

## **О Закономерностях формирования атмосферных вихрей.**

*А.Л. Бондаренко*

*Приведено собственное, отличное от общепринятого объяснение формирования атмосферных вихрей, в соответствии с которым они образуются океанскими волнами Россби. Подъём воды в волнах формирует температуру поверхности океанов в виде отрицательных аномалий, в центре которых вода холоднее, чем на периферии. Эти аномалии воды создают отрицательные аномалии температуры воздуха, которые превращаются в атмосферные вихри.*

В атмосфере нередко формируются образования, в которых воздух, и содержащаяся в нём влага и твёрдые вещества вращаются циклонически в Северном полушарии и антициклонически - в Южном, т.е. против часовой стрелки в первом случае и по её движению - во втором. Это атмосферные вихри, к которым относятся циклоны тропические и средних широт, ураганы, торнадо, тайфуны, тромбы, орканы, вили-вилли, бегвиз, смерчи и т. п.

Природа этих образований во многом общая. Тропические циклоны обычно в диаметре меньше, чем в средних широтах и составляют 100-300 км, но скорости движения воздуха в них большие, достигающие 50-100 м/с. Вихри с большими скоростями движения воздуха в районе тропической зоны западной части Атлантического океана около Северной и Южной Америки получили название ураганов, торнадо, аналогичные около Европы – тромбов, около юго-западной части Тихого океана – тайфунов, около Филиппин - бегвиза, около берегов Австралии – вили-вилли, в Индийском океане – орканов.

Тропические циклоны образуются в экваториальной части океанов на широтах 5-20° и распространяются в западном направлении вплоть до западных границ океанов, а затем в северном полушарии движутся на север, в южном – на юг. При движении на север или юг они часто усиливаются и называются тайфунами, торнадо и т.д. Выходя на материк, они довольно

быстро разрушаются, но успевают нанести значительный ущерб природе и людям. Подобные вращательные движения воздуха меньших размеров над морем или океаном получили название смерчей.



Рис. 1а, б. Торнадо. Образования формы, изображённой на рисунке часто называют “воронкой торнадо”. Образование от верхней части торнадо в виде облака до поверхности океана называют трубой или хоботом торнадо (а, вверху) . Вид сверху на облако торнадо, частично оно расположено над Флоридой (б, внизу).



<http://www.oceanology.ru/wp-content/uploads/2009/08/bondarenko-pic3.jpg>

### **Принятая гипотеза формирования циклонических образований.**

Считается, что возникновение циклонов и пополнение их энергией происходит в результате подъёма больших масс тёплого воздуха и скрытой теплоты конденсации. Считается, что в районах образования тропических циклонов вода теплее атмосферы. В этом случае воздух нагревается от океана и поднимается вверх. В результате влага конденсируется и выпадает в виде дождей, давление в центре циклона падает, что и приводит к возникновению вращательных движений воздуха, влаги, твердых веществ, заключенных в циклоне [3, 5, 7]. Считается, что в энергетическом балансе тропических циклонов важную роль играет скрытая теплота испарения. При этом температура океана в области зарождения тропического циклона

должна быть не меньше  $26^{\circ}\text{C}$ .

Эта общепринятая гипотеза формирования циклонов возникла без анализа натурной информации, путём логических умозаключений и представлений её авторов о физике развития подобных процессов. Естественно предположить: если воздух в образовании поднимается, что происходит в циклонах, то он должен быть легче, чем воздух на его периферии. Так и считается: лёгкий тёплый воздух поднимается, влага конденсируется, давление падает, возникают вращательные движения циклона.

Некоторые исследователи видят слабые стороны этой, хотя и общепринятой, гипотезы. Так, они считают, что локальные перепады температуры и давления в тропиках не настолько велики, чтобы только эти факторы могли сыграть решающую роль в возникновении циклона, т.е. столь значительно ускорить воздушные потоки [6]. До сих пор остаётся неясным, какие физические процессы протекают на начальных стадиях развития тропического циклона, каким образом усиливается исходное возмущение, как возникает система крупномасштабной вертикальной циркуляции, подводящая энергию в динамическую систему циклона [4]. Приверженцы этой гипотезы никак не объясняют закономерностей потоков тепла из океана в атмосферу, а просто предполагают их наличие.

Мы же видим очевидный следующий недостаток этой гипотезы. Так, чтобы воздух нагревался от океана, недостаточно, чтобы океан был теплее воздуха. Необходим поток тепла с глубины к поверхности океана, а следовательно, и подъём воды. Вместе с тем, в тропической зоне океана вода на глубине всегда холоднее, чем у поверхности, и такого тёплого потока не существует. Кроме того вода в океане практически всегда холоднее воздуха. В принятой гипотезе, как отмечалось, циклон формируется при температуре воды более  $26^{\circ}\text{C}$ . Однако в реальности мы этого не наблюдаем. Так в экваториальной зоне Тихого океана, где активно образуются тропические циклоны, средняя температура воды  $\sim 25^{\circ}\text{C}$ . При этом циклоны чаще

образуются во время Ла-Нинья, когда температура поверхности океана понижается до 20°C и редко во время Эль-Ниньо, когда температура поверхности океана повышается до 30°C. Поэтому можно считать, что принятая гипотеза формирования циклонов не может реализоваться, во всяком случае, в тропических условиях.

Мы провели анализ этих явлений и предлагаем свою гипотезу формирования и развития циклонических образований, на наш взгляд, правильнее объясняющую их природу. Активную роль в формировании и пополнении энергией вихревых образований играют долгопериодные океанические волны, получившие название волн Россби.

**Волны Россби Мирового океана.** Они составляют часть взаимосвязанного поля свободных, прогрессивных, распространяющихся в пространстве волн Мирового океана, обладают свойством в открытой части океана распространяться в западном направлении. Волны Россби присутствуют во всём Мировом океане, но в экваториальной зоне они большие. Движение частиц воды в волнах и волновой перенос (Стоксов, Лагранжев) это, фактически, волновые течения. Их скорости (эквивалент энергии) изменяются во времени и пространстве. По итогам исследований [2] скорость течения равна амплитуде колебания скорости течения волн, фактически – максимальной скорости в волне. Поэтому наибольшие скорости волновых течений наблюдаются в областях сильных крупномасштабных течений: западных пограничных, экваториальных и циркумполярном течении.

В соответствии с исследованиями [2] эти волны правильнее было бы отнести к Большим уединённым волнам, открытыми Дж. Расселом в 1939 г, которые впоследствии были названы Солитонами и так называются в настоящее время. Но поскольку эти волны, наблюдаемые в природе, названы волнами Россби так будем делать и мы.

Движения частиц воды в волнах по орбитам (волновые течения) имеют горизонтальную и вертикальную составляющую. Вертикальные скорости течений в волнах невелики, они составляют приблизительно тысячную часть горизонтальной скорости течения. Если учесть, что горизонтальная скорость на Экваторе достигает 1 м/с, то вертикальная равна приблизительно 1 мм/с. При этом, если длина волны равна 1 тыс. км, то область подъёма и опускания воды составит 500 км. За счёт подъёма и опускания воды изменяется температура воды на поверхности и образуются холодные и тёплые аномалии, нередко округлой формы.

### **Формирование атмосферных вихрей (гипотеза автора).**

Тропические циклоны и торнадо, цунами и т.д. движутся по экваториальным и зонам западных пограничных течений, в которых волны Россби имеют наибольшие вертикальные скорости движения воды. Как отмечалось, в этих волнах подъём глубинной воды на поверхность океана в тропических и субтропических зонах приводит к созданию на поверхности океана значительных отрицательных аномалий воды овальной формы, с температурой в центре ниже температуры вод, их окружающих, “температурных пятен”. В экваториальной зоне Тихого океана аномалии температуры имеют такие параметры:  $\sim 2 - 3$  °С, диаметр  $\sim 500$  км.

Сам факт движения тропических циклонов и торнадо по зонам экваториальных и западных пограничных течений, а также анализ развития таких процессов, как апвеллинг – даунвеллинг, Эль-Ниньо – Ла-Нинья, пассатов и навёл нас на мысль о том, что атмосферные вихри как-то должны быть связаны физически с активностью волн Россби, а точнее должны ими порождаться, чему впоследствии мы нашли объяснение.

Аномалии холодной воды охлаждают атмосферный воздух, создавая отрицательные аномалии овальной формы, близкой к круговой, холодного воздуха в центре и более тёплого на периферии. В результате и давление

внутри аномалии оказывается ниже, чем на её периферии. Как следствие этого возникают усилия, обусловленные градиентом давления, которые движут массы воздуха и содержащейся в нём влаги и твёрдых веществ в центр аномалии –  $P$ . На массы воздуха действует сила Кориолиса -  $K$ , которая отклоняет их вправо в Северном полушарии и влево в Южном. Таким образом, массы будут двигаться в центр аномалии по спирали под действием силы  $F$ . Чтобы циклоническое движение возникло, сила Кориолиса должна быть отлична от нуля. Так как  $K = 2m\omega u \sin\phi$ , где  $m$  – масса тела,  $\omega$  – угловая частота вращения Земли,  $\phi$  - широта места,  $u$  – модуль скорости движения тела (воздуха, влаги, твёрдых веществ). На экваторе  $K = 0$ , поэтому циклонические образования там не возникают. В связи с движением масс по окружности образуется центробежная сила -  $\Pi$ , стремящаяся оттолкнуть массы от центра аномалии. В целом на массы будет действовать сила стремящаяся сместить их по радиусу -  $P = \delta P - \Pi$  и сила Кориолиса  $K$ .

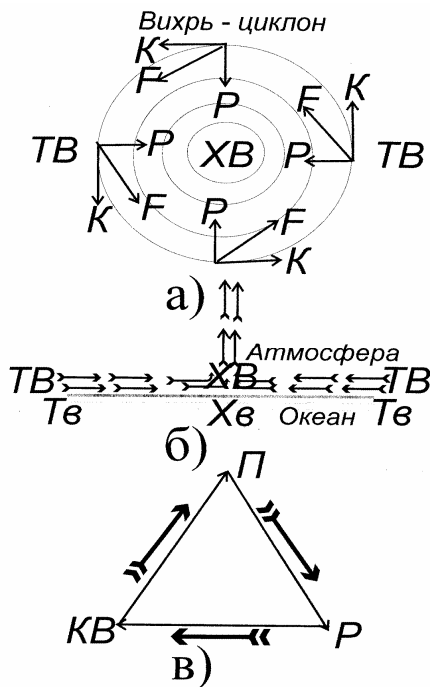


Рис. 2а, б, в. Схема формирования атмосферного вихря: а) - вид сверху, б) – вид по вертикальному сечению атмосфера – океан, движение воздуха над температурной аномалией океана, в) – схема усиления вихря. Условные обозначения: тонкие линии округлой формы на рис. а) – линии равного давления, давление в центр вихря - циклона увеличивается,  $ТВ$  и  $ХВ$  – тёплый и холодный воздух,  $Тв$  и  $Хв$  – тёплая и холодная вода океана, силы:  $P = \delta P - \Pi$  – сила направленная в центр вихря,  $\delta P$  – градиент атмосферного давления направленный в центр вихря – циклона,  $\Pi$  – центробежная сила, направленная от центра циклона,  $K$  – сила Кориолиса,  $F$  – результирующая сила.  $\Pi$  – поток воздуха и взвесей возникающий под действием силы  $P$ , на

рис. б) обозначенной стрелкой  $\longleftrightarrow$ ,  $КВ$  – конденсация влаги,  $\leftarrow\leftarrow$  - направленность процессов.

Аномалии холодной воды охлаждают атмосферный воздух, создавая отрицательные аномалии овальной формы, близкой к круговой, холодного воздуха в центре и более тёплого на периферии. В результате и давление внутри аномалии оказывается ниже, чем на её периферии. Как следствие этого возникают усилия, обусловленные градиентом давления, которые движут массы воздуха и содержащейся в нём влаги и твёрдых веществ в центр аномалии –  $P$ . На массы воздуха действует сила Кориолиса -  $K$ , которая отклоняет их вправо в Северном полушарии и влево в Южном. Таким образом, массы будут двигаться в центр аномалии по спирали под действием силы  $F$ . Чтобы циклоническое движение возникло, сила Кориолиса должна быть отлична от нуля. Так как  $K = 2m\omega u \sin\phi$ , где  $m$  – масса тела,  $\omega$  – угловая частота вращения Земли,  $\phi$  - широта места,  $u$  - модуль скорости движения тела (воздуха, влаги, твёрдых веществ). На экваторе  $K = 0$ , поэтому циклонические образования там не возникают. В связи с движением масс по окружности образуется центробежная сила -  $C$ , стремящаяся оттолкнуть массы от центра аномалии. В целом на массы будет действовать сила стремящаяся сместить их по радиусу -  $P = \delta P - C$  и сила Кориолиса  $K$ . Скорость вращения масс воздуха, влаги и твёрдых веществ в образовании и подачи их в центр циклона будет зависеть от градиента силы  $\delta P$ . Чаще всего в аномалии  $\delta P > C$ . Сила  $C$  достигает существенной величины при больших угловых скоростях вращения масс. Такое распределение усилий приводит к тому, что воздух с содержащимися в нём влагой и твердыми частицами устремляется в центр аномалии и там выталкивается вверх. Именно выталкивается, но не поднимается, как это считается в принятых гипотезах образования циклонов. При этом поток тепла направлен из атмосферы в океан, а не из океана в атмосферу, как в принятых гипотезах.

Подъём воздуха вызывает конденсацию влаги и, соответственно, падение давления в центре аномалии, образование облачности над ней,

выпадение осадков. Это приводит к уменьшению температуры воздуха аномалии и ещё большему падению давления в её центре. Возникает своего рода связь процессов, взаимно усиливающих друг друга: падение давления в центре аномалии увеличивает подачу в нее воздуха и, соответственно, его подъём, что в свою очередь приводит к ещё большему падению давления и, соответственно, увеличению поступления масс воздуха, влаги и твёрдых частиц в аномалию. В свою очередь это приводит к сильному увеличению скоростей движения воздуха (ветра) в аномалии, образуя вихрь.

Итак, мы имеем дело со связью процессов, взаимно усиливающих друг друга. Если процесс протекает без усиления, в вынужденном режиме, то, как правило, скорость ветра небольшая - 5-10 м/с, но в отдельных случаях может достигать и 25 м/с. Так, скорость ветров – пассатов составляет 5 – 10 м/с при различиях температуры поверхностных вод океана 3-4°С на 300 – 500 км. В прибрежных апвеллингах Каспийского моря и в открытой части Черного моря ветры могут достигать 25 м/с при различиях температуры воды ~ 15°С на 50 – 100 км. При “работе” связи процессов, взаимно усиливающих друг друга в тропических циклонах, торнадо, смерчах скорость ветра в них может достигать существенных величин - свыше 100-200 м/с.

**Подпитка тропического циклона энергией.** Мы уже отмечали, что волны Россби распространяются вдоль Экватора на запад. Они формируют на поверхности океана отрицательные по температуре аномалии воды в диаметре ~ 500км, которые поддерживаются отрицательным потоком тепла и массы воды, поступающей с глубины океана. Расстояние между центрами аномалий равно длине волны, ~ 1000 км. Когда циклон находится над аномалией, то он подпитывается её энергией. Но когда циклон оказывается между аномалиями, он практически не подпитывается энергией, поскольку в этом случае отсутствуют вертикальные отрицательные потоки тепла. Эту зону он проскакивает по инерции, возможно, с небольшой потерей энергии. Далее в очередной аномалии он получает дополнительную порцию энергии, и так продолжается на всём пути движения циклона, переходящего нередко в



торнадо. Разумеется, могут возникать условия, когда циклон не встретит аномалий или они будут малыми, и он может со временем разрушиться.

**Формирование торнадо.** После того, как тропический циклон достигнет западных границ океана, он движется на север. За счёт увеличения Кориолисовой силы увеличиваются угловая и линейная скорости движения воздуха в циклоне, давление в нём падает. Перепады давления внутри и вне циклонического образования достигают величин более 300 мб, в то время как в циклонах средних широт эта величина составляет ~ 30 мб. Скорости ветра превышают 100 м/с. Область подъёма воздуха и содержащихся в нём твёрдых частиц и влаги сужается. Она получила название хобота или трубы вихревого образования. Массы воздуха, влаги и твёрдых веществ поступают с периферии циклонического образования в его центр, в трубу. Такие образования с трубой получили название торнадо, тромбов, тайфунов, смерчей (рис. 1а).

При больших угловых скоростях вращения воздуха в центре торнадо возникают условия:  $\delta P \sim \Pi$ . Сила  $\delta P$  стаскивает массы воздуха, влаги и твёрдых частиц с периферии торнадо на стенки трубы, сила  $\Pi$  - с внутренней области трубы на ее стенки. В этих условиях влага и твердые вещества в трубе отсутствуют и воздух прозрачен. Такое состояние воздуха в торнадо, цунами и др. получило название “глаз бури”. На стенках трубы результирующая сила, действующая на частицы, практически равна нулю, а внутри трубы она мала. Также малы угловая и линейная скорости вращения воздуха в центре торнадо. Это и объясняет отсутствие ветра внутри трубы. Но такое состояние торнадо, с “глазом бури” наблюдается не во всех случаях, а только тогда, когда угловая скорость вращения веществ достигает значительной величины, т.е. в сильных торнадо.

Торнадо, как и тропический циклон, на всём пути следования над океаном подпитывается энергией температурных аномалий воды, создаваемых волнами Россби. Такие отрицательные аномалии с большими перепадами температуры часто образуются в замкнутых морях в частности, в

Карибском море и Мексиканском заливе. В этом случае торнадо движущиеся с юга к берегам Северной Америки могут значительно усилиться. На суше такой механизм подкачки энергии отсутствует и поэтому торнадо относительно быстро разрушается. Для обоснования наших выводов приведём дословно выдержку из сайта Интернета “Атмосферные процессы в Карибском море”: “Ресурс представляет динамическое изображение тропического урагана (торнадо) Dean, одного из наиболее мощных в 2007 году. Наибольшую силу ураган набирает над водной поверхностью, а при прохождении над сушей происходит его “размывание” и “ослабление”.

Ясно, что для прогноза состояния торнадо по пути его следования над океаном необходимо знать термодинамическое состояние поверхностных и глубинных вод. Такую информацию дают съёмки из космоса.

Тропические циклоны и торнадо чаще образуются летом и осенью, в это время в Тихом океане формируется явление Ла-Нинья. Почему? В экваториальной зоне океанов именно в это время волны Россби достигают наибольшей амплитуды и создают аномалии температуры значительной величины, энергией которых и питается циклон [1]. Нам не известно, как ведут себя амплитуды волн Россби в субтропической части океанов, поэтому нельзя утверждать, что аналогичное происходит и там. Но хорошо известно, что глубокие отрицательные аномалии в этой зоне появляются летом, когда поверхностные воды нагреты сильнее, нежели зимой. В этих условиях возникают температурные аномалии воды и воздуха с большими перепадами температуры, чем и объясняется образование сильных торнадо в основном летом и осенью.

**Смерчи.** Это вихревые образования небольших размеров. Как и торнадо, они имеют трубу, образуются над океаном или морем, на поверхности, которых возникают температурные аномалии небольших по площади размеров. Автору статьи приходилось многократно наблюдать смерчи в восточной части Чёрного моря, где большая активность волн Россби на фоне очень

тёплого моря приводит к образованию многочисленных и глубоких температурных аномалий поверхностных вод. Развитию смерчей в этой части моря также способствует очень влажный воздух

**Циклоны средних широт.** В средних широтах, так же и тропиках, может образоваться циклон. Но он, как правило, не переходит в торнадо, поскольку выполняются условия  $\delta P \gg C$ .

В этих условиях вектор скорости движения масс воздуха, влаги и твёрдых частиц направлен по окружности циклона и все эти массы только слабо поступают в его центр. Поэтому циклон не сжимается и не превращается в торнадо.

Нам удалось проследить образование циклона над Чёрным морем. Волны Россби нередко создают отрицательные температурные аномалии поверхностных вод в центральных районах западной и восточной его частях. Они и образуют над морем циклоны, иногда с большой скоростью ветра. Нередко температура в аномалиях достигает  $\sim 10 - 15$  °С, в то время, как над остальным морем температура воды  $\sim 23$ °С. На рис.3а приведено распределение температуры воды Чёрного моря. На фоне относительно тёплого моря с температурой поверхностных вод до  $\sim 23$ °С в западной его части выделяется аномалия воды до  $\sim 10$ °С. Различия весьма существенны, что и сформировало циклон (рис. 3а). Этот пример свидетельствует о возможности реализации предложенной нами гипотезы формирования циклонических образований.

Нередко к Чёрному морю со стороны Средиземного приходит циклон, который значительно усиливается над Чёрным морем. Так, скорее всего, в ноябре 1854г. образовалась знаменитая Балаклавская буря, потопившая Английский флот. Аналогичные изображённым на рис.3а температурные аномалии воды образуются и в других замкнутых или полузамкнутых морях.

Так, мы уже отмечали, что торнадо движущиеся в сторону США, часто значительно усиливаются при прохождении над Карибским морем или Мексиканским заливом.

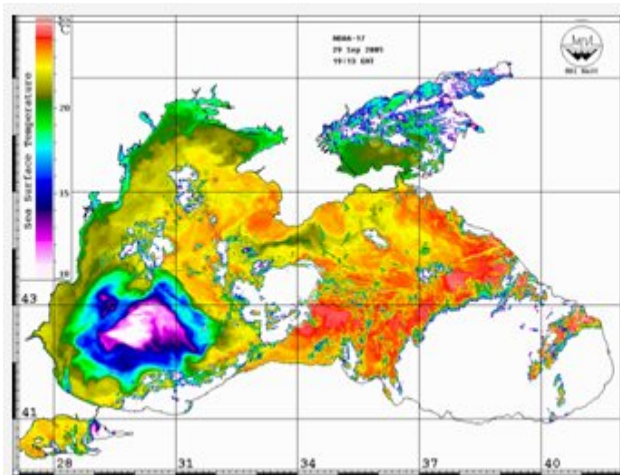
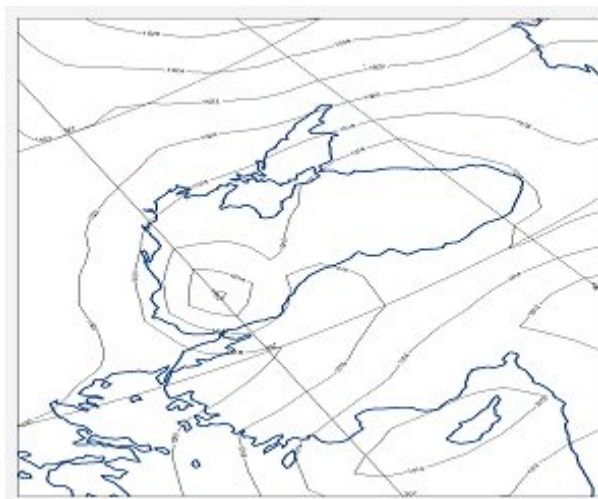


Рис. 3а, б. Поле температуры поверхностных вод Чёрного моря на время 19 ч. 29 сентября 2005г (вверху). Схема поля атмосферного давления над Чёрным морем и около его, соответствующее времени: 19ч. 29 сентября 2005г. Давление в мб. В западной части моря находится циклон. Средняя скорость ветра в районе циклона равна 7 м/с и направлена циклонически вдоль изобар (внизу).



**Образование атмосферных вихрей над сушей.** Мы рассмотрели образование атмосферных вихрей над океаном или морем. Но известно, что вихри возникают и над сушей. Сценарии их возникновения схожи. В начальный момент должны существовать условия, создающие область холодного воздуха, окружённого тёплым воздухом. Скорее всего она возникает в условиях образования облачности над ней. Такая ситуация приводит к падению давления в центре холодного воздуха. Далее всё развивается по сценарию, который мы ранее рассматривали в разделе “Формирование атмосферных вихрей (гипотеза автора)”. Однако подпитка

энергией вихря осуществляется только за счёт конденсации влаги, содержащейся в воздухе.

**Выводы.** Атмосферные вихри (тропические циклоны, торнадо, тайфуны и пр.) формируются температурными аномалиями поверхностных вод с отрицательной температурой, в центре аномалии температура воды ниже, на периферии - выше. Эти аномалии формируются волнами Россби Мирового океана, в которых происходит подъём холодной воды с глубины океана к его поверхности. При этом температура воздуха в рассматриваемых эпизодах обычно бывает выше температуры воды. Впрочем, выполнение этого условия не обязательно, атмосферные вихри могут быть образованы, когда температура воздуха над океаном или морем ниже температуры воды. Главное условие образования вихря: наличие отрицательной аномалии воды и разности температур вода – воздух. В этих условиях и создаётся отрицательная аномалия воздуха. Чем больше разность температур атмосфера – вода океана, тем активнее развивается вихрь. Если температура воды аномалии равна температуре воздуха, то вихрь не образуется, а существующий в этих условиях не развивается. Далее всё происходит так, как было описано.

#### **Литература:**

1. Бондаренко А.Л. Эль-Ниньо – Ла-Нинья: механизм формирования// Природа. №5. 2006. С. 39 – 47.
2. Бондаренко А.Л., Борисов Е.В., Жмур В.В. О длинноволновой природе морских и океанских течений// Метеорология и гидрология. 2008. №1. С. 72 – 79.
3. Иванов В.Н. Зарождение и развитие тропических циклонов// С.: Тропическая метеорология. Труды III Международного симпозиума. 1985. Л. Гидрометеоиздат.
4. Моисеев С.С., Сагдеев Р.З., Тур А.В., Хоменко Г.А., Шукуров А.В. Физический механизм усиления вихревых возмущений в атмосфере// Доклады Академии наук СССР. 1983. Т.273. №3.
5. Наливкин Д.В. Ураганы, бури, смерчи. 1969. Л.: Наука.

6. Юсупалиев У., Анисимов Е.П., Маслов А.К., Шутеев С.А. К вопросу формирования геометрических характеристик смерча. Часть II// Прикладная физика. 2001.№1.
7. Gray W. M. Tropical cyclone genesis// Atmos. Sci. Paper, Colo. St. Univer. 1975. №234.