	$2.6 \cdot 10^3$	$2.6 \cdot 10^5$	$2.6 \cdot 10^7$

Пыльные вихри и смерчи с областью стока $R_2 < 1$ км имеют циркуляцию порядка $\Gamma = 600-2000$ м²/с [25], а тайфун $R \approx 500$ км - $\Gamma = 6.6 \cdot 10^6$ м²/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 (9) следует, что в удаляющихся от экватора циклонах циркуляция будет возрастать и, следовательно, ветры будут усиливаться. Эти явления действительно имеют место в природе [33]. Например, тропические циклоны при своем удалении от экватора усиливаются, а после достижения наибольшей широты ослабевают и затихают [31]. Как видно из (9) циркуляция при стоке среды на экваторе ($\varphi = 0$) будет равна нулю, и вихри на экваторе появляться не будут. Это также подтверждается [1], [34]. Как видно, из рис. 9, несмотря на то, что 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° широте вблизи него.

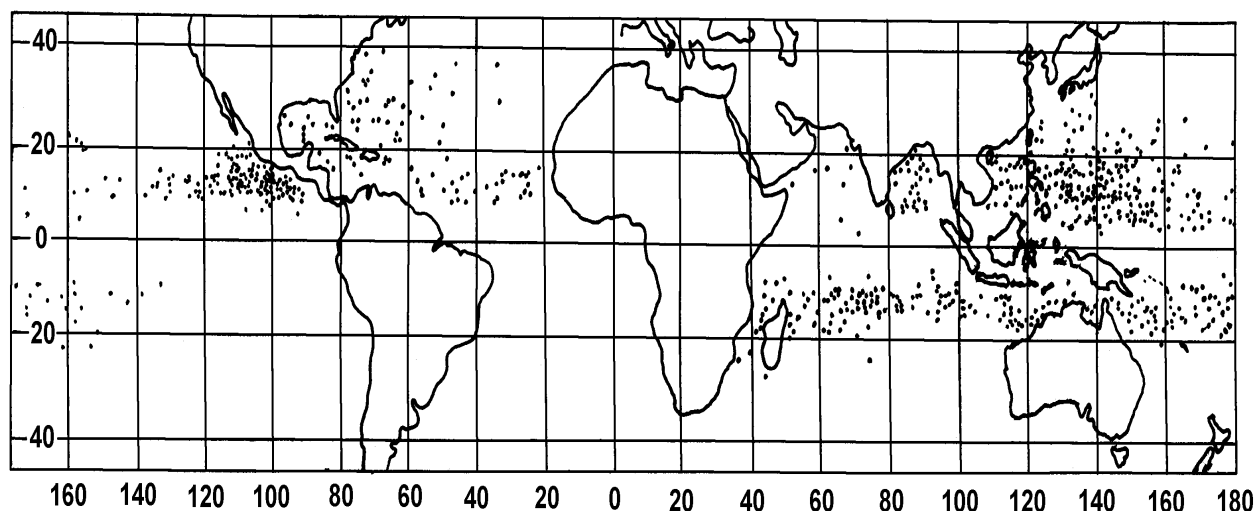


Рис. 9. Очаги зарождения тропических циклонов за 10 лет (1983-1992) [34].

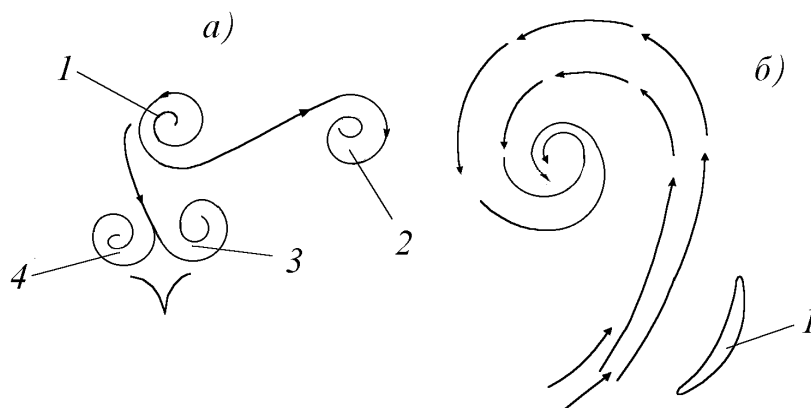


Рис. 10. Формирование естественных вихрей при стоке среды с подпиткой:
 а) в океанах [35];
 б) циклона в атмосфере 23.03.77 г. северо-западнее Байкала (1).
 (направление течения предполагаемое)

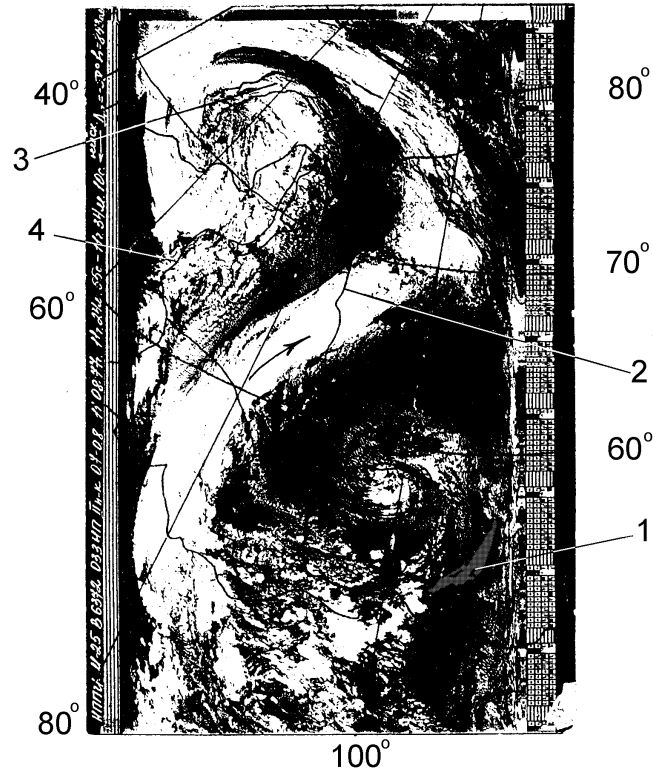


Рис. 11. Перетекание 11.08.77 г. воздушных масс из антициклона в циклон:
 1- Байкал; 2- Енисей; 3- Новая Земля; 4- Обь.
 (направление течения предполагаемое)

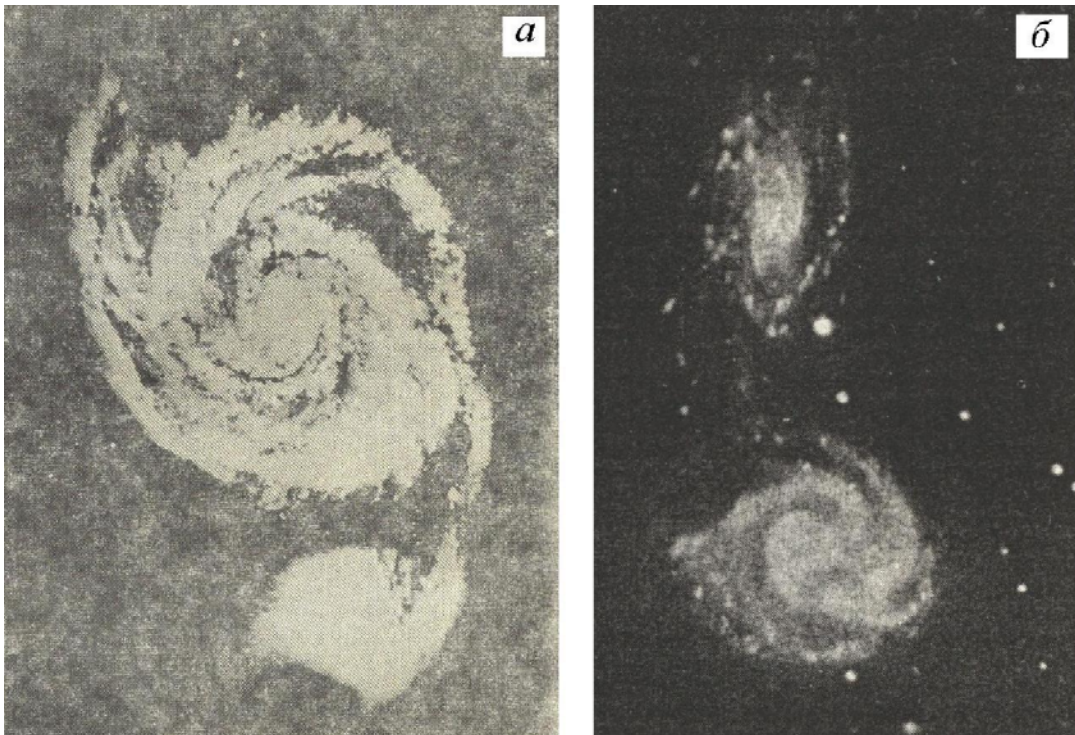


Рис. 12. Переход момента количества движения при взаимодействии:
 а) галактик в созвездии Гончих Псов [37];
 б) галактик NGC 5426 и 5427 [38].

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 [35], среда, как видно из рис. 10а, может вытекать из вихря 1 не равномерно, по всему пространству, а в одном направлении. 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, они могут быть связаны между собой потоками среды. Их называют грибовидными течениями в океане [36]. Образование этих вихрей обусловлено 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. 10б видно формирование циклона в Сибири 23. 03. 77 потоком воздушных масс проходящих западнее Байкала 1. А на рис. 11 воздушные массы с антициклона на западе от Байкала формируют циклон севернее Обской губы. Такие картины образования больших циклонов свидетельствует, что здесь также имеет место механизм формирования циркуляции при стоке среды с подпиткой. Этот механизм может усиливать циркуляцию (9), обусловленную стоком на вращающейся Земле.

В астрофизике существует много гипотез о причинах появления циркуляции космических объектов. Нам представляется, что рассмотренные механизмы ее образования могут иметь место и при гравитационной аккреции массивов вещества при образовании планетарных систем и галактик. В качестве примера на рис. 12 приведены две пары взаимодействующих галактик [37], [38], в результате которого момент количества движения от одной галактики переходит к другой. При этом у галактик на рис. 12а переход момента импульса происходит при одинаковых направлениях их вращения как и для вихрей 1 и 3 на рис. 10а. А для галактик на рис. 12б обмен циркуляциями происходит при разных направлениях вращения подобно океаническим вихрям 1 и 2 на рис 10а и атмосферным на рис 11. Если это так, то одна из галактик скручивается (циклонального типа), а другая - раскручивается (антициклонального типа). Представленные примеры и их анализ 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.

10. Потенциальное давление стока.

Пусть с высоты H_1 объем воздуха с давлением P_1 и температурой T_1 по каким-либо причинам (вертикальные пульсации скорости Δv , местный перегрев dT , 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 $T_2 < T_1$. В результате адиабатического расширения (рассматривается сухой воздух) температура объема T_{12} уменьшится в соотношении

$$T_{12} = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k}, \quad (25)$$

где k - коэффициент адиабаты воздуха.

Если $T_{12} > T_1$, то плотность объема будет меньше и он продолжит подъем, такая стратификация атмосферы является неустойчивой. Если же $T_{12} < T_1$, то более холодный поднявшийся объем снова опустится. Это будет устойчивая атмосфера. Условие устойчивости с учетом (25) можно записать в виде:

$$\frac{P_1^{(k-1)/k}}{T} > \frac{P_2^{(k-1)/k}}{T}.$$

Откуда для устойчивой атмосферы получаем

$$\Phi(H_1) > \Phi(H_2), \quad (26)$$

где

$$\Phi(H) = \frac{(P/P_e)^{(k-1)/k}}{T/T_e}, \quad (27)$$

$P_e = 1.013 \cdot 10^5$ Па и $T_e = 288.15$ °К - давление и температура на поверхности Земли при стандартных условиях. Отметим, что аналогичная величина, обратная $\Phi(H)$, в метеорологии называется потенциальной температурой. Из (26) следует, что устойчивой атмосфере соответствует монотонно падающая с высотой функция $\Phi(H)$. При немонотонной $\Phi(H)$ может быть такая высота $H_2 > H_1$, при которой поднявшийся воздух будет теплее окружающего и его подъем будет продолжаться.

Условия для стока нижнего слоя атмосферы вверх могут возникнуть, если потенциал $\Phi(H)$ на какой-то высоте H превысит значение F в приземном слое. Тогда малое возмущение переведет небольшой приземный объем на высоту с большим значением Φ 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 хорошо известно в физике атмосферы. Так образуются 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 функция $\Phi(H)$ имеет максимум Φ_{max} на высоте H (см. рис. 13), тогда на объем воздуха $dV = fdH$, поднявшийся с высоты H_1 до H_ϕ , будет действовать сила Архимеда

$$dF = gf(\rho_\phi - \rho_{н\phi})^{dH}, \quad (28)$$

где $\rho_{н\phi}$ - плотность этого объема на высоте H_ϕ ;

ρ_ϕ - плотность окружающего воздуха на высоте H_ϕ ;

f - площадь горизонтального сечения объема.

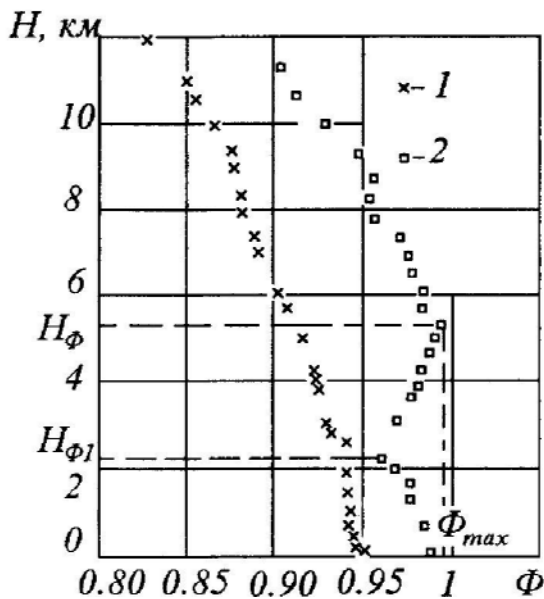


Рис. 13. Профили потенциального стока Φ по высоте атмосферы:
1- спокойная атмосфера, Барнаул 07.07.1980 г., 17.05. м.вр.
2- за 6 часов до образования смерчей, Москва 09.06.1984 г., 10.00

Будем считать, что сила F , избыточная над силой веса, приложена к объему dV потенциально, когда он находится на высоте H . Поэтому, просуммировав все силы по высоте канала H , получим полную силу F , действующую на весь столб воздуха H . Тогда, выражая плотность через P и T с помощью адиабатических соотношений, с учетом (27) потенциальное давление стока, которое способствует истечению столба воздуха вверх, будет:

$$\Delta P_p = \frac{F}{f} = \alpha_h \frac{g P_\phi (P_e / P_\phi)^{(k-1)/k} H_\phi}{RT_e} \int_0^{H_\phi} (\Phi_{\max} - \Phi) dH, \quad (29)$$

где α_h - коэффициент, введенный для учета нерасчетных условий. Из (29) видно, что движущая сила стока, как бы эквивалентна разности потенциалов, поэтому величину $\Phi(H)$ назовем потенциалом атмосферы.

По графику $\Phi(H)$ интеграл в (29) может быть определен графически. Например, для ситуации 2 на рис. 13, а он равен 93 м. Тогда давление стока $\Delta P_p = 678$ 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. Если подходящий к месту стока поток имеет циркуляцию Γ , то 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'_1 , в которой избыточное давление $P_i = \Delta P_p$ и циркуляция Γ . По этим параметрам с помощью методики [28] можно рассчитать профили скорости и давления в вихре.

11. Сток влажной атмосферы.

При вертикальных перемещениях влажного воздуха в нем происходят фазовые превращения водяного пара, воды и льда, вследствие чего вертикальное изменение температуры отличается от такового для сухого воздуха. Так с учетом только фазовых превращений водяной пар - вода влажноадиабатический градиент [28] для воздуха в состоянии насыщения имеет вид:

$$\gamma'_a = \frac{dT}{dH} = - \frac{g + r_g \frac{dc_s}{dH}}{C_p}, \quad (30)$$

где r_g - удельная теплота конденсации;

c_s - удельная концентрация насыщенного пара в кг на кг атмосферного воздуха;

C_p - теплоемкость атмосферного воздуха при постоянном давлении.

Согласно закону Дальтона для смеси газов концентрация c_s от давления насыщенных паров P_{sv} зависит так

$$c_s \approx 0.622 \frac{P_{sv}}{P}, \quad (31)$$

а с учетом уравнения Клайперона-Клаузиуса для идеального газа имеем

$$\frac{dP_{sv}}{dT} = \frac{r_g P_{sv}}{R'T^2}, \quad (32)$$

где R' - газовая постоянная водяного пара.

Уравнение (32) можно проинтегрировать при условии, что в точке росы $T = T_d$ давление насыщенных паров будет P_{svd} . Тогда получим:

$$P_{sv} = P_{svd} \exp \left[\frac{0.622 r_g}{R} \left(\frac{1}{T_d} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (33)$$

где $R=0.622R'$ - газовая постоянная атмосферного воздуха. С учетом (31) – (33) влажноадиабатический градиент температуры (30) примет вид

$$\gamma'_a = -\frac{g}{C_p} \frac{P + \frac{0.622r_q P_{svd}}{RT} \exp \frac{0.622r_q}{RT} \left(\frac{T}{T_p} - 1 \right)}{P + \left(\frac{0.622r_q}{RT} \right)^2 \frac{k-1}{k} P_{svd} \exp \frac{0.622r_q}{RT} \left(\frac{T}{T_p} - 1 \right)}. \quad (34)$$

В качестве примеров были рассчитаны γ'_a при условии насыщения для стандартной атмосферы и для реальной ситуации 2 на рис. 13. Влажноадиабатический градиент температуры в этих двух случаях экстраполируется соотношением

$$\gamma'_a = -9.52 + 2.85 \cdot 10^{-2} (13 - H)^2, \quad (35)$$

где H измеряется в километрах.

Если плотность в (28) выразить через температуру с помощью уравнения состояния, то потенциальное давление стока во влажной атмосфере в результате интегрирования (28) по всему столбу воздуха получаем в следующем виде

$$\Delta P_{ph} = \frac{gP_\phi}{RT_\phi} \int_0^{H_\phi} \left(1 - \frac{T_\phi}{T_{H\phi}} \right) dH, \quad (36)$$

где T_ϕ - температура атмосферы на высоте H_ϕ ;

$T_{H\phi}$ - температура объема воздуха, поднявшегося с высоты H до высоты H_ϕ

Подынтегральная функция $\tau = 1 - T_\phi/T_{H\phi}$ была рассчитана для реальной ситуации 2, причем температура $T_{H\phi}$ определялась с помощью (35). Графическое интегрирование до высоты H_ϕ дает величину интеграла - 234 м. Тогда в соответствии с (36) потенциальное давление стока $\Delta P_p = 1750$ Па. Превышение давления ΔP_p над потенциальным давлением стока сухой атмосферы составит $\alpha_h = \Delta P_{ph} / \Delta P_p = 2.57$. Этот результат получен с помощью влажноадиабатического градиента (35), который в одинаковой мере отличается как от стандартной атмосферы, так и от точного значения в данной ситуации. Поэтому это значение α_h можно использовать для оценки влияния влажности на потенциальное давление стока.

12. Большие атмосферные вихри.

В соответствии с рассмотренным механизмом образования циркуляции и движущей силы стока формируются вихри разных масштабов, включая малые пыльные, смерчи, торнадо, тропические циклоны и циклоны. Например, сток воздуха в циклонах характеризуются восходящим движением со скоростью 3 - 5 см/с. Движущей силой стока всех вихрей является потенциальное давление стока. Циркуляция малых вихрей обусловлена рассмотренными механизмами асимметрии истечения, больших – стоком на вращающейся Земле.

При выводе (29) рассматривалось смещение объема воздуха вверх. Для неустойчивой атмосферы с Φ_{max} на высоте H_ϕ 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_ϕ 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.

Некоторые авторы выделяют циклон или антициклон по направлению вращения, например, вращающееся образование за стрелкой часов в северном полушарии считается антициклональным [35]. 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. Под циклональным вихрем следует понимать вихрь, со сходящимся к центру течением, а антициклональный – с расходящимся от центра. 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 за - у антициклона. Что касается градиента давления, то как показывают исследования лабораторных вихрей [28], он тоже может быть разным. Например, при больших отношениях тангенциальной скорости к осевой (см. [28], рис. 4. 29), давление в центре сходящегося вихря может повышаться. С другой стороны в созданных для пылеулавливания антициклонах, при высоких степенях закрутки [28] 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 (рис. 14а), т. е. образует антициклональное течение. Кроме того, противоток в центре циклона, образующего его глаз, в приземном слое представляется расходящимся течением. Поэтому такой циклон сопровождается небольшим приземным антициклоном в области глаза циклона. На снимках из космоса [31] такие циклоны, преимущественно тропические, представлены темным глазом, в виде круглой дыры в сплошной облачности, имеющей концентрическую структуру.

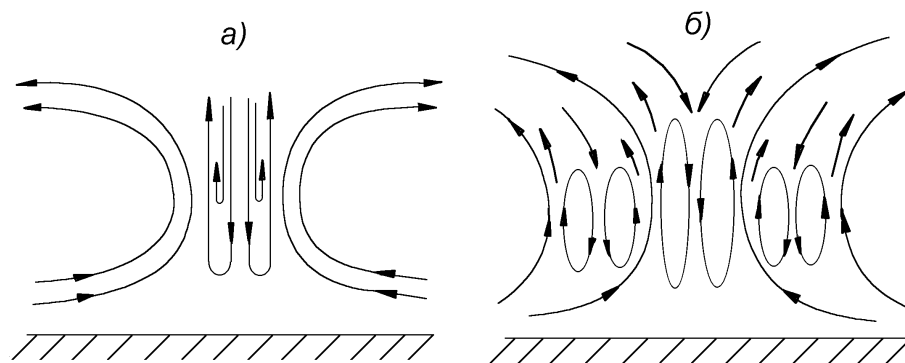


Рис. 14. Схемы течения в циклонах:

а) стоковое течение с противотоком в центре;

б) стоковое течение с промежуточными циркуляционными ячейками.

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 (рис. 14б). Поэтому могут образовываться нисходящие движения и с удалением от центра циклона. Например, в урагане Гилберт (11-15 сентября 1988 г.) наблюдали два максимума вертикальной скорости, которые могут свидетельствовать о наличии таких циркуляционных ячеек [16]. Профили тангенциальной скорости, как видно из рис. 15, могут быть не монотонными и иметь промежуточные максимумы. Это

свидетельствует о разрывах радиального переноса момента количества движения. Вертикальная структура ТЦ может быть еще более сложной. Так Грей В. М. [19] считает, что, наряду с простой структурой циклона: "сток - подъем - отток", существует и более сложная: "сток - подъем - опускание - подъем - опускание - подъем - опускание - подъем - отток". 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.

Расходящееся в приземном слое течение воздуха в антициклоне сопровождается его опусканием в центральной области (см. рис. 16а). Поэтому над антициклоном образуется циклональное течение, которому характерно стоковое движение воздуха к центру и дальнейшее его истечение вниз. Таким образом, над антициклоном формируется циклон, а над циклоном - антициклон (см. рис. 16б). Они сопровождают друг друга не только в горизонтальной плоскости (см. рис. 10,а и рис. 11), но и в вертикальной.

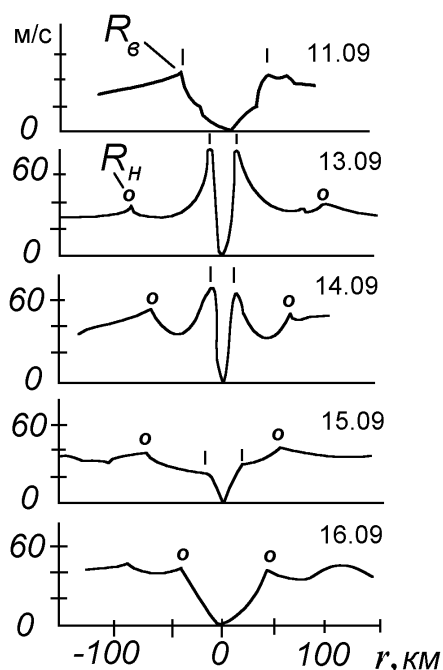


Рис. 15. Профили тангенциальной скорости в урагане Гилберт (11.09.-16.09.1988 г.) [16].
 $R_в$ и $R_н$ – наружный и внутренние радиусы максимумов ветра, которые совпадают с границами облачности.

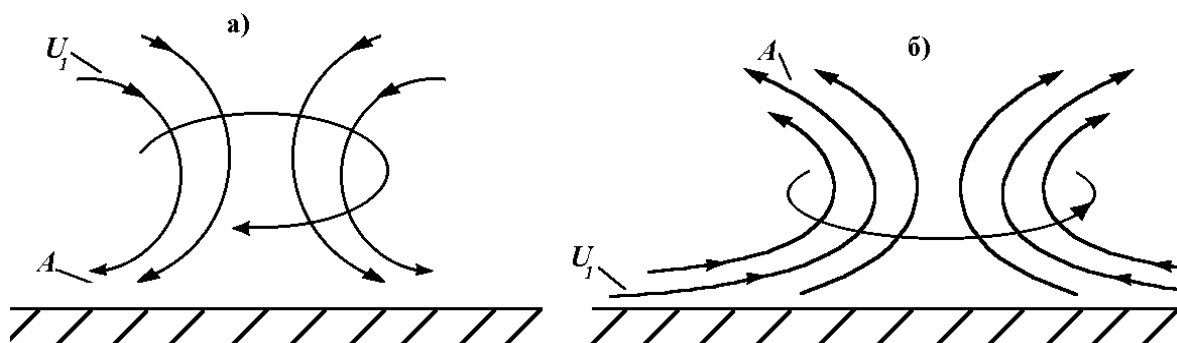


Рис. 16. Вертикальное сочетание циклонного (ψ) и антициклонного (a) течений в антициклоне а) и циклоне б).

В метеорологии и физике атмосферы ведущими механизмами динамики атмосферы являются горизонтальные движения. Принято считать, что ветры возникают вследствие воздействия градиента давления или центробежной силы (градиентный ветер). При воздействии сил Кориолиса они направлены вдоль изобар (геострофический ветер). 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. Поэтому 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 изучение и рассмотрение вертикальных движений атмосферы.

13. Вопросы прогноза и предотвращения опасных вихрей

В отличие от циклонов и антициклонов вихри меньшего масштаба имеют более простую структуру. Рассмотрим механизм их формирования более детально. В результате перегрева нижнего слоя или взаимодействия холодного и теплого фронтов создается температурная стратификация с максимумом потенциала Φ_{\max} высоте H_{Φ} . Потенциальное давление стока ΔP_p согласно (29) может быть рассчитано в виде поля по рассматриваемой территории. Вместе максимума ΔP_p при дальнейшем перегреве может произойти прорыв и по образовавшемуся каналу начнется истечение нижнего слоя вверх. Если сток имеет эксцентриситет e относительно центра области, а скорость верхнего слоя v_V отличается от скорости нижнего слоя v_S , то в соответствии с (18) истечение будет происходить с циркуляцией r . Возможны, как уже отмечалось, и другие механизмы образования циркуляции. Возникший смерч будет существовать до тех пор, пока весь нижний слой не истечет вверх.

Расчеты по методике [28] показывают, что при ситуации в 10 часов 9.06.84 г. в г. Москве (см. рис.13) при $\Delta P_p = 1750$ Па мог бы возникнуть смерч с максимальной тангенциальной скоростью $v_{\max} = 38.8$ м/с на радиусе $R_v = 390$ м и разрежением в центре $P_0 = -2051$ Па. Однако в этот день перегрев нижнего слоя продолжался и в 16 часов серия смерчей начала образовываться в Ярославской, Костромской, Калининской и Московской др. областях. Смерч в г. Иваново сорвал 50-тонный водонапорный бак и отбросил его на 200м. Согласно шкалы смерчей США, смерчи такой группы разрушают тяжелые здания, переворачивают железнодорожные вагоны и крупные предметы поднимают в воздух при скоростях 93 - 116 м/с. Расчет по нашей методике такого смерча при $v = 100$ м/с показывают, что такой смерч мог возникнуть при $\Delta P_p = 1.16 \cdot 10^5$ Па, а абсолютное давление в центре могло упасть до величины $P_0 = 0.795 \cdot 10^5$ Па.

Значительное разрежение в центре может играть роль разрушающего фактора. Строение, оказавшееся в центре смерча, внутри находится под атмосферным давлением $P_a = 1.013 \cdot 10^5$ Па, а снаружи на него действует давление P_0 , которое в последнем примере будет создавать нагрузку $\sigma = P_a - P_0$ более 2 т на каждый квадратный метр его поверхности.

В ряде случаев необходимо оценить разрушающие факторы смерча. Согласно (4) избыточное давление, при ($C = 0$), на периферии смерча при $r \rightarrow \infty$ будет $P_2 = \rho V_{\max}^2$. Это давление обеспечивает движение среды в вихре, поэтому $P_2 = \Delta P_p$. Тогда получаем оценку для максимальной скорости в смерче

$$v_{\max} = \sqrt{\Delta P_p / \rho}. \quad (37)$$

Из (4) также при $r \rightarrow 0$ разрежение в центре будет, $P_o = -\rho V_{\max}^2$, а с учетом (37)

$$P_o = -\Delta P_p. \quad (38)$$

и нагрузка на стены здания будет:

$$\sigma = P_2 - P_o = 2\Delta P_p. \quad (39)$$

Для прогноза смерча должны быть определены распределения потенциального давления стока по территории. На стадии исследования и разработки прогноза должны быть проведены зондирования атмосферы в смерчеопасных ситуациях, изучены виды профилей $\Phi(H)$ и расклассифицированы, а также определены предельные значения $\Delta P_{p\max}$ и Φ_{\max} . В этом случае по полям ΔP_p могут быть обнаружены максимальные значения $\Delta P_{p\max}$, в которых наиболее вероятное образование смерча. Изменения величин $\Delta P_{p\max}$ и Φ_{\max} во времени и сопоставление их с предельными величинами позволяет определить время и место образования смерча.

Разрушения и человеческие жертвы, создаваемые ТЦ и торнадо, вынуждают людей искать средства по их предотвращению. Например, авторы изобретения [39] предлагают ослаблять ураганы с помощью взрывов (рис.17а). Взрывы создают выше облачной системы сериями по концентрическим окружностям, которые отстоят от глаза урагана и друг от друга на расстоянии порядка 10 - 15 км и с шагом вдоль окружности не более 5 -10 км. Авторы предполагают осуществлять взрывы в течение периода генерации восходящих движений. Они должны создать нисходящее движение и таким образом ослабить ураган. Рассмотрим, какие потребуются расходы при реализации этого способа для предотвращения такого урагана как Гилберт, в котором радиус ядра $R_v = 25$ км, радиус наружной границы восходящего потока $R_1 = 75$ км и средняя вертикальная скорость $w_m = 0.5$ м/с [15,40]. Мощность вертикального потока составит

$$N_w = \pi \rho (R_1^2 - R_2^2) \rho w_m^3 / 2 = 3.93 \cdot 10 \text{ кВт}. \quad (40)$$

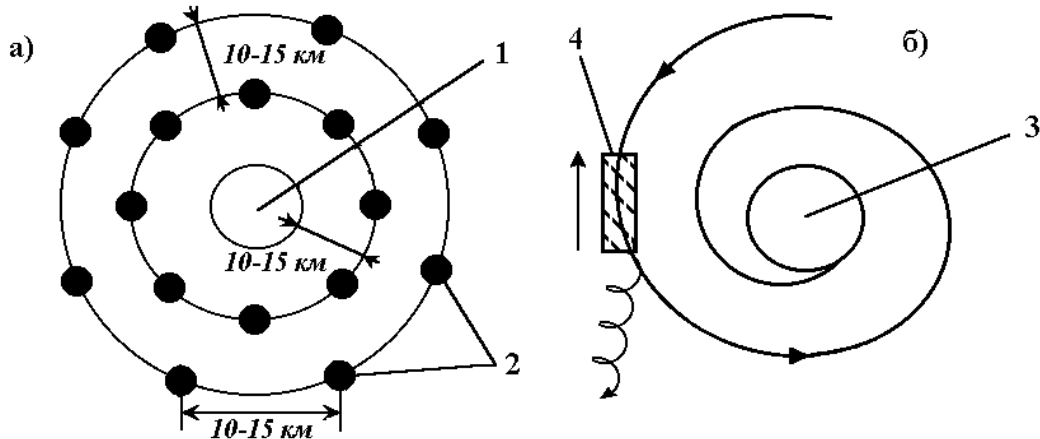


Рис. 17. Способы предотвращения катастрофических атмосферных вихрей:
 а) ураганов, согласно [39]; б) торнадо, согласно [41];
 1- глаз урагана; 2- взрывы для предотвращения;
 3- центр торнадо; 4- цилиндр с завихрителем.

При подавлении с пятидесяти процентным к.п.д. этого восходящего движения в течении 6 дней потребуется не менее 10^{11} кВт.-ч. = $3.6 \cdot 10^{17}$ Дж энергии, что эквивалентно сжиганию 12 млн. т. высококачественного угля. При этом одновременно должно производиться порядка 100 взрывов. Так как между взрывами будут некоторые интервалы по времени, то суммарная

мощность одновременных взрывов должна значительно превышать величину N_w , потребляемая масса взрывчатого вещества будет превышать 12 млн. т. Наряду с большими энергетическими и экономическими затратами этот способ может не только подавить восходящие движения, а наоборот, их усилить. Например, при взрыве атомной бомбы возникает восходящее движение, образующее грибовидное облако, а иногда и мощный смерч. Этот пример показывает, что без ясного понимания механизмов возникновения атмосферных вихрей намерение ослабить вихрь может привести к его усилению. С помощью другого изобретения [41] предлагается метод и устройство для уменьшения разрушающего действия торнадо. С этой целью (см. рис. 17б) для уменьшения его скорости в область втекающего потока на периферии торнадо самолетом (со скоростью 200 м/с) вносится полый цилиндр против скорости торнадо. Внутри цилиндра установлен винтообразный завихритель, который должен закрутить захваченную струю воздуха и предотвратить ее движение к центру торнадо. Даже если струя таким образом отклонялась бы от стокового течения, то ее влияние на общее течение окажется ничтожным. Например, цилиндр диаметром более $D = 10$ м, навряд ли возможно технически применить. При диаметре торнадо $D_1 = 500$ м и высоте его $H_1 = 300$ м такой цилиндр захватит лишь часть n , равную

$$n = D_c^2 / (4D_1H_1) = 1/6000, \quad (41)$$

поэтому такое решение практически не окажет влияния на смерч. На наш взгляд, действенные меры борьбы с интенсивными атмосферными вихрями могут быть предприняты только с учетом их реальных механизмов. По-видимому, в настоящее время вполне реальна постановка задачи борьбы с малыми вихрями-смерчами. Предотвратить образование смерча можно, обеспечив сток приземного слоя воздуха с малыми скоростями. С этой целью необходимо создать такой вертикальный импульс, чтобы возник канал одного большого диаметра или одновременно образовалось бы несколько стоков. Если создать сток заблаговременно, то перегретый слой не будет накапливаться и с малыми скоростями истечет вверх. Таким образом, в отличие от рассмотренных выше предложений, сток и восходящее движение не подавляется, а наоборот инициируется с той целью, чтобы энергия приземного слоя не накапливалась, и не было последующего ее катастрофического проявления. Для создания вертикального импульса необходимо на определенную высоту доставить порцию топлива, его распылить и поджечь. Горение необходимо организовать так, чтобы нижняя граница нагреваемого объема имела минимальную скорость, направленную вниз. Это можно обеспечить комбинацией скорости доставки и направлением распыла топлива. Например, в случае смерча 9.06.84 г. в 16 часов, за 6 часов до его начала (см. рис.13) необходимо создать условия для всплывания столба воздуха высотой $H_{\phi 1} = 2200$ м и диаметром $D_1 = 500$ м. Чтобы такой объем воздуха всплыл и продолжил движение вверх необходимо, чтобы при подъеме на высоту $H_{\phi 1}$ с минимальным значением потенциала Φ его температура (t_{vol}) была не ниже температуры окружающего воздуха ($t_{\phi 1}$), которая в данном случае равна $t_{\phi 1} = 5^\circ \text{C}$ [28].

Определим, как будет изменяться температура поднимающегося объема. С этой целью проинтегрируем уравнение (35) при граничном условии $t(H_1) = t_1$, где t_1 - температура атмосферы на высоте H_1 , с которой объем воздуха начал подъем до высоты H . После интегрирования получаем соотношение для температуры поднимающегося объема воздуха

$$t_{vol} = t_1 - 9.52(H - H_1) - 0.95 \cdot 10^{-2} [(13 - H)^3 - (13 - H_1)^3], \quad (42)$$

где высоты H и H_1 даны в км.

Рассмотрим изменение температуры для средней точки столба $H_1 = 0.5 H_{\phi 1} = 1.1$ км, где температуры воздуха $t_1 = 10^\circ \text{C}$ и плотность $\rho_1 = 1.1 \text{ кг/м}^3$. Тогда при подъеме рассматриваемого объема на высоту $H = H_{\phi 1} = 2.2$ км воздух согласно (42) охладится на $\Delta t = t_{vol} - t_1 = -6.5^\circ \text{C}$. Чтобы объем продолжил подъем его температура должна быть $t_{vol} > t_{\phi 1}$. Из $t_{vol} = t_{\phi 1}$ необходимо чтобы температура нагретого воздуха на средней высоте H_1

была $t_t = t_{\phi 1} - \Delta t = 11.5$ °С. Действительная температура на этой высоте $t_1 = 10$ °С, поэтому указанный объем воздуха требуется нагреть на $\Delta t_t = t_t - t_1 = 1.5$ °С. На перегрев будет расходовано тепло

$$Q = 0.25\pi D_t^2 H_{\phi 1} \rho_1 C_v \Delta t_t = 3.47 \cdot 10^{11} \text{ Дж.}$$

Здесь для воздуха величина теплоемкости $C_v = 0.73 \cdot 10^{11}$ Дж/кг·град. При теплотворной способности жидкого топлива $4.18 \cdot 10^7$ Дж/кг для создания восходящего потока необходимо будет распылить и поджечь 8.3 т жидкого топлива на средней высоте H_1 . Это небольшое количество, поэтому для гарантированного предотвращения смерча с наветренной стороны от защищаемой местности могут быть созданы несколько очагов искусственного всплывания приземной перегретой массы воздуха. Рассмотренные механизмы образования атмосферных вихрей в значительной мере базируются на экспериментальном материале для вихревых камер. Представляется интересным проведение исследований атмосферных течений, которые могли бы значительно расширить понимание процессов в атмосфере. Одним из методов может быть визуализация атмосферных вихревых образований с помощью меток-зондов с регулируемой эффективной плотностью [42]. Такие метки позволят увидеть момент зарождения атмосферного вихря, его динамику, представить пути перемещения воздушных масс и наблюдать глобальные процессы динамики атмосферы. Нам представляется, что исследование атмосферных вихрей должно проводиться целенаправленно. Это достаточно обширная область, в которой имеется своя специфика, требующая достаточно скрупулезного изучения. Имевшиеся до сих пор выходы разных авторов в эту область, как правило, осуществлялись на границе их профессиональных интересов. По-видимому, эффективный скачок в понимании вихревых явлений будет достигнут при появлении исследователей - профессионалов по физике атмосферных вихрей. Кроме упомянутого ранее значения вихревых процессов для физики атмосферы и метеорологии следует отметить и другие возможные использования знаний о механизмах природных вихрей. Рядом исследователей, в том числе и нами [43] видится возможность концентрации энергии естественных потоков с помощью вихрей. Это приведет к существенному уменьшению габаритов энергетических установок и к снижению их стоимости. Вихревые явления оказывают влияние на криосферные процессы разными путями. Например, на Баренцевом море происходит интенсивная циклоническая деятельность, составляющая 50-60 циклов в год [44]. Здесь также наблюдается круговорот поверхностных течений, направленный против часовой стрелки. Человеческая деятельность вносит свои коррективы в развитие и взаимодействие между собой различных оболочек Земли, в том числе и криосферы [45]. Наибольший интерес вызывают глобальные антропогенные воздействия, приводящие к изменению теплового баланса Земли. Применительно к криосфере они грозят нарушить прозрачность атмосферы и вывести Природу из состояния неустойчивого равновесия в настоящем межледниковом периоде. При этом возможно даже нарушение механизма самовосстановления возмущенной криосферы и переход к состоянию с совершенно непредсказуемыми катастрофическими последствиями для Человечества. Футурологический потенциал науки недостаточен, чтобы надежно предсказать хотя бы тенденцию поворота Природы к резкому потеплению или к очередному ледниковому периоду, поэтому она может советовать, лишь уменьшить глобальные воздействия и организовать систему мониторинга за их последствиями. Понимание вихревых процессов может являться средством достижения большей определенности в этой области, и, возможно, в будущем с помощью вихрей позволит избежать нежелательных последствий.

Литература

1. Погосян Х.П. Циклоны.- Л.: Гидрометеиздат., - 1976. - 148 с.
2. Аванесов Г.А., Галеев А.А., Жуков Б.С., Зиман Я.Л., Митрофанов И.Г. Проект "Экос-А": научные космические исследования и построение моделей глобальных экологических и климатических процессов и природных кризисных ситуаций// ИЗиК. - 1992. - N2. - С.3 - 14.
3. 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.:Гидрометеиздат. -1974. - С.307 - 313.
4. Цессевич В.П. Что и как наблюдать на небе. - М.: Наука, 1984. - 304 с.
5. Блюх П.В., Ярошенко В.В. Спицы в кольце Сатурна// Природа. - 1991. - N4 - С.19 - 25.
6. Комплексный мониторинг воздействий вулканического аэрозоля на атмосферу и климат. - Экспресс-информация. Сер. 37.21, вып.3, 1986 г. - С.18.
7. Первый кругосветный полет монгольфьера. Природа. - 1984. - N10. - С.118 - 119.
8. Борисенков Е.П., Альтер-Залик Ю.Ж., Кузнецов А.Д. Зондирование атмосферы метеорологическими аэростатами. - Л.: Гидрометеиздат, 1982. - 175 с.
9. Манк У., Макдональд Г. Вращение Земли.- М. 1964 г. (см. Сидоренков Н.С. Неравномерность вращения Земли и движение полюсов//Природа.- 1982. - N4.)
10. Гущина Д.Ю., Семенов Б.К. Планетарная перестройка ячеек тропической циркуляции атмосферы в период кульминации Эль-Нинье 1982 - 1983 гг.// МиГ. - 1993. - N 10. - С.5 - 13.
11. Осадин Б.А. Электричество из солнечного ветра// Энергия: экономика, техника, экология.-1991. - N4. - С.46 - 49.
12. Шталь В.А. Физика атмосферы. - М.: Знание, 1965. - 40 с.
13. Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы.- Л.: Гидрометеиздат, - 1973. - 616 с.
14. Зимин В.Д., Клепиков И.Н., Лазарев А.А. и др. Исследование крупномасштабных вихревых потоков экологически опасного характера в земной атмосфере// ИЗиК.- 1992.- N1. - с.3 - 10.
15. Шитс Р.С. О структуре ураганов по данным исследовательских самолетов-лабораторий// Интенсивные атмосферные вихри. - М.: Мир. - 1985 - С.48 - 65.
16. Блэк П., Литинецкий А.В. Поля метеовеличин в урагане Гилберт - по данным измерений самолетов-лабораторий// Метеорология и гидрология. - 1993. - N2. - с.27 - 37.
17. Интенсивные атмосферные вихри: Пер. англ. (Под ред. Л. Бенгтссона и Дж. Лайтхилла) - М: Мир, 1985, 368 с.
18. Peterson R.E., Mehta K.S., Abbey R.F., jr. Symposium summary// Bull. American Meteor. Society. - 1976. - Vol.57. - N12. - pp. 1457 - 1459.
19. Грей В.М. Генезис и интенсификация тропических циклонов// Интенсивные атмосферные вихри. - М: Мир, 1985. - с.10 - 31.
20. Пирс Р.П. Факторы , определяющие радиальный поток и формирование "глаза" в интенсифицирующемся тропическом циклоне// Интенсивные атмосферные вихри. - М.: Мир. - 1985. - С.151 - 167.
21. Э.В.Щербинин //Техника молодежи. - 1978. - No.7. - С.52.
22. Андрюшин А., Быстрова З. По следу смерча// Природа и человек. - 1986. - N4. - С.43 - 45.
23. Никулин В.В. Структура торнадоподобных вихрей// Автореферат канд. дисс. - Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР. - 1985.

24. Макаренко В.Г., Тарасов В.Ф. Экспериментальная модель смерча// ПМТФ. - 1987. - N5. - С.115 - 122.
25. Мартыненко О.Г., Соловьев А.А., Солодухин А.Д., Бобошина С.Б., Гармюзе Л.Х., Камилец В.И. Самоорганизация в турбулентных вихревых образованиях. - Минск: препринт ИГМО им. А.В. Лыкова АН БССР. -1984. - N25. - С.39
26. Симпсон Дж. Вращение в кучевом облаке: модель и данные наблюдений в облачной системе, порождающей смерч// Интенсивные атмосферные вихри. - М.: Мир, 1985. - С.183-197.
27. Оояма К.В. Об основных проблемах теории и моделирования тропических циклонов // Интенсивные атмосферные вихри.-М.: Мир, 1985. - С.32 - 47.
28. Смутьский И.И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. - Новосибирск: ВО "Наука". Сибирская издательская фирма. - 1992. - 301 с.
29. Наливкин Д.В. Ураганы, бури, смерчи. - Л.: Наука. - 1970. - 487 с.
30. Балдина О.М., Байтина Ц.М. Условия образования вихревых воронок в барабанах паровых котлов// Теплоэнергетика. - 1958.- N10. - С.39 - 45.
31. Байбаков С.Н., Мартынов А.И. С орбиты спутника - в глаз тайфуна. - М.: Наука. - 1986. - 176 с.
32. 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. - v. 29. - N1. - p.116 - 126.
33. Хргиан А.Х. Физика атмосферы в 2-х т. - Л.: Гидрометеиздат. - 1978.
34. Покровская И.В., Шарков Е.А. Исследование пространственно-очаговой структуры тропического циклогенеза применительно к задачам спутникового мониторинга// Исследование Земли и космоса. - 1994. - N4. - С.3 - 12.
35. Гинзбург А.И., Федоров К.Н. О поверхностной циркуляции вод в субарктической фронтальной зоне (по данным ИСЗ)// ИЗК. - 1986. - N1. - С.8 - 13.
36. Гинзбург А.И., Федоров К.Н. Некоторые закономерности развития грибовидных течений в океане, выявленные путем анализа спутниковых изображений//ИЗК. - 1984. - N6. - С. 3 - 13.
37. Гуревич Л.Е. Чернин А.Д. Происхождение галактик и звезд. - М.: Наука. - 1983. - 192 с.
38. Sandage A., Bedke J. Carnegia Atlas of Galaxies. - Carnegie Institution of Washington. - 1994. 750 p.
39. А.с. 568033 СССР, МКИ G 01 W1/00. Способ ослабления ураганов /Н.И. Вульфсон, Л.И. Левин, Ю.А. Серегин.
40. Берюлев Г.П., Литинецкий А.В., Скиртладзе Г.И.,Черников А.А. Исследование интенсивных тропических циклонов самолетами метеолабораториями в 1983 - 1989 гг.// МиГ. - 1991. - N5 - С.106 - 113.
41. Патент США 4362280, МКИ В 64 С 39/02//РЖ "Геофизика".- 1983. -N10. - Б392П.
42. А.с. 1313204 СССР, МКИ G 01 W 1/08; В 64 В1/40. Способ измерения параметров атмосферы и устройство для его осуществления/ И.И.Смутьский, А.Б.Немировский.
43. Мельников В.П., Смутьский И.И. Моделирование вихревых процессов в экологических целях // Пути и средства достижения эколого-экономического развития в нефтяных регионах Западной Сибири. - Труды NDI. Выпуск 1. - Нижневартовск: ИПП "Уральский рабочий. - 1995. - с. 80-84.
44. Мельников В.П., Спесивцев В.И. Инженерно - геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. - Новосибирск.: "Наука" Сиб. изд. фирма РАН. -1995.- 198 с.
45. Мельников В.П. Криосфера Земли как объект криологии // Криосфера Земли.- 1997. - N1. - с.3-15.

Все замечания и пожелания
просьба направлять по адресу:
625000, Тюмень, а/я 1230
ИКЗ СО РАН.

Печатается в соответствии
с решением ученого совета
Института криосферы Земли СО РАН
от 27 марта 1997 г.