

АТМОСФЕРНЫЕ КАТАСТРОФЫ: ЭВОЛЮЦИЯ НАУЧНЫХ ВЗГЛЯДОВ И РОЛЬ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Е.А. Шарков

*Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Профсоюзная 84/32
E-mail: esharkov@iki.rssi.ru*

Генерация и эволюция атмосферных катастроф — тропических циклонов — представляет для человечества очень серьезную и пока неразрешенную проблему. В настоящей работе представлен детальный критический анализ существующих физических гипотез и теоретических подходов, на основе которых формулируются целый ряд космических программ по исследованию физических условий генезиса и эволюции атмосферных катастрофических явлений (тропических циклонов). Отмечены наиболее значительные этапы истории развития научных взглядов и представлений о тропических циклонах. Подчеркнуты значение и роль дистанционного зондирования в эволюции научных взглядов.

Введение

Хорошо известно, что тропическая зона глобальной системы океан – атмосфера играет ключевую роль в динамике и эволюции синоптических и климатических метеорологических процессов на Земле. При этом система океан-атмосфера тропической зоны Земли обладает совершенно уникальным свойством генерации достаточно организованных и устойчивых мезомасштабных вихревых структур — тропических циклонов (ТЦ) — из атмосферного турбулентного хаоса в системе глобальной циркуляции. Внимание к исследованию таких систем объясняется целым рядом обстоятельств. В первую очередь, эти атмосферные процессы представляют собой непосредственную физическую опасность для человека и сопровождаются значительным материальным ущербом, а также возникающими при этом административно-социальными проблемами [1–5]. В течение значительного времени человеческое сообщество рассматривало тропические циклоны как наиболее деструктивные элементы системы океан-атмосфера, вызывающие значительные материальные потери и человеческие жертвы. Были предприняты серьезные усилия (в первую очередь, в США и, отметим, совершенно безрезультатно) с тем, чтобы подавить теми или иными техническими средствами этот вид активности системы океан-атмосфера. Не прекращаются эти попытки со стороны целого ряда административных (государственных) структур и по настоящее время.

С другой стороны, однако, внутри ученого сообщества формировалась совершенно иная концепция. Базировалась она первоначально на достаточно наивных представлениях о том, что природа не должна специально «вредить» человеческому сообществу и, причина достаточно стабильного (и, как мы теперь знаем, длительного в историческом плане) функционирования тропического циклогенеза заключается в чем-то другом. И лишь последние исследования с использованием данных космического дистанционного зондирования и последних достижений теории сложных систем указывают на этот принципиально иной взгляд на тропический циклогенез — мы с большой долей вероятности можем говорить об определяющую роли тропических циклонов в формировании глобального массо- и энергообмена в глобальной системе океан – атмосфера и установлении благоприятного для биологической жизни (в том числе, и для человеческого сообщества) на Земле парникового эффекта. Таким образом, глобальный тропический циклогенез, скорее всего, является необходимым и, возможно, определяющим фактором в экологическом равновесии (понимаемой в широком смысле) как в геофизической системе океан-атмосфера, и так и в экосистемах Земли. Катастрофические атмосферные вихри представляют собой своеобразный механизм эффективного сброса избыточного тепла в атмосфере в условиях, когда действие обычных механизмов, основным из которых является турбулентная конвекция и глобальная циркуляция, становится явно недостаточным. Таким образом, катастрофические явления играют важную (и, как это не парадоксально звучит, полезную для человечества) роль при установлении климатического температурного режима Земли (парниковый эффект), отводя излишнее тепло и способствуя предотвращению чрезмерного перегрева планеты в тропической зоне.

Цель настоящей работы представить критический анализ существующих физических гипотез и теоретических подходов, на основе которых формулируются целый ряд космических программ по исследованию физических условий генезиса и эволюции атмосферных катастрофических явлений (тропических циклонов), отметить наиболее значительные этапы истории развития научных взглядов и представлений о тропических циклонах и рассмотреть значение и роль дистанционного зондирования в эволюции научных взглядов.

Ранние научные взгляды

История развития и эволюции человеческих знаний и воззрений об атмосферных катастрофах весьма драматична и поучительна.

По современным представлениям тропический циклогенез стабильно функционировал в акватории Мирового океана в течении очень длительного времени (по крайней мере с последнего ледникового периода). Однако европейцы узнали о существовании таких необычных явлениях природы лишь по данным второй экспедиции Христофора Колумба в 1494 г. (табл. 1). При этом считалось, что это явление есть не что иное, как обычный шторм, но с очень большой силы ветра. Были организованы в 1508 г. первые попытки целенаправленного поиска и наблюдения за такого сорта явлениями или, если использовать современную фразеологию, первые научные экспедиции. Интересно отметить, что последующие великие мореплаватели — Ф. Магеллан (1520) и Джеймс Кук (1776–1779) при проведении своих экспедиций непосредственно не «встретились» с тропическими циклонами, хотя отдельные мореплаватели «встречались» с ураганами неоднократно. Но вплоть до начала XIX века наблюдения тропических циклонов носили чисто фрагментарный характер.

Таблица 1.

<i>Годы</i>	<i>Исторические вехи наблюдений и научных исследований тропических циклонов</i>
1494	Вторая экспедиции Колумба. Первое наблюдение европейцами тропического циклона
1508	Первые целенаправленные наблюдения двух циклонов испанским моряком Ponce de Leon
1806	Формирование шкалы Бофорта. Определение урагана (Admiral Sir Francis Beaufort)
1831	Циркуляционная модель тропического циклона (William C. Redfield)
1831	Первые попытки создания хронологии и климатологии тропических циклонов (William C. Redfield)
1820–1840	Формирование термической и динамической гипотез возникновения тропического циклона
1929	Первый хронологический каталог американских ураганов (Joseph Henry)
1943	Пролет самолета через тело тропического циклона
1947	Модель цикла Карно для тропического циклона
1960–1966	Первые спутниковые изображения тропических циклонов.
1963–1983	Программа “Stormfury” (США)
1964	Предложение и развитие концепции условной неустойчивости второго рода (CISK) (Процедура параметризации, гипотеза механизма трения о поверхность.) (Charney and Eliassen)
1970–1980	Формирование семейств признаков распознавания эволюционных стадий развития тропического циклона (методика ГМЦ, шкала ВМО, шкала Саффир-Симпсон, шкала Дворока)
1983	Физическая модель турбулентного динамо (структуры в спиральной турбулентности) (Сагдеев Р.З., Моисеев С.С. и др.)
1984	Формирование автоматической системы распознавания интенсивности тропических циклонов (Dvorak)
1993	Модель глобального (множественного) циклогенеза (Шарков Е.А.)
1994	Формирование первичных Web-архивов региональных циклогенезов в сети Интернет
1998	Высокоскоростная мультипликация изображений тропических циклонов по данным геостационарных ИСЗ
1999	Формирование детальной базы данных глобального циклогенеза (1983–1999) (Покровская И.В., Шарков Е.А.)
2002	Предложение и развитие модели вращательной неустойчивости в сжимаемой гидродинамике насыщенной атмосфере (Руткевич П.Б.)
2003	Обнаружение отклика 27-дневных вариаций солнечной активности в множественном циклогенезе (Афонин В.В., Шарков Е.А.)

И только бурная административно-хозяйственная деятельность по освоению американского континента обусловило достаточно целенаправленные и (следует признать) вполне квалифицированные научно-технические подходы к изучению циклогенеза Атлантического океана. В первую очередь, здесь надо отметить выделение из других метеорологических явлений и определение в виде количественных характеристик (сила ветра и состояние поверхности моря) адмиралом сэром Френсисом Бофортом тропического циклона (урагана). Поразительно то, что введенное Ф. Бофортом из чисто утилитарных соображений (разрыв порывами ветра парусов) количественная классификация (33 м/с) оказалась абсолютно правильной. Именно при этой скорости ветра происходит формирование из первичных форм зрелой формы циклона и пере-

стройка его динамической структуры. В это же время были предприняты У. Редфилдом первые попытки формирования хронологии и климатологии циклонов Атлантики (на современном языке базы данных). И сделано это было настолько квалифицированно, что даже современные исследователи пользуются этими хронологиями. Кроме того, У. Редфилд сделал еще крупный шаг — он понял, что ураган представляет собой единую спиралевидную структуру.

В 20–30 гг. XIX века был совершен принципиальный прорыв и в физическом понимании природы тропического циклона — были предложены термическая и динамическая гипотезы образования циклона. Первая из них базируется на красивом и казалось бы ясным физическом предположении — «горячий» океан испаряет водяной пар, который переходит в облачные системы с выделением огромного количества тепла, которые под воздействием силы Кориолиса объединяются и формируют крупномасштабный вихрь. Гипотеза оказалась настолько привлекательна и казалось бы соответствовала натурным наблюдениям, что в различных модифицированных формах она имеет приверженцев даже в настоящее время (спустя 170 лет). Однако в этом предполагаемом механизме отсутствует главное — крупномасштабная термогидродинамическая неустойчивость, т. е. тот элемент, который связал бы мелкомасштабные воздушные течения в единый спиральный вихрь. Математическое моделирование и лабораторные эксперименты, выполненные уже значительно позднее — в 60-е годы XX века, показали полную несостоятельность этой модели.

После второй мировой войны была попытка построения модели циклона на базе известного из курса общей физики термодинамического цикла Карно (см. табл. 1). Модель также весьма привлекательна, поскольку мы можем указать и на теплый источник энергии — океан, и на «холодильник» — верхние слои атмосферы. И в соответствии с правилами Карно можно получить значение коэффициента полезного действия такого сорта тепловой машины и затем перевести его в значения кинематической энергии вихря. Поразительно то, что количественные оценки получаются весьма разумные, и модель можно было бы принять за принципиальную основу (как это делается в ряде американских современных публикаций), кроме одной принципиальной детали. Тропический циклон никакого отношения к замкнутым тепловым машинам отношения не имеет — это так называемая (в статистической физике) открытая система, работающая за счет непрерывного обмена с окружающей средой различными видами энергии. И как только обмен нарушается, циклон «заполняется» и преобразуется в различного вида посттайфунные формы.

Последующее столетие вплоть до 60-х гг. XX века прошло под знаком отчаянной борьбы человека с этим грозным явлением природы, которая закончилась проведением дорогостоящей программы “Stormfury” (США), в которой принимало участие значительная часть военно-воздушных сил США, расквартированная в Атлантике и в Тихом океане [6]. Несмотря на полученный огромный экспериментальный материал, основные цели и задачи программы (подавление активности циклогенеза) не были выполнены [7, 8], что и послужило причиной резкой смены направленности исследовательских работ в США по тропическому циклогенезу с активных воздействий (на ТЦ) на прогностическое направление. Именно к этому времени (середина 1960-х гг.) относится получение с низкоорбитальных КА и полярных ИСЗ, а затем в середине 1970-х гг. и с геостационарных ИСЗ, первых оптических и инфракрасных изображений ТЦ, что вызвало ликование со стороны метеорологов, которые считали, что проблема прогноза траектории движения практически уже решена. Однако восторги были преждевременны. Прогностические (в том числе и современные) схемы и модели, основанные в основном на статистических данных, давали (и дают) очень грубые погрешности при прогнозировании (особенно это было заметно при тайфунной атаке на территорию США в августе – сентябре 2004 г.), и становилось ясным, что даже при наличии космической информации важную роль должны играть именно физические модели генезиса начальных форм циклона и эволюции зрелых форм.

Тем не менее продолжались активные поиски семейств признаков по оптическим и ИК-изображениям эволюционных стадий развития ТЦ. Дело в том, что облачные формы, регистрируемые на спутниковых изображениях, обычно содержат признаки дальнейшего усиления или последующего ослабления шторма до того, как уже возникший шторм достигнет стадии значительной интенсивности [9]. На основе этих признаков вырабатываются некоторые правила, позволяющие выработать прогноз развития интенсивности развивающегося шторма. Далее полученная информация стандартизируется для получения определенного кода интенсивности и последующего использования в прогностических целях. Однако в значительной мере все эти признаки являются своего рода феноменологическими, т. е. по-существу угаданными, исходя из каких-либо физических предпосылок. Активная работа по выявлению таких признаков продолжается и в настоящее время.

Одним из наиболее важных для анализа движения тропических штормов в настоящее время считается метод анимации последовательностей спутниковых изображений (мультипликация). Когда такая последовательность проецируется на экран, возможен анализ в режиме реального времени, прогнозисты могут экстраполировать движение тропического шторма в будущее (разумеется, не с очень большой заблаговременностью). Публичная демонстрация (по телевидению и в Интернете, а в последнее время и по мобильной связи) таких анимационных последовательностей придает убедительность прогнозу, например, выхода шторма на сушу в определенном месте, и позволяет населению предпринять самостоятельные действия по спасению собственных жизней, что и было продемонстрировано в США при атаке геофизической стихии в августе-сентябре 2004 г.

В настоящее время исследование генезиса и эволюции устойчивых вихревых систем на фоне глобальной циркуляции и турбулентного хаоса тропической атмосферы развивается в двух принципиальных направлениях [5]:

- «локальный» подход (индивидуальный циклогенез), используемый при исследовании образования единичной (индивидуальной) вихревой структуры из волновых движений в атмосфере и турбулентного хаоса в условиях локальной и сильной неравновесности системы океан-атмосфера;
- «глобальный» подход (множественный циклогенез), рассматривающий образование вихревых систем в акватории Мирового океана как совокупности центров релаксационной генерации в активной среде природной системы океан – атмосфера (при этом последняя рассматривается в глобальном масштабе). Подход предложен сотрудниками ИКИ РАН в 1993 г. и успешно развивается в настоящее время [5].

Локальный подход

Тропический циклон представляет собой явление природы крупного масштаба, и естественно считать, что его генезис (образование) обусловлен крупномасштабной гидродинамической неустойчивостью. Попытки обнаружения такого рода неустойчивости в гидродинамике атмосферы (наряду с теми примитивными моделями, о которых мы уже упоминали) привели к построению так называемой модели условной неустойчивости второго рода, в английской аббревиатуре CISK [10]. Эта, в значительной мере феноменологическая модель считалась основной последние четыре десятилетия и обусловила появление целой плеяды дочерних моделей. Модель была построена на основе уравнений несжимаемой жидкости и состояла в том, что возмущения в тропической зоне и возмущения масштаба кучевого облака взаимодействуют посредством (на первый взгляд, странного) механизма поверхностного трения о морскую поверхность. Основным элементом в модели CISK заняла методика специального математического приема — так называемой параметризации мелкомасштабной конвекции, обусловившая обратную связь крупномасштабной неустойчивости за счет усиления геострофического течения при увеличении давления в обозначившейся тропической депрессии. Несмотря на введенные представления и приема было показано, что модель CISK описывала крупномасштабную неустойчивость. Однако выход за пределы приближения несжимаемой атмосферы модель теряла все свои достижения (см. более детально в [11]). За прошедшие 40 лет явных экспериментальных результатов, которые доказывали бы в явной форме справедливость этой теории, так и не было получено. В настоящее время она стремительно теряет своих сторонников.

Наконец, к началу 1980-х гг. стало ясным, что в решении этой сложнейшей задачи надо исходить из основных физических законов тропической атмосферы. Преимущества такого подхода очевидны, поскольку они позволят оправдать уже существующие эмпирические правила обработки спутниковых данных и сформулировать новые недостающие правила исходя из первых физических принципов. Отметим, что необходимость такого концептуального перехода впервые была осознана (и реализована) физиками Института космических исследований РАН (см. табл. 1).

Результаты авторов этого направления на сегодняшний день включает теорию генерации крупномасштабных вихрей типа тропических циклонов на основе мелкомасштабной спиральной турбулентности. Эти работы были выполнены в Институте космических исследований под руководством академика Р.З. Сагдеева и профессора С.С. Моисеева [11–13]. Они положили начало исследованиям по генерации и развитию атмосферных катастроф на основе новой для гидродинамики концепции — спиральности мелкомасштабной турбулентности атмосферы. Это направление успешно развивается в целом ряде институтов РАН. Концепция спиральности параметризует нелинейность, силу Кориолиса и энергетику системы, и поэтому оказалась столь успешной для модельного описания генерации крупномасштабного вихря. Были проведены специализированные экспедиции в активные зоны циклогенеза Тихого океана в 1989 и 1990 гг., в ходе которых проводилась проверка существующей на то время теории, и были получены данные метеорологического зондирования западной акватории Тихого океана [14–16]. Однако после длительного этапа осознания роли спиральной концепции было понято, что мелкомасштабная турбулентность не является основным фактором, определяющим энергетику вихревой системы (хотя на некоторых этапах эволюции она, возможно, и играет заметную роль) [11]. Из богатого наблюдательного опыта было известно, что основным энергетическим элементом тропических штормов является выделение скрытой теплоты фазовых переходов атмосферной влаги. Таким образом, встал вопрос о термодинамической формулировке гидродинамики влажного воздуха, поскольку если для решения метеорологических вопросов типа образования облаков в атмосфере можно было ограничиться феноменологическими подходами, то для обнаружения новой неустойчивости, лежащей в основе генерации крупномасштабной вихревой структуры в атмосфере, этого могло оказаться явно недостаточно. Требовалось исходить из основных физических принципов термодинамики влажного воздуха с явным учетом выделения скрытой теплоты фазовых переходов. Ранние примитивные

модели имеют варианты как «сухого» так и «влажного» вихрей и отличаются только своими энергетическими характеристиками, и роль фазовых превращений влаги в атмосфере для этих моделей не выходит за рамки вспомогательного элемента. Таким образом, по существу рассматриваются модели сухой атмосферы с феноменологическим подключением водяного пара в виде энергетического источника. При этом упускается из рассмотрения возможность, что процессы фазовых превращений атмосферной влаги могут приводить к принципиальным изменениям динамики атмосферы.

Физическая основа такого подхода состоит в использовании влажной гидродинамики, основанной на термодинамике насыщенного влажного воздуха, допускающего фазовые превращения атмосферной влаги. Физическая суть предлагаемого подхода состоит в том, что роль фазовых превращений атмосферной влаги не сводится только лишь к энергетическому фактору (или термодинамической фазе процесса), как это принято в примитивных моделях циклогенеза, а также к появлению принципиальных изменений в динамике тропической атмосферы (динамической фазы процесса), обусловленных аномальным поведением вертикального профиля скорости звука в насыщенном влажном воздухе. Была построена [17, 18] теория генерации крупномасштабных вихрей в насыщенном влажном воздухе, которая описывает генерацию реальных тропических циклонов из первых термодинамических принципов, поскольку в ней исключены все феноменологические факторы, и характеристики решения описываются реальными термодинамическими параметрами. Отметим, что экспериментальное (и, в первую очередь, дистанционное) доказательство существования рассматриваемой неустойчивости в природных условиях может существенно изменить наши представления о генезисе атмосферных катастроф.

Глобальный подход

Тропический циклогенез, рассматриваемый же в глобальном аспекте, пока еще и остается достаточно слабо изученным физическим процессом, но тем не менее на основе предложенной концепций множественного циклогенеза сотрудниками ИКИ РАН уже получены серьезные и нетривиальные результаты [5]. Очевидно, что структурным фундаментом исследований множественного циклогенеза должны служить методика построения временного ряда глобального тропического циклогенеза — физического процесса, рассматриваемого одновременно на всей акватории Мирового океана (или по акваториям полушарий). И здесь выясняется, что на этот казался бы простой вопрос — как сформировать временную последовательность ТЦ — является совсем не таким простым как кажется и, более того, он является принципиально важным, поскольку от его решения зависит физическая значимость конечного результата.

Экспериментальные геофизические данные о возникновении, временной и пространственной эволюции ТЦ по акваториям Мирового океана были сформированы в систематизированной базе данных «Глобал-ТЦ» [19], где хронологические, гидрометеорологические и кинематические характеристики крупномасштабных тропических возмущений на всей акватории Мирового океана представлены в виде последовательности событий с учетом времени жизни каждого события за период с 1983 по 2004 г. Удалось впервые показать, что сформированный указанным способом случайный процесс представляет собой так называемый телеграфный процесс (на суточных масштабах) [20, 21]. Дальнейшие исследования показали, что вероятностная структура флуктуаций амплитуды исследуемого потока действительно близка к структуре так называемого потока пуассоновского типа, другими словами возникающий циклон ничего не «знает» о предыдущем (что, собственно говоря, и следовало ожидать). Однако были обнаружены и весьма симптоматичные отклонения от пуассоновского модели при увеличении временного масштаба наблюдения. Именно эти отклонения от пуассоновской модели, как оказалось, и несут на себе важнейшую информацию о неравновесности и нелинейности системы [5].

При этом выявление степени неравновесности активной среды системы океан-атмосфера по отношению к генерации когерентных структур имеет важное экологическое значение, поскольку связано с возможной перестройкой режима генерации последовательности индивидуальных ТЦ в глобальный синхронный катастрофический режим генерации супертайфуна, подобно тому, как это происходит в атмосфере планеты Венера. Подобный сценарий событий принес бы человечеству колоссальный ущерб, если бы не поставил вопрос о вообще возможности существования на Земле. И для этого, казалось бы, гипотетического предположения имеется тем не менее вполне определенные экспериментальные свидетельства — так, например, уже давно обнаружены режимы множественной генерации тропических циклонов по 2-3 «в связке». В 1995 г. режим генерации ТЦ был столь активен, что получил название «конвейера» ТЦ в Атлантике, и при этом было зафиксировано по 4 ТЦ в «связке». В августе 2004 г. было зафиксировано девять одновременно функционирующих ТЦ в акватории Мирового океана в течение трех суток. И тем не менее работы сотрудников ИКИ РАН показали [5, 22–24], что волнения преждевременны, поскольку глобальная система океан-атмосфера (в том числе и тропическая зона) находится в условиях весьма слабой неравновесности и, таким образом, возможность принципиальной перестройки режима пуассоновской генерации тропических циклонов в глобальный синхронный катастрофический режим генерации «супертайфуна» исчезающе мала.

Глобальный подход, развиваемый сотрудниками ИКИ РАН, дал возможность экспериментально решить такие важные для термодинамики атмосферы Земли задачи как взаимодействие с вариациями солнечного излучения. Солнечная энергия втекает в атмосферу как непосредственно, в форме электромагнитного излучения, так и от солнечных энергичных частиц путем многочисленных солнечно-магнитосферно-ионосферно-тропосферных взаимодействий. Поскольку земная атмосфера представляет собой сложную термо-аэродинамическую систему со сложными и нелинейными передаточными характеристиками, то следует предположить, что глобальный тропический циклогенез может отражать связи как с прямыми индикаторами солнечной активности, так и с индикаторами геомагнитной активности. В течение длительного времени, начиная с конца 19 века по настоящее время, исследователями предпринимались неоднократные попытки установления корреляционных связей (различными способами — от прямого сопоставления до кросскорреляционной обработки) между возникновением тропических циклонов (в отдельных регионах Мирового Океана) и солнечной (количество солнечных пятен и даже отдельными пятнами) и магнитосферной активностью. Однако они не привели к однозначно и физически наглядно интерпретируемым результатам. Причины такого положения связаны (как теперь становится ясно) с многомасштабностью и нелинейностью процесса взаимодействия солнечной активности и циклогенеза, и по этим причинам стандартные кросскорреляционные подходы, широко используемые при обработке временных рядов наблюдаемых явлений, не могут в принципе привести к положительным результатам. И только предпринятые в самое последнее время по инициативе директора ИКИ РАН член-корреспондента РАН Л.М. Зеленого комплексные исследования солнечно-земных связей при помощи современного вейвлетного анализа дали удивительные результаты (см. табл. 1). Был обнаружен отклик (почти со 100%-ной корреляцией) 27-дневных вариаций солнечной активности во временных рядах глобального циклогенеза [25] (<http://www.iki.rssi.ru/conf/galperin.pdf>). Таким образом, можно считать (о чем мечтали исследователи начала XX века), что солнечная активность является своего рода спусковым механизмом (наряду, разумеется, с другими) при генерации тропических циклонов. Становится ясным, что тропический циклогенез является проявлением сложного нелинейного поведения единой термогидродинамической системы поверхность земли – атмосфера, обладающей собственными динамическими свойствами, характерными временными масштабами и (возможно) резонансными частотами.

Особенности дистанционных методов и требования к космическим системам

Важно отметить, что с самого начала космической эры аппаратный облик той или иной миссии создавался исходя из научных и научно-технических задач и аппаратных достижений на конкретно исторический промежуток времени. История дистанционного зондирования Земли (так как и вообще космических исследований планет и дальнего космоса) достаточно поучительна и противоречива, поскольку отражает противоречивость научных взглядов и представлений о геофизических явлениях, так несовершенство аппаратной техники.

Отсутствие завершенной (и признанной научным сообществом) теоретической модели генезиса и эволюции ТЦ ставило исследования тропического циклогенеза в течении длительного времени в качестве своего рода попутного элемента к космическим миссиям, предназначенных для исследования совсем других геофизических явлений [2,3,5, 26]. В табл. 2 суммированы качественные представления о особенностях дистанционных методов при исследовании и мониторинге ТЦ. В первую очередь, отметим, что широко известные оптические и ИК-изображения ТЦ (см., например, [3]) не предоставляют практически никакой информации о внутренней структуре ТЦ, поскольку являются изображениями снежно-ледового «одеяла» значительной протяженности по высоте (около 5 км). Кроме того, в этих диапазонах электромагнитных волн никак не проявляется другая важная зона ТЦ — зона «выброса» (“outflow”). Микроволновые активные методы и, в первую очередь, радиолокаторы с синтезированной апертурой (SAR), в значительной степени дают информацию о состоянии поверхности океана, никак не отражая термодинамические и дисперсные особенности атмосферы. Микроволновые пассивные методы, в свою очередь, жестко привязаны к термическому профилю атмосферы (в линиях поглощения атмосферных газов) и активно «реагируют» на фазовый состав дисперсной фазы в атмосферы. Хорошо известна и проблема (пока неразрешенная) этих методов — малое пространственное разрешение [26]. Низкоорбитальные космические ИСЗ и аппараты на солнечно-синхронных орбитах, обеспечивая приемлемое пространственное разрешение, дают очень низкое значение «частоты встреч» [5], и тем самым это обстоятельство практически исключает их использование для планомерного исследования данного ТЦ, кроме «случайных» встреч (типичный пример — «случайные» оптические и ИК-изображения с ИСЗ миссии DMSP [3]). Серьезный вклад в исследование крупномасштабной динамики ТЦ внесли, разумеется, аппараты на геостационарных орбитах [5, 9] типа GOES, METEOSAT, GMS. Дальнейшее их использование в значительной степени тормозится низким пространственным разрешением (в оптическом и ИК-диапазонах — 5 км, не говоря уже о планируемых микроволновых измерениях с геостационарных ИСЗ).

Таблица 2. Особенности дистанционных методов мониторинга ТЦ

<i>Диапазоны, КА</i>	<i>Плюсы</i>	<i>Минусы</i>
Оптика, ИК	Разрешение. Динамика	Внутренняя динамика. Зона выброса
РСА (SAR)	Структура поверхности	Внутренняя термодинамика. Зона выброса
Радиотепловые методы	Термодинамика. Фазовый состав	Разрешение. Зона выброса
НОКА, КАССО	Разрешение	Частота встреч с ТЦ. Временная динамика
КАГСО	Временная динамика	Разрешение

Примечание. КА — космический аппарат; РСА (SAR) — радиолокатор с синтезированной апертурой. НОКА — низкоорбитальные космические аппараты; КАССО — космические аппараты на солнечно-синхронной орбите; КАГСО — космические аппараты на геосинхронной орбите.

Принципиально иные цели преследуют предложенные в ИКИ РАН миссии «Зодиак» и «Геликс». Концепция первого проекта [27, 28] заключается в использовании конвертируемой ракетно-космической техники для одновременной доставки значительного количества измерительных зондов непосредственно в зону действия ТЦ. С ее помощью измерительные зонды могут быть распределены по верхней границе исследуемой области атмосферы с тем, чтобы затем при спуске провести с требуемым разрешением по высоте измерения одновременно до нескольких десятков вертикальных профилей таких параметров атмосферы, как скорость ветра, температура, влажность, давление и др.

Реализация предложенного способа доставки диагностической аппаратуры может быть осуществлена при помощи ракетно-космического комплекса, доставляющего несколько десятков малогабаритных (с массой 10–15 кг) автоматических радиозондов и тетронов (баллонов нейтральной плавучести) в требуемую область и распределяющего их по заданной площади. Эксперимент базируется на двух взаимоувязанных методиках: исследования кинематической и термодинамической структуры свободной атмосферы и тела ТЦ методами «разрезов» и «дрейфа». Первым методом определяются «мгновенные» термодинамические характеристики и мелкомасштабная часть кинематики турбулентных потоков в зоне «выброса» и тропосферном «теле» ТЦ. Второй метод может дать информацию о кинематических особенностях турбулентных потоков мезо- и синоптических масштабов в зоне действия ТЦ.

Концепция проекта «Геликс» [29, 30] базируется на необходимости рассмотрения крупномасштабного кризисного состояния как глобального явления, затрагивающего различные геофизические среды, начиная с океанической поверхности и тропосферы и кончая озоносферой и ионосферой. Таким образом, в перспективных проектах по изучению крупномасштабных катастроф необходимо предусмотреть проведение комплексных экспериментов с помощью приборов дистанционной диагностики, предназначенных для измерения характеристик различных геофизических сред (океаническая поверхность – приводный слой; тропосфера; стратосфера – озоновый слой; ионосфера). Исследования кинематических, термодинамических и электродинамических связей между элементами системы океан – тропосфера – верхняя атмосфера в кризисных состояниях предполагается выполнить в проекте «Геликс» с помощью экспериментального КА (или системы малых КА), оснащенного радиолокационной, доплеровской, радиотепловой, ИК- и специальной оптической аппаратурой.

Экспериментальное наблюдение атмосферы при наличии условий вращательной неустойчивости (инверсия высотного профиля звука) ставит на повестку дня требования к принципиально новым методам дистанционного зондирования предкризисных и кризисных ситуаций в земной атмосфере. В первую очередь, это относится к дистанционному определению пространственно-временных характеристик детального высотного профиля содержания водяного пара и температуры внутри облачных систем (конвективного и неконвективного характера), а также поля давления на значительных пространственных океанических акваториях. Подобные исследования принципиально возможно выполнить только при помощи пассивных радиофизических дистанционных космических систем нового поколения [26].

Заключение

Исследования атмосферных катастроф находятся в настоящее время на серьезном переломном этапе, связанном с предложением и разработкой принципиально новой термогидромеханики сжимаемой (конечное значение скорости звука) воздушной среды с насыщенным водяным паром. Это обстоятельство скорее всего существенно изменит наши представления о генезисе и эволюции атмосферных катастроф, а также повлияет на облик и структуру дистанционных систем. В качестве потенциальных направлений необходимо отметить — поиск методик построения по существующим дистанционным данным реального поля давления на различных высотах., разработку методик для существенного улучшения восстановления концентрации водяного пара как в нижней тропосфере, так и верхней тропосфере, поиск нестандартных решений по проектированию дистанционных систем для диагностики различных геофизических блоков атмосферных катастроф. Необходимо также продолжать исследования по выяснению роли и вкладу атмосферных катастроф в динамику и эволюцию глобального климата планеты, так и региональных его составляющих.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 03-05-64143) и программ фундаментальных исследований РАН «Проблемы радиофизики» (ОФН-14) и «Радиоэлектронные методы в исследованиях природной среды и человека» (ОФН-15).

Литература

1. *Pielke R.A. Jr., Pielke R.A. Sr.* Hurricanes. Their Nature and Impacts on Society // John Wiley and Sons. Chichester, London etc., 1997. 279 p.
2. *Шарков Е.А.* Аэрокосмические исследования тропических циклонов // Исслед. Земли из космоса. 1997. № 6. С. 87–111.
3. *Sharkov E.A.* Remote sensing of tropical regions // John Wiley and Sons/PRAXIS. Chichester, N. Y. etc. 1998. 310 p.
4. *Elsner J.B., Kara A.B.* Hurricanes of the North Atlantic // Oxford University Press. N. Y., Oxford. 1999. 488 p.
5. *Sharkov E.A.* Global Tropical Cyclogenesis // Springer/PRAXIS. Berlin, Heidelberg, London, N. Y. etc. 2000. 361 p.
6. *Willoughby H.E., Jorgensen D.P., Black R.A., Rosenthal S.L.* Project STORMFURY: a scientific chronicle 1962-1983 // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1985. V. 66. N 5. P. 505–514.
7. *R.A.K.* A few lesson learned // Science. 1982. V. 217. N 4559. P. 520.
8. *Gray W.M.* A personal (and perhaps unpopular) view of tropical meteorology over the last 40 years and future outlook // 22nd Conf. On Hurricane and Tropical Meteorology, 19–23 May, 1997, Ft Collins, Colorado. American Meteorological Society. Boston. 1997. P. 19–24.
9. *Dvorak V.F.* Tropical cyclone intensity analysis using satellite data. NOAA Tech. Rep. NESDIS 11, US Department of Commerce, Wash., DC 20233, 1984, 47 p.
10. *Charney J.I., Eliassen A.* On the growth of the hurricane depression // J. Atm. Sci. 1964. V. 21. N 2. P. 68–75.
11. *Руткевич П.Б.* Методы описания крупномасштабных атмосферных вихрей типа тропического циклона. М.: ИКИ РАН, 2002. Пр-2073. 61 с.
12. *Моисеев С.С., Сагдеев Р.З., Тур А.В., Хоменко Г.А., Шукуров А.М.* Физический механизм усиления вихревых возмущений в атмосфере // ДАН. 1983. Т. 273. № 3. P. 549–553.
13. *Моисеев С.С., Сагдеев Р.З., Тур А.В., Хоменко Г.А., Яновский В.В.* Теория возникновения крупномасштабных структур в гидродинамической турбулентности // ЖЭФТ. 1983. Т. 85. № 6. С. 1979–1987.
14. *Zimin V.D., Levina G.V., Veiber E.E., Veselov V.M., Gerbec E.E., Zabishniy A.I., Lazarev A.A., Mazurov A.N., Moiseev S.S., Pokrovskaya I.V., Rutkevich P.B., Sagdeev R.Z., Skatchkov V.A., Smirnov N.K., Tunegolovetz V.P., Tur A.V., and Chernikov I.V.* Experimental studies of large-scale structures origination in tropical atmosphere (expedition «Typhoon-89»). Nonlinear Dynamics of Structures // Proc. of Intern. Symp. on Generation of Large-Scale Structures in Continuous Media / Eds. by R.Z. Sagdeev, U. Frisch, F. Hussain, S.S. Moiseev & N.S. Erokhin. World Scientific, Singapore. 1991. P. 327–336.
15. *Клепиков И.Н., Покровская И.В., Шарков Е.А.* Спутниковые и радиодистанционные исследования мезомасштабной атмосферной турбулентности в предтайфунных ситуациях // Исслед. Земли из космоса. 1995. № 3. С. 13–24.
16. *Sharkov E.A.* Spatio-temporal evolution of convective tropical atmospheric turbulence with Doppler radar technique // Intern. Workshop on Radio Methods for Studing Turbulence. University of Illinois, Urbana. 1999. P. 36.
17. *Rutkevich P.B.* Convective and rotational instability in moist air // Physica A. 2002. V. 315. N 1-2. P. 215–221.
18. *Руткевич П.Б., Шарков Е.А.* Физический механизм генезиса вихревых возмущений в сжимаемой и насыщенной водяным паром атмосфере. М.: ИКИ РАН, 2004. Пр-2102. 11 с.
19. *Покровская И.В., Шарков Е.А.* Тропические циклоны и тропические возмущения Мирового океана: хронология и эволюция. Версия 2.1. (1983–2000). М.: Полиграф сервис, 2001, 548 с.
20. *Покровская И.В., Шарков Е.А.* Глобальный тропический циклогенез как случайный пуассоновский процесс // ДАН. 1993. Т. 331. № 5. С. 625–627.
21. *Покровская И.В., Шарков Е.А.* Пуассоновские свойства глобального тропического циклогенеза по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 1994. № 2. С. 24–33.
22. *Шарков Е.А.* Глобальный тропический циклогенез как слабонравновесная геофизическая система // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 6. С. 11–17.
23. *Sharkov E.A.* The Global Tropical Cyclogenesis as Relaxation Oscillator of the Kinetic-Diffusible Type // Annales Geophysicae. 1996. Supplement II to V. 14. Part II. P. C 654.
24. *Sharkov E.A.* Evolution of global tropical cyclogenesis: mankind in danger? // PACON'99 Abstr. Symp., June 23-25, 1999. Humanity and the World Ocean: Interdependence at the Dawn of the New Millennium. Moscow, the Russian Academy of Sciences. 1999. P. 244.
25. *Afonin V.V., Sharkov E.A.* Helioactivity and properties of global tropical cyclogenesis // Proc. of the Conference in Memory of Yuri Galperin „Auroral Phenomena and Solar-terrestrial Relations“, 3–7 Febr. 2003. Moscow. P. 421–429.
26. *Шарков Е.А.* Пассивное микроволновое зондирование Земли: прошлое, настоящее и планы на будущее // Тр. конф. «Соврем. проблемы дистанц. зондирования из космоса». М.: Полиграф-сервис, 2004. С. 70–80.
27. *Анфимов Н.А., Гордеев С.П., Сенкевич В.П., Моисеев С.С., Цибульский Г.А., Шарков Е.А.* Проект «Зодиак»: Контактное зондирование кризисных состояний атмосферы с помощью ракетно-космической техники // Исслед. Земли из космоса. 1995. № 2. С. 12–21.
28. *Anfimov N.A., Gordeev S.P., Tsyboulskii G.A., Moiseev S.S., Sharkov E.A.* Technique of Balloon Investigations of Tropical Disturbances on the Ballistic Missiles Transportation Base // Adv. Space Res. 1996. V.17. N 9. P.95-98.
29. *Балебанов В.М., Моисеев С.С., Шарков Е.А., Лупян Е.А., Калмыков А.И., Забышный А.И., Кузьмин А.К., Смирнов Н.К., Цымбал В.Н., Чиков К.Н.* Проект «Геликс»: космический мониторинг системы океан – тропосфера – верхняя атмосфера в условиях крупномасштабного кризисного состояния // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 5. С. 126–134.
30. *Balebanov V.M., Moiseev S.S., Sharkov E.A., Lupian E.A., Kuzmin A.K., Chikov K.N., Smirnov N.K., Zabyshnyi A.I., Kalmykov A.I., Zymbal V.N.* „Helix“ Project: space monitoring of the ocean-troposphere-upper atmosphere system under the large-scale hazard's situations // Abstr. 31st Sci. Assembly of COSPAR. The University of Birmingham. 1996. England. P. 42.