

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физ.-мат. наук Курганского М.В. на диссертацию **Стадхолма Дж.Г.П.** «Тропические циклоны и крупномасштабная динамика атмосферы», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Диссертационная работа Джошуа Генри Пола Стадхолма посвящена актуальному и практически важному исследованию тропических циклонов (ТЦ) и их связи с особенностями крупномасштабной циркуляции атмосферы, прежде всего с циркуляцией Хэдли. Автор развил оригинальную методику, позволяющую определять характеристики циркуляционных ячеек Хэдли отдельно по секторам над акваторией земных океанов и связывать эти характеристики со свойствами ТЦ в указанных секторах: широтой зарождения ТЦ, широтой максимальной интенсивности ТЦ и, наконец, широтой разрушения (исчезновения) ТЦ. Получен общий вывод о том, что в последние десятилетия наблюдается синхронный и близкий по скорости рост широт указанных характеристик ТЦ, с одной стороны, и широты границы ячейки Хэдли со стороны субтропиков, с другой стороны. Диагностические исследования дополнены в диссертации численными расчетами на «почти-глобальной» модели атмосферы, позволяющей варьировать меридиональный градиент температуры поверхности океана (ТПО) и моделировать как крупномасштабную циркуляцию, так и ТЦ. При уменьшении меридионального градиента ТПО по сравнению с современным климатом возникает существенная проблема, связанная с необходимостью разделения тропических и внетропических циклонических образований. Решение автором задачи разработки объективных критериев разделения ТЦ и внетропических циклонов (помимо географической широты места) составляет одно из достижений работы. Автором сделана важная попытка выделить в чистом виде на численной модели эффект отклика ТЦ на уменьшение меридионального градиента ТПО. Что касается одновременного отклика циркуляции Хэдли, то имеющееся рассогласование с данными наблюдений ведет автора к выводу о вероятном влиянии изменений в субтропическом струйном течении и возможно в широте внутритропической зоны конвергенции на этот отклик.

Диссертация общим объемом в 183 страницы состоит из введения, пяти глав, заключения и очень детального списка литературы на 45 страницах из 427 наименований. Введение предваряется кратким резюме работы, оглавлением работы и, наконец, списком иллюстраций и таблиц, которые приведены далее в диссертации, в обоих случаях с подписями к ним. Главы 2-4 диссертации снабжены заключительными разделами, где обсуждаются и резюмируются полученные в главе результаты. В этих главах имеются приложения, в которые вынесены детали технического характера.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели исследования, указано, в чем именно заключена научная новизна работы, сформулированы выносимые на защиту основные научные положения. Здесь же обосновывается достоверность полученных результатов и их научная и практическая значимость, описан личный вклад автора, приведены благодарности организациям и

физическим лицам за содействие автору в работе над диссертацией, охарактеризована структура и объем работы.

В первой главе диссертации, имеющей в основном обзорный и вводный характер, проводится анализ текущего состояния исследований по теме диссертации: прямых измерений, палеоклиматических реконструкций, теоретического и численного моделирования. Обсуждаются наблюдающиеся в последние десятилетия смещения зон максимальной интенсивности ТЦ к полюсам в обоих полушариях, а также прямая и косвенная связь динамики популяции ТЦ и характеристик циркуляции Хэдли. Дается очень краткий очерк теории циркуляции Хэдли, носящей в настоящее время полуколичественный, в основном эвристический, характер и указываются на ограничения этой теории. В литературном обзоре упоминаются две основные теоретические концепции зарождения ТЦ: теория CISK (conditional instability of the second kind, т.е. условной неустойчивости второго рода) и WISHE (wind-induced surface heat exchange, т.е. индуцированного ветром обмена теплом с поверхностью). Отмечается, впрочем, также более недавняя концепция возникновения ТЦ в условиях, как бы уподобляющихся существующим в сумке сумчатых животных ('marsupial pouch' framework). Впрочем, можно также было бы упомянуть еще одну существующую концепцию, объясняющую тропический циклогенез синергетическим эффектом слияния вращающихся горячих облачных башен (vortical hot tower route to tropical cyclogenesis).

Во вводном параграфе второй главы дан обзор опубликованных работ, где анализируется широтные тренды ТЦ, в том числе с концептуальной точки зрения в связи с характеристиками тропической циркуляции Хэдли. Однако подчеркивается, что подробный анализ связи между ТЦ и циркуляцией Хэдли, основываясь при этом на прямых наблюдательных данных, так и не был ранее сделан. В этой связи, по двум основным независимым архивам данных о ТЦ в работе рассчитываются характеристики популяций ТЦ над земными океанами и определяются тенденции их изменений в терминах широтного смещения зон (а) генезиса ТЦ, (б) максимальной интенсивности ТЦ за весь период их жизни и (в) лизиса (распада) ТЦ. С учетом того, что циркуляция Хэдли в обоих полушариях зонально-несимметрична, в работе предлагается метод расчета функции тока зонально осредненной по секторам меридиональной циркуляции Хэдли на основе разложения Гельмгольца поля скорости на безвихревую (потенциальную) и бездивергентную (вихревую, соленоидальную) составляющие. Поле функции тока строится по данным о меридиональном компоненте потенциальной (дивергентной) составляющей скорости ветра и по этой функции определяется как интенсивность, так и меридиональная протяженность ячейки Хэдли. Предложенная методика дает хорошие результаты, согласующиеся с физикой явления. В главе 2 определяются широтные тренды характеристик ТЦ за 1981-2016 гг., указывающие в основном на возрастание широты максимальной интенсивности ТЦ за период их жизни в обоих полушариях. Несколько выделяется восток Тихого океана в Северном полушарии, где выявлен тренд уменьшения широты зоны разрушения ТЦ. В целом, автор отмечает значительные неопределенности в результатах для различных секторов полушарий. Следующий параграф главы касается протяженности в меридиональном направлении ячейки Хэдли в сопоставлении с широтой ТЦ. Выявлены согласующиеся между собой положительные тренды соответствующих характеристик. Что касается вопроса о межгодовой изменчивости, то в работе найдено,

что хорошая корреляция во времени широт генезиса ТЦ и максимальной интенсивности ТЦ за период их жизни, с одной стороны, и меридиональной протяженности ячейки Хэдли, с другой стороны, в основном обусловлена процессами в Тихом океане. Получено, что в отдельные периоды наблюдается прекрасная корреляция между двумя этими характеристиками в целом по полушариям, потом она исчезает (в 1990-е годы) и в 21 веке появляется снова. Эти результаты требуют, конечно, объяснения и интерпретации. Очередной параграф главы касается исследования связи интенсивности ячейки Хэдли и характеристик ТЦ. Здесь не удастся найти какой-то четкой корреляции за единственным исключением восточной части Тихого океана в Северном полушарии, где автор обнаружил значимое сокращение в меридиональном направлении протяженности ячейки Хэдли и одновременное продвижение на север основных характеристик популяции ТЦ в этом секторе. Следует сразу отметить, что указанная ячейка является наиболее слабой и наименее протяженной по сравнению со всеми другими ячейками Хэдли над океанами и, кроме того, подвержена влиянию других циркуляций, в том числе связанных с явлением Эль-Ниньо к югу от этого региона. В любом случае, понять причины этого аномального поведения является интересной научной задачей и в диссертации сделан шаг в этом направлении. Два заключительных раздела главы 2 касаются вопроса о связях между ТЦ и крупномасштабной динамикой атмосферы, в первую очередь циркуляцией Хэдли и дают общее обсуждение и выводы, которые следуют из результатов главы. Отмечу в дополнение к сказанному, как автор заключает, что смещение к полюсам ячейки Хэдли связано с уменьшением меридионального градиента температуры поверхности океана (ТПО) и напоминает состояние Ля Нинья с более прохладной водой у экватора. Глава содержит два полезных дополнения. В первом из них детализируется принцип расчета функции тока зонально-несимметричной меридиональной циркуляции. Во втором кратко описан алгоритм диагностики зонально-несимметричной циркуляции Хэдли.

В развитие диагностических исследований второй главы, в главе 3 методом численного моделирования исследуется эффект уменьшения меридионального градиента ТПО на распределение по широте ТЦ и характеристик циркуляции Хэдли. Используется «почти-глобальная» модель атмосферы в конфигурации аквапланеты, в приближении бета-плоскости с твердыми стенками на  $75^\circ$  широты в обоих полушариях, для условий зимы Северного полушария, с зональной протяженностью области интегрирования в 8 тысяч километров, т.е.  $1/5$  длины окружности экватора. Применяется предложенная в литературе так называемая «гипогидростатическая» модель, позволяющая путем искусственного сокращения отношения между крупным (синоптическим) масштабом и масштабом конвективных движений эффективно воспроизводить в модели, имеющей фактическое пространственное разрешение в 15 км конвективные движения масштаба в 1 км, что необходимо для описания влажной динамики ТЦ. Были проведены три основных модельных эксперимента, отличающихся значениями меридионального градиента ТПО. В первом эксперименте,  $T_{min00}$ , отвечающем современным климатическим условиям, температура поверхности океана в точках, удаленных от экватора на 60 и более градусов по широте, полагалась равной  $0^\circ\text{C}$ ; во втором эксперименте  $T_{min06}$ , соответствующем умеренному потеплению средних широт,  $-6^\circ\text{C}$  и, наконец, в третьем эксперименте  $T_{min15}$ , отвечающем очень сильному потеплению умеренных широт  $-15^\circ\text{C}$ . В среднем по области интегрирования, уменьшение меридионального градиента ТПО ведет к

возрастанию, по приближенно линейному закону, потоку энтальпии от океана к атмосфере. Нижняя атмосфера высоких широт становится при этом более теплой и влажной. Также усиливается циклоническая вихревая активность в средних широтах, модулирующая приземные ветра, а значит и потоки энтальпии. В тропиках потоки энтальпии оказываются максимальными в эксперименте Tmin00. По результатам расчетов также оценивалась конвективная доступная потенциальная энергия (CAPE, convective available potential energy), которая в тропиках принимает уменьшенные значения при более пологом градиенте ТПО, но при этом появляется второй максимум продукции CAPE в средних широтах. Отмечу, что в разделе 3.4 было бы желательно четче указать, что представленное, например, на рис. 3-9 распределение CAPE рассчитано с применением методики, разработанной для влажной доступной потенциальной энергии (QAPE). Иначе возникает небольшая путаница, связанная с параллельным использованием в тексте этих двух понятий. С уменьшением меридионального градиента ТПО океана, ячейка Хэдли, которая проникает через экватор в Северное полушарие из Южного (где лето), становится более «вялой», а внутритропическая зона конвергенции, ограничивающая ее с севера, смещается к экватору. В приложении к главе 3 даны технические детали расчета влажной доступной потенциальной энергии. На этом глава 3, носящая во многом методический характер, заканчивается, и результаты численных экспериментов применительно к характеристикам циклонической активности обсуждаются в последующих двух главах диссертации.

При уменьшении меридионального градиента ТПО возникает существенная проблема, связанная с необходимостью разделения тропических и внетропических (с секторной структурой) циклонических образований при их диагностике и прослеживании (tracking), как в данных наблюдений, так и в результатах численного моделирования. Эта проблема в первом приближении отсутствует в современном климате, поскольку популяции ТЦ и внетропических циклонов достаточно четко разделены по широте. Однако, при потеплении климата возможно взаимное проникновение и смешение этих двух популяций. Именно, циклоны обоих типов будут формироваться на одной и той же географической широте, и число таких циклонов будет возрастать при уменьшении меридионального градиента ТПО. Отмечу в этой связи, что и в современных климатических условиях, например, в Южной Атлантике, где ТЦ наблюдаются исключительно редко, известный ураган Катарина (Catarina) в марте 2004 г. вблизи берегов Бразилии, сочетал по некоторым данным классические характеристики ТЦ с отдельными признаками внетропического циклонического образования. В силу всего вышесказанного перед диссертантом возникла задача разработки объективных критериев (помимо географической широты места) разделения ТЦ и внетропических циклонов. Эта задачу, на мой взгляд, автор достаточно убедительно решает в главе 4, в чем видится одно из достижений диссертационной работы. Для разделения ТЦ и внетропических циклонов автор применяет различные методы: метод фазовых диаграмм, кластерный анализ. Получен интересный результат, что при уменьшении меридионального градиента ТПО широта зоны максимальной интенсивности ТЦ за период их жизни существенно увеличивается; в то же время этого почти не происходит с внетропическими циклонами. Были построены композиты для обоих типов циклонов (20 каждого типа), случайным образом выбранных из 90% перцентиля распределения максимума скорости в состоянии максимальной интенсивности за все время жизни циклона. Эти композиты четко

показывают различие между двумя типами циклонов в стадиях а) генезиса, б) максимальной интенсивности и в) лизиса (разрушения). Последний раздел главы посвящен сравнению полученных результатов с наблюдениями и результатами других модельных экспериментов и продемонстрировано в целом неплохое согласие между ними. Глава 4 завершается краткими выводами, следующими из ее содержания и приложения, где обсуждаются некоторые аспекты применения уравнения градиентного ветра к ТЦ.

В заключительной (более краткой по объему и носящей отчасти более дискуссионный характер) главе 5 диссертации обсуждается возможность выделения в чистом виде эффекта меридионального градиента ТПО на широтные характеристики популяции ТЦ. Основой являются идеализированные численные эксперименты, описанные в главе 3. В целом, модельные эксперименты показывают зависимость между изменениями в характеристиках популяции ТЦ и циркуляции Хэдли, соответственно, обратную к той, что идентифицируется в наблюдениях (см. главу 2). При уменьшении меридионального градиента ТПО модель предсказывает сдвиг к полюсам популяции ТЦ (при этом средние широты становятся дополнительной активной зоной генезиса ТЦ), однако циркуляция Хэдли практически не меняется и даже в итоге незначительно смещается к экватору. Выход из этого противоречия, именно с целью объяснить согласованность между данными явлениями, выявленную в натурных наблюдениях, автор ищет на пути привлечения к анализу «третьего фактора», к которому относит в первую очередь положение субтропического струйного течения. Действительно, результаты идеализированных численных экспериментов показывают, что субтропическое струйное течение ослабевает, сдвигается к полюсам и расщепляется по мере того, как внетропические широты нагреваются вследствие ослабления меридионального градиента ТПО. Эти изменения связаны с усилением сдвига ветра в тропиках и ослаблением в субтропиках. Именно поэтому субтропическое струйное течение играет важную роль одного из контролирующих тропический циклогенез факторов, к числу которых, по мнению автора, возможно, также относятся смещения внутритропической зоны конвергенции и, как он пишет в резюме диссертации, «усиливающаяся устойчивость по отношению к конвекции» (*increasing convective stability*). Автор отмечает, что побочным контролирующим фактором в тропической Атлантике является тихоокеанская циркуляция Уокера. Важную роль в формировании зонально-несимметричной циркуляции Хэдли играет явление Эль Ниньо – Южное Колебание (ЭНЮК), и отдельный раздел главы 5 посвящен этому вопросу. Последний раздел главы 5 касается ограничений представляемой автором работы. Первое ограничение касается воспроизведения ТЦ в численных моделях, в том числе в контексте численной модели автора. Подчеркивается желательность дальнейших экспериментов в дополнение к тем трем, изложенным в главе 3. Второе ограничение связано с тем, что Мировой океан рассматривается в численной модели как источник тепла бесконечно большой теплоемкости, хотя на самом деле возникающие ТЦ эффективно перемешивают верхний слой океана и изменяют температуру его поверхности. Поэтому подчеркивается желательность использования в дальнейшем связанных моделей «океан-атмосфера», хотя бы и в упрощенной постановке.

В заключении диссертации на двух страницах сформулированы основные результаты работы с подчеркиванием элементов их новизны и намечены перспективы дальнейших исследований, развивающих тему диссертации.

Диссертация во многом проливает новый свет на тропические циклоны, как природное явление, на циркуляцию Хэдли в тропиках и на связь между ними. Она прекрасно оформлена, написана хорошим языком и легко читается. В ней имеется лишь незначительное число мелких редакционных дефектов (например, не объяснен множитель  $a$  в формуле (1.4) на стр. 33), о которых можно было бы даже и не упоминать. Из других замечаний и пожеланий, а моя обязанность как оппонента на основании внимательного ознакомления с диссертацией высказать таковые, то хочу (кроме сказанного ранее) отметить следующие:

(1) Поскольку дефицит давления определен уравнением (4.1) на стр. 105 как разность между давлением в окружающей вихрь атмосфере  $p_0$  и давлением в центре вихря  $p_m$ , то согласно уравнению (4.2) этот дефицит давления не зависит напрямую от  $p_0$ .

(2) На стр. 106 можно было бы уточнить, что уравнение градиентного ветра применительно к внетропическим циклонам теряет полезность не потому, что становится недействительным само по себе, а потому что внетропические циклоны с их секторной структурой аксиально несимметричны.

(3) Я все-таки считаю, что ячейка Хэдли, с одной стороны, и субтропическое струйное течение, с другой стороны, являются внутренне связанными (согласованными) между собой элементами общей циркуляции атмосферы. Поэтому, на мой взгляд, рассмотрение динамики субтропического струйного течения, как дополнительного внешнего фактора по отношению к динамике ячейки Хэдли, заслуживает в главе 5 более развернутых комментариев, в том числе в отношении того насколько это может быть свойством используемой в главе 3 численной модели.

Высказанные в отзыве замечания ни в коей мере не снижают общей высокой оценки диссертационной работы. Результаты очень большой работы, проделанной автором, представляются надежными, достоверными и никаких сомнений не вызывают. Они согласуются с результатами предыдущих исследований, которые тщательно цитируются и обсуждаются в работе, и с общими физическими принципами. Представленная диссертационная работа, несомненно, является законченным научным исследованием. Автором получены новые, интересные и содержательные результаты по актуальной научной тематике. Эти результаты имеют не только чисто научное значение для физики атмосферы и теории общей циркуляции атмосферы и климата, но и важны практически. Они позволяют оценивать возможный эффект на характеристики активности ТЦ в различных акваториях Мирового океана, в том числе прилегающих к российскому Дальнему Востоку, от происходящих и/или ожидаемых климатических изменений. Результаты и выводы диссертационной работы представляют интерес для Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова и для научных учреждений Российской академии наук (в том числе Института физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Института океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН) и Роскомгидромета (Гидрометцентр России, НПО «Тайфун» и др.).

По теме диссертации автором опубликованы 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных п. 2.3 Положения о присуждении ученых степеней Московского



государственного университета имени М.В. Ломоносова. 4-я работа, удовлетворяющая тем же требованиям, принята к публикации и находится в печати. В трех из четырех публикаций Дж.Г.П. Стадхолм является первым автором. Основные положения работы были представлены на целом ряде международных конференций и семинаров. Все это говорит о достаточной апробации диссертационной работы.

Текст автореферата достаточно полно и адекватно отражает содержание диссертации.

Представленная работа, без всякого сомнения, соответствует требованиям п. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор диссертации – Джошуа Генри Пол Стадхолм – безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Главный научный сотрудник Лаборатории геофизической гидродинамики Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

Д.ф.-м.н. М.В. Курганский

«Подпись руки М.В. Курганского заверяю»  
Ученый секретарь Федерального  
государственного бюджетного учреждения  
науки «Институт физики атмосферы им. А.М.  
Обухова Российской академии наук»



К.г.н. Л.Д. Краснокутская  
«25» октября 2018 года