

## Полярный перенос скрытого тепла мезомасштабными тропосферными системами: анимационный анализ микроволновых спутниковых данных

Е.А. Шарков

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия  
E-mail: e.sharkov@mail.ru*

В работе представлен краткий обзор основных научных результатов в области микроволновых радиотепловых исследований особенностей системы океан – атмосфера Земли, связанных с полярным переносом скрытого тепла мезомасштабными тропосферными структурами из тропических регионов вплоть до полярных. Первичный этап этих исследований был сконцентрирован на исследовании физических подходов в изучении генезиса тропических циклонов как наиболее ярких и опасных мезомасштабных явлений в тропической зоне Земли. Теоретические подходы были предложены в 1983 г. академиком Сагдеевым Р.З. и профессором Моисеевым С.С., а экспериментальные (судовые) и наблюдательные работы были выполнены сотрудниками отдела космогеофизики ИКИ РАН. На основе детального реанализа данных спутникового и контактного зондирования была сформирована научная многолетняя база данных глобального тропического циклогенеза GLOBAL-TC (1983–2014). Далее (с 2002 г.) работа была продолжена в отделе исследования Земли из космоса в существенно расширенном варианте этого направления, а именно – разработка научных основ и методов анализа глобальных спутниковых наблюдений радиофизическими методами для объективной оценки изменения окружающей среды и климата планеты. В первую очередь речь идет о развитии анимационных методов изучения циркуляционных и транспортных свойств глобальных полей водяного пара в атмосфере Земли на основе данных спутникового радиотеплового зондирования.

**Ключевые слова:** исследование Земли из космоса, микроволновое пассивное зондирование, атмосферные катастрофы, полярный перенос, климат, анимация глобальных полей

### Введение

Хорошо известно, что тропическая зона глобальной системы океан – атмосфера играет ключевую роль в динамике и эволюции синоптических и климатических метеорологических процессов на Земле. Однако далеко не в полной мере в этой проблеме изучены внутренние структурные элементы и траекторные особенности транспортного переноса скрытого тепла из экваториальных зон вплоть до полярных зон. Когда речь идет (как и в данном случае) о достаточно краткосрочных временных масштабах (сутки – месяц) этого явления, то очевидно, что главную роль будет играть пространственно-временная эволюция и миграция глобальных полей водяного пара в атмосфере Земли на указанных временных масштабах. При этом система океан – атмосфера тропической зоны Земли обладает совершенно уникальным свойством генерации из атмосферного пространственно-временного хаоса в системе глобальной циркуляции достаточно организованных и устойчивых мезомасштабных вихревых структур – тропических циклонов (ТЦ). Взаимодействие между вихревыми структурами ТЦ и мигрирующими полями водяного пара в экваториальной зоне Мирового океана может образовывать сложные динамические комплексы барических полей и полей интегрального содержания водяного пара, что, в свою очередь, может приводить к сложным (и неожиданным) процессам переноса скрытого тепла в средние и высокие широты. Для целенаправленного дистанционного зондирования таких сложных комплексов в первую очередь необходимо достаточное ясное понимание пространственно-временной картины этих явлений как в инди-

видуальном рассмотрении, так как и множественного процесса. Однако вихревые структуры, при рассмотрении их в качестве временного потока событий, сами по себе представляют пространственно-временной хаотизированный сигнал с достаточно сложной внутренней мультикорреляционной структурой, что впервые было обнаружено в работах сотрудников Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) (Шарков, 1996, 1997, 2006; Sharkov, 1998, 2000). Одновременно были предприняты попытки описания статистических закономерностей тропического циклогенеза с помощью более общих теоретико-вероятностных соображений, однако без анализа источника поступления энергии. Внимание к исследованию таких систем и, особенно, к поиску и выявлению возможных детерминированных компонент как в глобальном, так и региональном масштабах, 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, которые по мере развития человечества существенно усложняются (Elsner, Kara, 1999). В течение длительного времени тропические циклоны рассматривались как наиболее деструктивные элементы системы океан – атмосфера, вызывающие значительные материальные потери и человеческие жертвы. Были предприняты серьезные усилия (в первую очередь в США) с тем, чтобы подавить различными техническими средствами этот вид активности системы океан – атмосфера. Нужно отметить, что все эти усилия закончились совершенно безрезультатно, в чем, собственного говоря, и признались в свое время сами научные руководители этих государственных (США) программ (Gray, 1997; Willoughby et al., 1985). В последующем основное внимание западного научного сообщества было переключено на вопросы изучения палеоактивности циклогенеза (палеоклимата). Предпринимаются активные попытки прогнозирования как индивидуального циклогенеза, так и региональных составляющих глобального циклогенеза (в первую очередь в акватории Северной Атлантики). При этом поток событий представляется в наиболее простой (и, как показано в работах сотрудников ИКИ РАН в дальнейшем – малоинформативной) форме, а именно, в виде совокупности единичных (и при этом дельтаобразных на временной шкале) тропических циклонов за исследуемый промежуток времени (Sharkov, 2000). С другой стороны, внутри научного сообщества формировалась совершенно иная концепция. Базировалась она первоначально на достаточно наивных представлениях о том, что природа не должна специально «вредить» человечеству, а причина достаточно стабильного и длительного в историческом плане функционирования тропического циклогенеза заключается в чем-то другом. И лишь последние исследования с использованием данных космического дистанционного зондирования и теории сложных систем позволили сформировать принципиально иной взгляд на тропический циклогенез. Мы с большой долей вероятности можем говорить об определяющей 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 равновесия как геофизической системы океан – атмосфера, так и экосистем Земли. Катастрофические атмосферные вихри представляют собой своеобразный механизм эффективного сброса избыточного тепла в атмосфере в условиях, когда действие обычных механизмов, основными из которых являются турбулентная конвекция и глобальная циркуляция, становится явно недостаточным. Таким образом, атмосферные катастрофические явления играют важную (и, как это ни 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 (полярный перенос) (Шарков, 2010).

Цель настоящей работы заключается в представлении краткого обзора основных результатов большой серии исследований, выполненных сотрудниками отдела космогеофизики (с 1983 г.), а затем (с 2002 г.) – отдела исследования Земли из космоса, в области микроволновых радиотепловых исследований особенностей системы океан – атмосфера планеты, связанных с полярным переносом скрытого тепла мезомасштабными тропосферными структурами из тропических регионов в средние широты и вплоть до полярных. При этом выявлена высокая степень устойчивости интегрального и дифференциального режимов генерации множественного циклогенеза как в акваториях Мирового океана в целом, так и в акваториях Северного и Южного полушарий, а также зависимости темпов генерации от особенностей глобальной циркуляции и, в первую очередь, от эпизодов Эль-Ниньо – Южное колебание (ENSO).

### **Немного истории**

Формирование в начале 1970-х гг. в ИКИ РАН специализированного отдела по исследованию радиофизических методов и средств для дистанционного мониторинга системы океан – атмосфера под руководством профессора В.С. Эткина (1933–1995) знаменовала собой принципиальный и физически новый этап в активно развивающемся к тому времени оптическим дистанционным зондировании Земли.

Была создана достаточно сильная команда специалистов по разработке микроволновых приборов, теоретиков и экспериментаторов в области радио- и гидрофизики, прикладной математики и статистики, а также был привлечен целый ряд сотрудников, выполняющих прикладные работы – метеорологов, гидрологов, гидрохимиков и др. Именно использование коллектива, созданного из специалистов различных направлений, и дало возможность выполнить целый спектр натуральных самолетных микроволновых исследований морской поверхности, почвенных образований, ледово-снеговых систем, сложных метеорологических структур. Развитие этих комплексных методов показало, что принципиальная значимость введения радиофизических методов в дистанционное зондирование лежит совсем не в плоскости слабой зависимости от гидрометеоров и независимости от дневного солнечного излучения, а именно, в дифракционной природе взаимодействия электромагнитных волн микроволнового диапазона с шероховатыми элементами земной поверхности и с метео-

структурами в земной атмосфере, а также, с другой стороны – с особенностями квантового излучения физических объектов газовой фазы в микроволновом диапазоне. В первую очередь это касается глобальных полей водяного пара и их пространственно-временной эволюции (Шарков, 2010; Sharkov, 2003).

Как показали работы коллектива отдела, изучение и понимание микроволновых образов системы земная поверхность – атмосфера обеспечили принципиально иную (чем при использовании только оптического и инфракрасного диапазонов) физическую информативность микроволнового зондирования при изучении земных объектов. Именно это обстоятельство кардинально изменило с течением времени как облик потенциальных спутниковых систем, предназначенных для зондирования Земли, так и характер и информативную насыщенность всего дистанционного зондирования.

Однако все научные изыскания проводились на базе и при помощи выполнения большого количества прикладных летно-морских экспедиционных работ, что в определенной степени сдерживало развитие чисто научных исследований. В конечном итоге это привело к значительным административно-хозяйственным перестройкам отдела различной масштабности. Так, в 1983 г. решением дирекции ИКИ РАН был создан отдел космогеофизики, под руководством профессора Моисеева С.С., куда вошли сотрудники теоретического сектора, часть экспериментаторов в области радиофизики и гидрофизики, метеорологии и прикладной оптики отдела № 63.

Первичный этап исследований в новом отделе первоначально был сконцентрирован на исследовании физических подходов, а также возможностей использования радиофизических методов и средств в изучении генезиса тропических циклонов как наиболее ярких и опасных тропосферных мезомасштабных явления в тропической зоне Земли. Теоретические подходы на базе исследований спиральной турбулентности были предложены в том же 1983 г. академиком Сагдеевым Р.З. и профессором Моисеевым С.С., а экспериментальные (судовые) и наблюдательные работы в тропической зоне Тихого океана были выполнены сотрудниками отдела космогеофизики ИКИ РАН на базе научно-исследовательского флота Гидрометеослужбы СССР в последующие годы (1988–1990). Кроме того, в это же время на основе детального реанализа данных спутникового и контактного зондирования, полученных сначала в архивах почтовых данных Гидрометеоцентра СССР, а затем, начиная с 1995 г., по международной системе Internet, были сформированы первые версии принципиально новой научной многолетней базы данных (БД) глобального тропического циклогенеза GLOBAL-TS (1983–2002) (Покровская, Шарков, 1999; 2001).

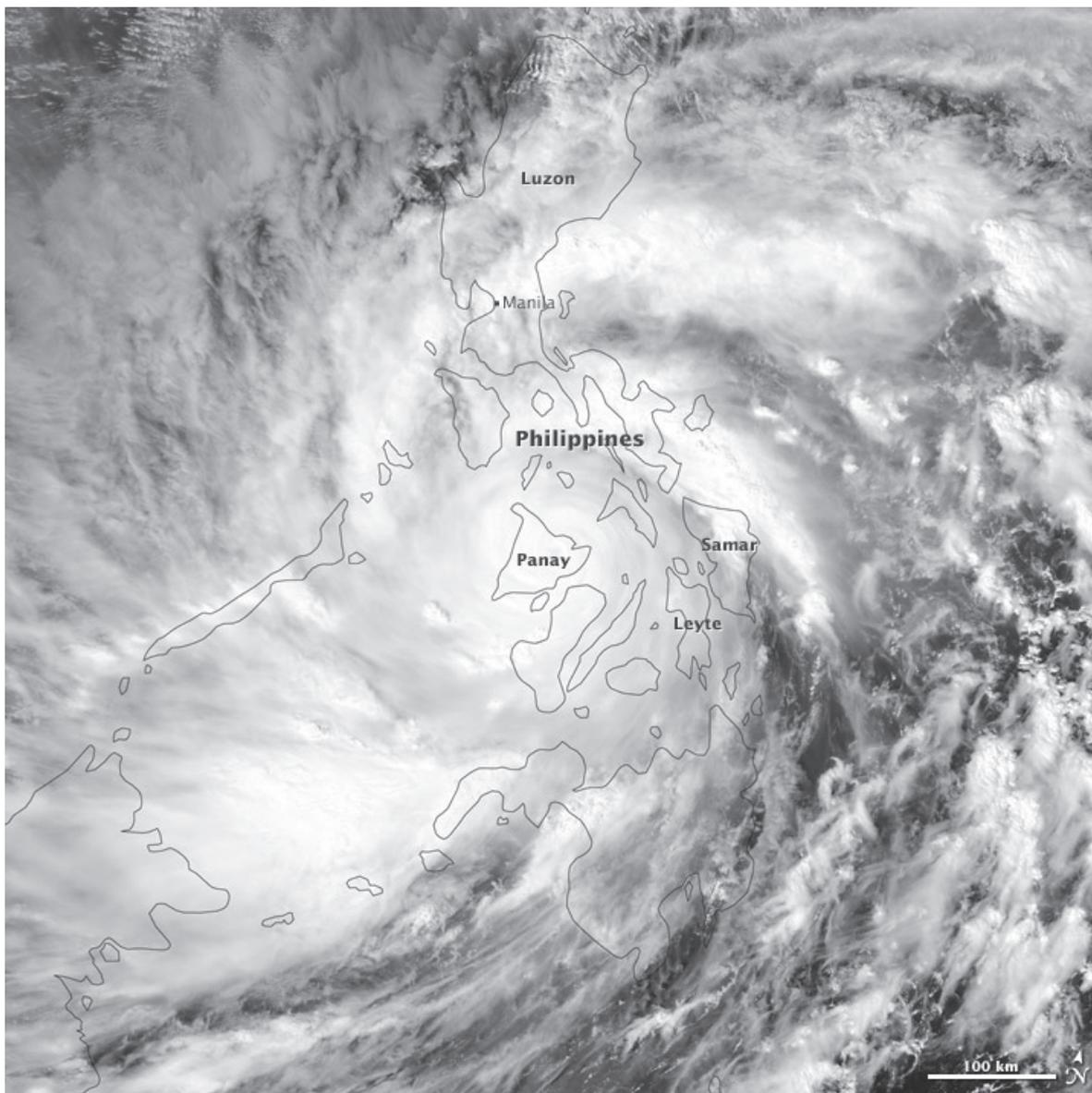
Ввиду масштабных преобразований научно-исследовательской структуры Института, предпринятых дирекцией в 2002 г., указанные работы были продолжены в отделе исследования Земли из космоса (отдел № 55 был создан в результате реорганизации отдела № 63) в первую очередь во вновь созданной лаборатории климатических исследований и в существенно расширенном варианте этого направления, а именно как разработка научных основ и методов анализа глобальных спутниковых наблюдений радиофизическими методами для объективной оценки изменений окружающей среды и климата планеты. Речь идет о разви-

тии анимационных методов изучения циркуляционных и транспортных свойств глобальных полей водяного пара в атмосфере Земли при взаимодействии с мезомасштабными системами тропосферы на основе данных спутникового радиотеплового зондирования, поскольку именно такой тип обработки микроволновых данных может обеспечить необходимое пространственное и временное разрешение для объективной оценки изменений окружающей среды и климата планеты.

### **Научная база данных глобального тропического циклогенеза**

Научная база данных глобального тропического циклогенеза Global-TC за 1983–2015 гг. формировалась в течение указанного времени на основе специального препроцессинга (предварительной обработки) исходных «сырых» данных, предложенного в 1993 г. и последовательно развитого и модифицируемого в течение целого ряда лет сотрудниками ИКИ РАН Покровской И.В. и Шарковым Е.А. для изучения как особенностей индивидуального циклогенеза, так и влияния множественного циклогенеза на изменчивость климатических параметров планеты в экваториальной и полярных зонах. Создание уникальной и обширной базы данных стало возможным только благодаря титанической ежедневной работе одного из самых высококвалифицированных специалистов в этой области — Покровской Ирины Вячеславовны. По мере развития и совершенствования методик обработки основная структура базы данных претерпевала определенные видоизменения, которые представлены в электронных формах на сайте ИКИ РАН, а также в отдельных печатных изданиях (Покровская, Шарков, 1999; 2001; 2006; 2011).

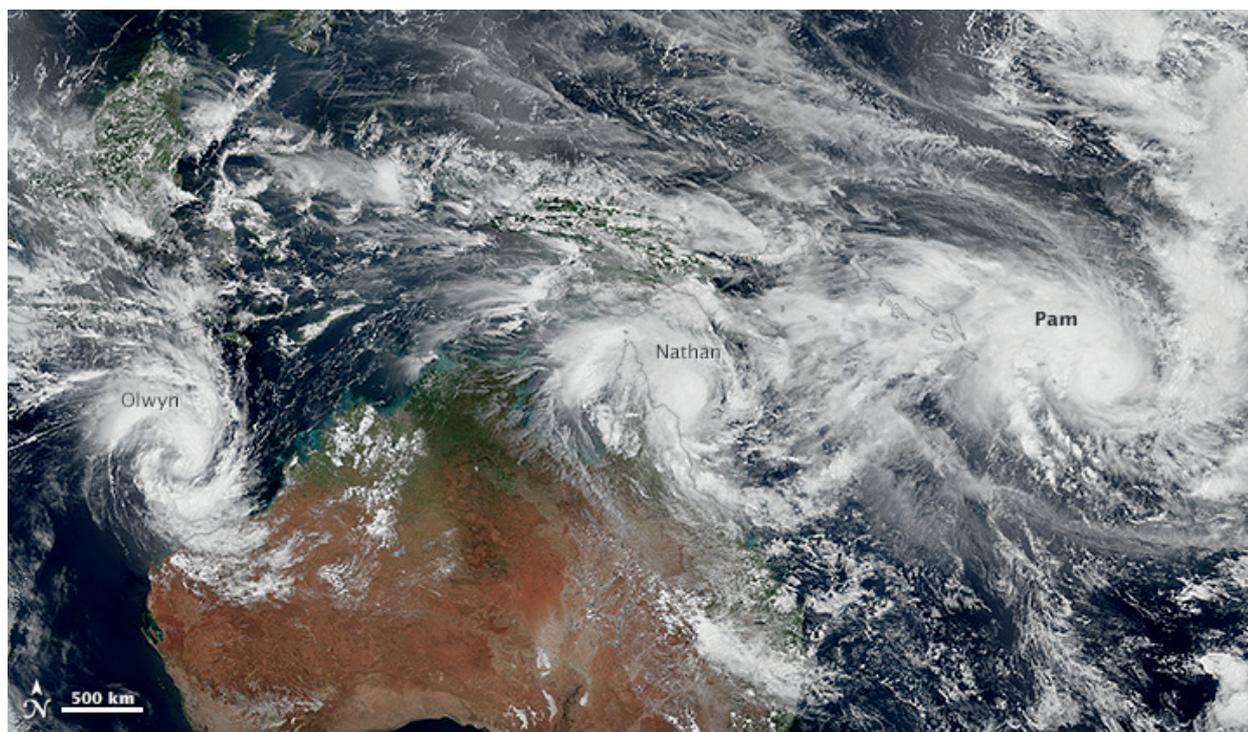
Так, блок базы данных за 2005–2015 гг. был сформирован на основе ежесуточной информации, полученной из Интернета с сайта Астрономической обсерватории Гавайского университета (<http://www.solar.ifa.hawaii.edu/>), где поступающая первичная информация из JTWC (Флорида) и региональных метеоцентров (Токио, Майами, Нью-Дели, Дарвин, о-в Фиджи, о-в Реюньон и др.) суммировалась и поступала в Интернет в виде ежедневных пакетов «сырых» данных. Поступающие данные формируются в архив первичных данных с последующим детальным препроцессингом, начиная с первичных форм тропических возмущений и кончая формами конечной диссипацией. Этот блок информации обладает существенно большей полнотой описания событий, происходящих в тропической зоне Мирового океана, чем информация за 1983–2000 гг. Особое внимание уделено изучению временной и траекторной структуры ТЦ Haiyan, функционировавшему в акватории северо-западной части Тихого океана в ноябре 2013 г. и являющимся наиболее интенсивным ТЦ за всю историю спутниковых наблюдений тропических возмущений в циклоногенерирующих акваториях Мирового океана. ТЦ Haiyan вызвал катастрофические последствия в административно-хозяйственной структуре на островных территориях Филиппин и сопровождался многочисленными человеческими жертвами. На *рис. 1* представлено видеоизображение ТЦ Haiyan, полученное 8 ноября 2013 г. спетрорадиометром MODIS в момент его максимального развития над островными территориями Филиппин.



*Рис. 1. Видеоизображение ТЦ Haiyan в момент наибольшего развития 8 ноября 2013 г. над Филиппинскими островами*

В качестве другого примера на *рис. 2* представлена мозаика из комбинации инфракрасного (ИК) и видимого изображений прибора VIIRS, размещенного на спутнике Suomi NPP. Мозаика получена в момент динамического удара трех тропических циклонов одновременно по территории Австралии, причем один из них – ТЦ Pam – является одним из сильнейших ТЦ на планете за последние 10 лет. Скорость ветра в стене глаза ТЦ достигала 265 км/ч.

Указанная база данных в различных модификациях была использована для исследовательских задач по целому ряду направлений, в том числе изучены стохастические режимы генерации и эволюции глобального тропического циклогенеза и выявлены особенности региональных тропических циклогенезов в поле поверхностной температуры Мирового океана; проведена оценка скрытой теплоты экваториальной зоны водяного пара во внутритропической зоне конвергенции атмосферы над Мировым океаном и его региональных составляющих.



*Рис. 2. Комбинационное (мозаика) оптическое и ИК-изображения Австралии и прилегающих акваторий Индийского и Тихого океанов в момент одновременного функционирования трёх тропических циклонов Olwyn, Nathan и Pam (11 марта 2015 г.)*

### **Современные подходы при изучении глобального циклогенеза**

В настоящее время исследование генезиса и временной эволюции устойчивых вихревых систем как потока событий на фоне глобальной циркуляции и турбулентного хаоса тропической атмосферы развивается в двух принципиальных направлениях (Sharkov, 2000; 2012):

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

Тропический циклогенез, рассматриваемый в глобальном аспекте, остается пока достаточно слабо изученным физическим процессом. Тем не менее, на основе предложенной концепции множественного циклогенеза сотрудниками ИКИ РАН получены серьезные и нетривиальные результаты (Шарков, 1997; 2006; 2010; Sharkov, 2000; 2012). Очевидно, что структурным фундаментом исследований множественного циклогенеза должна служить методика построения временного ряда глобального тропического циклогенеза – физического

процесса, рассматриваемого одновременно на всей акватории Мирового океана (или по акваториям полушарий). В работах (Покровская, Шарков, 1993; Sharkov, 2000) было впервые показано, что вероятностная структура флуктуаций амплитуды исследуемого потока близка к структуре потока пуассоновского типа при наличии определенных отклонений от пуассоновского распределения. Последнее обстоятельство, как известно (Шарков, 1996), играет принципиальную роль при анализе составляющих исследуемого стохастического процесса, выявляя соотношение (и конкуренцию) между кинетической и диффузионной компонентами процесса. Представленные в работе результаты дают возможность принципиально по-новому подойти к решению проблемы определения временного темпа генерации и эволюции ТЦ в климатических масштабах. На базе предложенного подхода, связанного с формированием временного потока событий тропических циклонов как импульса единичной амплитуды со случайной длительностью и со случайными моментами появления и рассмотренного за 25-летний период (1983–2007), был выявлен (Шарков, 2009) устойчивый интегральный режим генерации множественного циклогенеза как в циклогенерирующих акваториях Мирового океана, так и в акваториях Северного и Южного полушарий. Интенсивности процессов циклогенеза, рассматриваемые как в глобальном масштабе, так и в масштабе полушарий, являются универсальными постоянными генерации, которые не зависят от телекоммуникационных связей в климатической системе Земли. Явная зависимость от эпизодов ENSO выявлена только для региональных циклогенезов (Северная Атлантика), причем в своеобразном режиме годового накопления (Sharkov, 2000). Но при этом важно отметить, что эта телекоммуникационная связь полностью отсутствует как для глобального, так и полушарного тропического циклогенеза. Интересно отметить, что многомасштабный вейвлет-анализ показывает на присутствие трехкомпонентной геофизической структуры глобального циклогенеза (Шарков, 2013).

С самого начала активного использования спутниковых методов в метеорологии были потрачены значительные усилия исследователей по наблюдению и регистрации отдельных (и фрагментарных) оптических и ИК-изображений тропических вихревых возмущений в различных фазах, и на их базе сформирован целый спектр оптических и ИК-сигнатур облачных систем, образующих крупномасштабную структуру атмосферной катастрофы – тропического циклона. Эти оптические сигнатуры облачных систем легли в основу распознавания признаков зрелости ТЦ и его динамических характеристик и используются в оперативном анализе по настоящее время. Однако с точки зрения общей энергетики атмосферной катастрофы, эти признаки являются, по существу, вторичными и не могут претендовать на ранг первичных признаков «близости» геофизической среды к генезису индивидуального тропического возмущения или к кризисному моменту перехода «слабой», размытой формы в резко интенсивную и развитую форму (так называемый процесс интенсификации ТЦ). В полной мере таких признаков пока не существует, поскольку не ясен источник «быстрой» и мощной энергии, которая позволит интенсифицировать (или диссипировать за счет отбора энергии) ТЦ за сравнительно короткий промежуток времени (5...8 ч). Принципиально новым шагом в изучении дистанционных критериев генезиса ТЦ следует считать результаты

комплексных многочастотных оптико-ИК-микроволновых спутниковых исследований эволюции оптического образа ТЦ в поле экваториального интегрального водяного пара, при анализе которых обнаружен фундаментальный вклад малоинерционного источника энергии – поля водяного пара повышенной концентрации, за счет энергии которого и происходит генезис первичных форм ТЦ, а затем формирование зрелых форм ТЦ, и горизонтального переноса водяного пара глобальной циркуляцией и джетовыми потоками для поддержания функционирования зрелых форм ТЦ (Шарков, 2010; Шарков и др., 2008; 2011).

С помощью принципиально усовершенствованной комплексной базы данных EVA-01, которая включала в себя как пространственно-временная эволюцию тропического циклогенеза (т.е. элементы из БД Global-TC) и восстановленного поля водяного пара (из БД Global-Fields) с элементами объектно-реляционного типа, выполнен детальный анализ поля интегральной концентрации водяного пара на всех этапах временной эволюции ТЦ Francisco (2001) в акватории Северо-западной части Тихого океана (Шарков и др., 2011). В работе экспериментально обнаружено, что на фоне среднего значения интенсивности поля водяного пара, превышающего критическое значения интегрального водяного пара (своего рода, это необходимое условие генезиса любого ТЦ, при котором формируется зрелая форма тропического циклона (Шарков и др., 2012)), формируются своего рода «купола» в поле водяного пара. Выявленные связи областей водяного пара повышенной концентрации (куполов) и генезиса тропических циклонов стали очевидной только при применении объектно-реляционных компьютерных технологий и библиотек программы MatLab. При использовании технологии сетчатых 3D-поверхностей были получены отдельные детализированные фрагменты поля водяного пара на каждый временной эволюционный этап преобразования ТЦ, начиная с его генезиса до полного распада и поглощения крупномасштабной фронтальной зоной в Тихом океане. Фиксация по дистанционным микроволновым данным этой особенности поля водяного пара соответствует временным срокам более ранним, чем появление зрелой эволюционной формы ТЦ по данным гидрометеорологических наблюдений и наблюдения состояния облачных масс. Отметим, что и плоскостная технология, и технология сетчатых 3D-поверхностей приводит к одним и тем же физическим результатам:

- необходимое условие генезиса тропического циклона (ТЦ) — наличие поля интегрального водяного пара выше  $60 \text{ кг/м}^2$ . Иными словами, для того, чтобы циклон зародился, в атмосфере должно быть достаточного количество водяного пара;
- необходимое условие существования и интенсификации (усиления) ТЦ — наличие джетового моста с экваториальным материнским полем интегрального водяного пара;
- разрыв джетового моста приводит к немедленной (порядка суток) диссипации ТЦ.

В качестве примера на *рис. 3* представлена временная эволюция ТЦ Hondo (04–27 февраля 2008 г.) в акватории Южного Индийского океана в синхронных полях ИК-температуры и полей интегрального водяного пара. Загадочной особенностью эволюции этого ТЦ была его неожиданная диссипация (14.02.2008) и еще более неожиданное восстановление (20.03.2008) функционирования ТЦ. Причина всех этих эволюционных загадок оказалось в своеобразных пространственных особенностях поля водяного пара (Шарков и др., 2011).

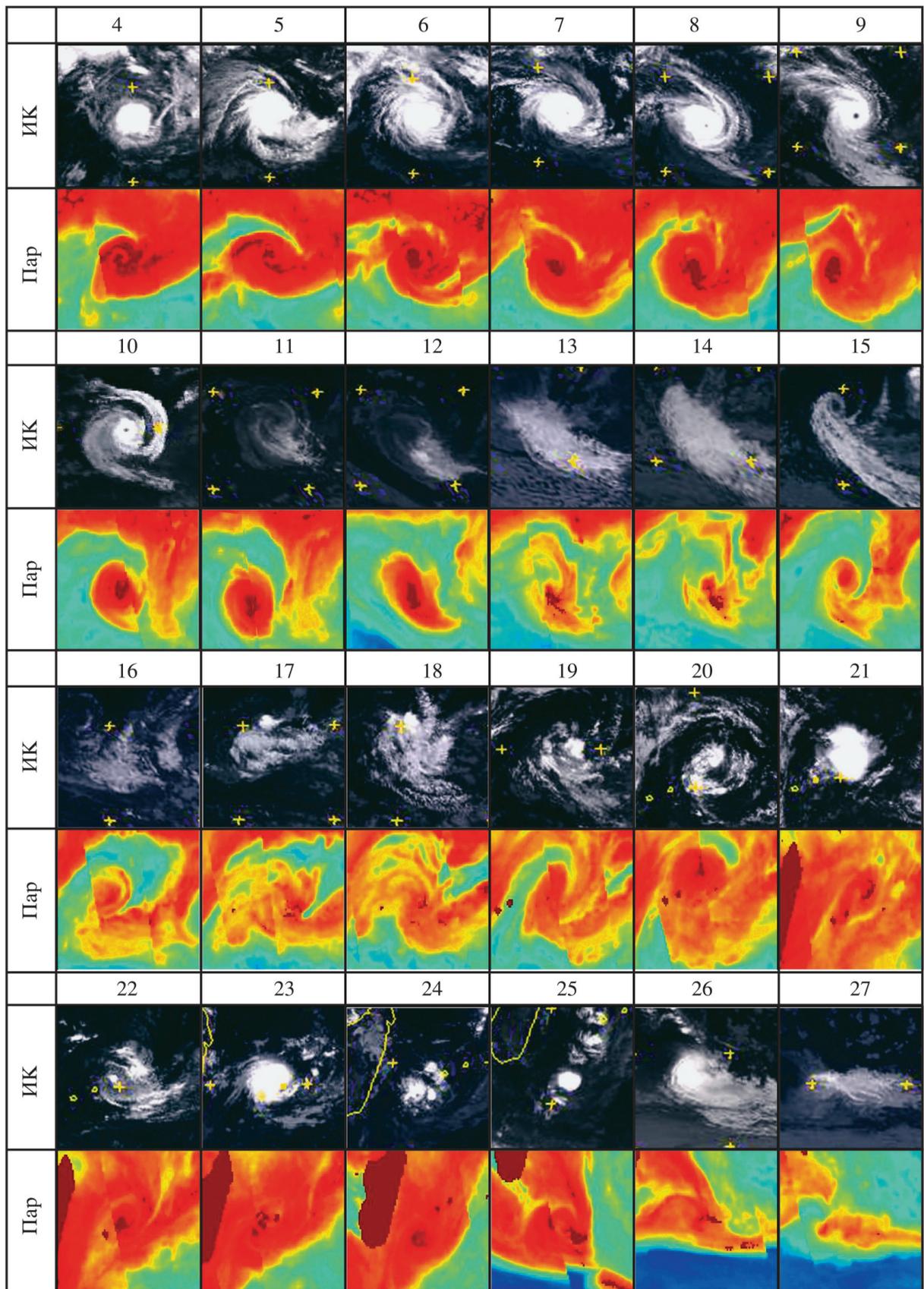


Рис. 3. Временной ряд композиций (кадров) парных изображений ИК-канала ИЗС Meteosat-7 и поля интегрального водяного пара, приведенных к одинаковому масштабу и отображающих различные стадии эволюции и трансформации ТЦ Honpo и сопутствующих метеорологических систем за период 04–27 февраля 2008 г. Сроки наблюдения (февраль 2008 г.) отображены цифрами над изображениями

## **Анимационные методы изучения циркуляционных и транспортных свойств глобальных полей водяного пара в атмосфере Земли**

Данные наблюдения за изменением геофизических параметров длительное время усваивались в виде локальных (точечных) измерений. И гораздо реже – в форме полей пространственных и временных изменений геофизических параметров. В то же время природные процессы, которые могут оказать существенное воздействие на транспортные и диссипативные свойства атмосферы (поля интегрального водяного пара, барические поля ТЦ и фронтальных зон) и влиять на формирование климата планеты, имеют довольно большую пространственную протяженность, достаточно длительны и характеризуются сложной пространственно-временной структурой. Для выявления общих закономерностей наиболее влиятельных термодинамических процессов в системе океан – атмосфера и понимания физических механизмов, ими управляющих, необходим анализ данных наблюдений, представительно характеризующих их энергетику и динамику. Для адекватного изучения пространственной структуры и временной изменчивости интересующих процессов данные наблюдений должны быть представлены в виде полей с достаточным пространственным разрешением, протяженностью и временной регулярностью. И, кроме того, как показали исследования таких полей, принципиальное значение для изучения динамических процессов различных масштабов имеет анимационное (в режиме мультипликации) представление пространственно-временной эволюции глобальных геофизических полей с высокой временной дискретизацией. Отметим, что анимационное представление динамических процессов обладает серьезными достоинствами при анализе динамических процессов и, в первую очередь, управляемостью процессом анализа исследуемого явления. Анимация позволяет наблюдать процессы, происходящие в системе океан – атмосфера, в динамике в течение длительных отрезков времени. При таком подходе легко наблюдать подробную структуру атмосферных процессов одновременно в широком диапазоне масштабов – от сотен километров (структура тропического циклона) до планетарных масштабов квазистационарных атмосферных структур (основные зоны депрессий, северный и южный тропики, основные энергоактивные зоны, циклогенерирующие акватории Мирового океана). Анимация позволяет также анализировать процессы с любым необходимым темпом по времени, а также повторять выделенные пространственные фрагменты необходимое количество раз.

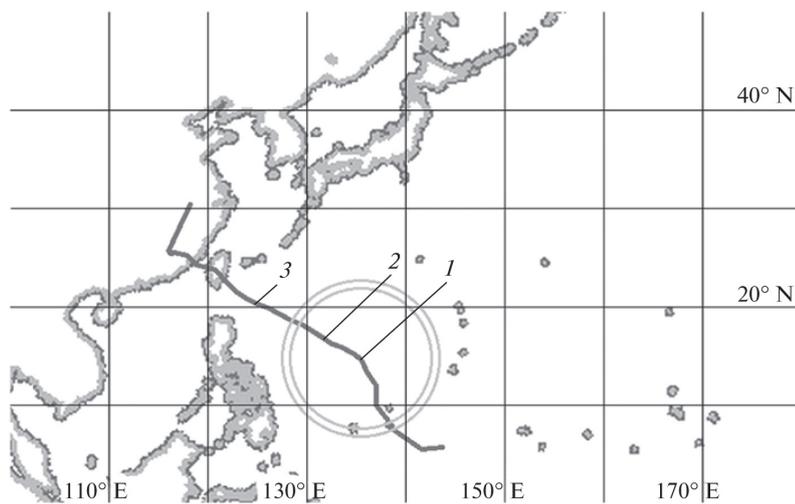
Понимание важности анимационной процедуры для анализа динамических полей пришло к исследователям достаточно давно, и, начиная с 2002 г., в отделе исследования Земли из космоса были развернуты по инициативе автора настоящей работы научно-исследовательские работы по формированию глобальной базы радиотепловых данных с радиометрических комплексов SSM/I на борту космических аппаратов серии DMSP, запуски которых проводились с завидной регулярностью в рамках спутниковой метеорологической программы Defense Meteorological Satellite Program министерства обороны США. Долговременный (1992–2014 гг. и продолжающийся) мониторинг Земли в рамках программы DMSP имеет своей целью обеспечение глобальной метеорологической, океанографической

и солнечно-геофизической оперативной информацией. Накопленные данные в непрерывно пополняемой электронной базе GLOBAL-Fields ИКИ РАН (Ермаков и др., 2007) содержат на настоящий момент информацию за период с 1995 по 2014 г.

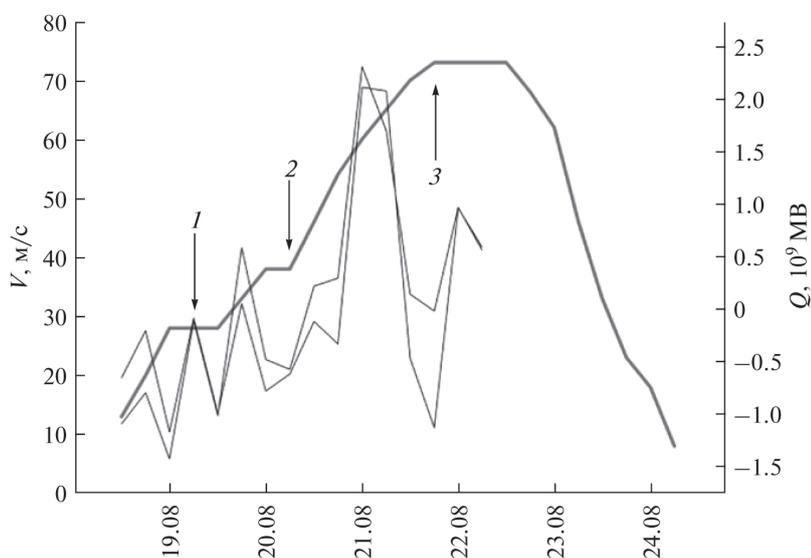
Первые экспериментальные попытки с помощью этой базы данных (пока без синхронной анимации) определения роли тропических циклонов в полярном переносе скрытой теплоты на планете оказались положительными. Так, детальный временной анализ глобальных радиотепловых полей показал, что поля водяного пара после сложной траекторной трансформации эволюционируют в высокие (полярные) широты не меридиональной циркуляцией, а горизонтальными вихревыми системами (в том числе, тропическими циклонами), включенными в глобальные фронтальные зоны. Последующее восстановление полей геофизических параметров (интегральный водяной пар) позволили обнаружить источники энергии неожиданной (для специалистов) интенсификации ТЦ Katrina (2015) в Мексиканском заливе (Ермаков и др., 2012а, б) и источники трех последовательных интенсификаций ТЦ Alberto (2000). И, что самое поразительное – все три источника были абсолютно разной физической природы: одним было материнское поле водяного пара (стандартная ситуация), вторым – поле водяного пара от диссипации предыдущего ТЦ, третьим – поле водяного пара над течением Гольфстрима (Ермаков и Шарков, 2013; Ермаков и др., 2013в; Ermakov, Sharkov, 2013).

Предложена и создана методика и соответствующее программное обеспечение для выполнения спутникового радиотепловидения при наблюдении (в режиме анимации) мезомасштабных и синоптических процессов. Методика состоит в пространственно-временной интерполяции и анализе измеренных с полярно-орбитальных спутников радиотепловых полей Земли и восстановленных по ним полей геофизических характеристик. Предложенная методика позволяет получать динамическое описание эволюции рассматриваемых полей с временным шагом (пикселом) до рекордных значений – 1,5 ч на глобальной регулярной географической сетке с шагом до  $0,125^\circ$ , что предоставляет уникальную возможность прямого расчёта физических величин, характеризующих энергетические аспекты массо- и энергопереноса в атмосферных системах, развивающихся на субсуточных и более длительных интервалах времени, вплоть до процессов синоптического масштаба и, в первую очередь, полей водяного пара в атмосфере Земли. Работа выполняется в сотрудничестве с ФИРЭ РАН (Ермаков и др., 2013а,б; Ermakov et al, 2013). Пример расчёта потоков скрытого тепла  $Q$  через систему концентрических круговых контуров, дрейфующих вместе с тропическим циклоном (ТЦ) Bilis (август 2000 г.) в процессе его эволюции, показан на *рис. 4*.

Фазы интенсификации и диссипации хорошо соотносятся с изменением знаков и величин потоков  $Q$ : интенсификация соответствует коньюргентному (положительному) потоку, а диссипация – дивергентному (отрицательному) потоку (Ермаков и др., 2014а-г). Таким образом, поля водяного пара являются источниками скрытой теплоты, которая, в свою очередь, трансформируется в кинетическую и турбулентную энергетику ТЦ. Другим важным результатом является экспериментальное доказательство того факта, что энергетические обмены в мезомасштабах происходят с фантастическими скоростями, совершенно не подвластными для измерения методами *in-situ* (типа самолетных измерений внутри тела ТЦ).



*a*



*б*

*Рис. 4. Пример расчета потоков  $Q$  через систему концентрических круговых контуров, дрейфующих вместе с тропическим циклоном (ТЦ) Bilis (август 2000 г.) в процессе его эволюции: *a* – траектория (темно-серая линия), пример контуров интегрирования (светло-серые окружности); *б* – эволюция-интенсивность ТЦ  $V$  (темно-серая толстая линия, левая шкала) и потоки скрытого тепла  $Q$  (черные тонкие линии, правая шкала).*

*Цифрами отмечены положение и состояние ТЦ в одинаковые моменты времени*

Следующим шагом в развитии указанной технологии обработки может быть предложение мультисенсорного алгоритма спутникового радиотепловидения, позволяющего обеспечить объединение данных спутникового радиотеплового мониторинга Земли из разных источников в рамках единой схемы пространственно-временной интерполяции, учитывающей различия во времени и пространственном разрешении съемки разными приборами. Новый алгоритм уже опробован на серии данных приборов SSMIS на спутниках F16 и F17 DMSP и AMSR-2 на спутнике GCOM-W1 в ноябре 2013 г., а также на серии данных тех же приборов в августе 2012 г., дополненной данными WindSat. Результат получен поразительный: вдвое улучшены параметры пространственно-временной интерполяции полей интегрального паросодержания атмосферы (шаг по времени 1,5 ч на сетке с шагом  $0,125^\circ$ )

по сравнению с применявшейся ранее схемой, использующей только данные SSM/I. Достигнутая пространственная детализация превосходит известные на сегодня мировые аналоги при сохранении высокой точности интерполяции (Ермаков и др., 2015). Такой подход весьма актуален при исследовании быстрых атмосферных процессов на планетарных масштабах с высоким временным разрешением и, несомненно, обеспечит серьезный прогресс на современном этапе радиотепловидения.

## Заключение

История исследований, связанных с полярным переносом скрытого тепла мезомасштабными тропосферными структурами из тропических регионов вплоть до полярных в атмосфере Земли на этом не заканчивается, и, более того, потребуются несомненно еще более значимые усилия исследователей в изучении проблемы стабильности и эволюции парникового эффекта в атмосфере Земли. Нет сомнений, что необходимость в дальнейшем развитии радиофизических спутниковых средств будет возрастать. Особенно показательными и неожиданными в этом плане являются нетривиальные научные результаты, полученные сотрудниками отделов космофизики и исследования Земли из космоса за последние 20 лет в области исследования атмосферных катастроф и их влияния на тепло и массоперенос в атмосфере Земли.

## Литература

1. Ермаков Д.М., Шарков Е.А. Взаимодействие мигрирующих полей водяного пара с дочерними полями как необходимый элемент при интенсификации тропических циклонов // Международная конференция «Турбулентность, динамика атмосферы и климата». 13–16 мая 2013, ИФА РАН: Сборник тезисов докладов. М.: ГЕОС, 2013. С. 109–112.
2. Ермаков Д.М., Раев М.Д., Сулов А.И., Шарков Е.А. Электронная база многолетних данных глобального радиотеплового поля Земли в контексте многомасштабного исследования системы океан-атмосфера // Исследования Земли из космоса. 2007. № 1. С. 7–13.
3. Ермаков Д.М., Чернушич А.П., Шарков Е.А., Покровская И.В. Поиск источника энергии при интенсификации ТЦ Katrina по данным микроволнового спутникового зондирования // Исследование Земли из космоса. 2012а. № 4. С. 47–56.
4. Ермаков Д.М., Чернушич А.П., Шарков Е.А. Детализация фаз развития ТЦ Katrina по интерполированным глобальным полям водяного пара // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012б. Т. 9. № 2. С. 207–213.
5. Ермаков Д.М., Раев М.Д., Чернушич А.П., Шарков Е.А. Алгоритм построения глобальных радиотепловых полей системы океан-атмосфера высокой пространственно-временной дискретизации по спутниковым микроволновым измерениям // Исследование Земли из космоса. 2013а. № 4. С. 72–82.
6. Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушич А.П. Анимационный анализ прецедентов быстрой интенсификации тропических циклонов // Тезисы докладов Международной конференции «Дистанционное зондирование окружающей среды: научные и прикладные исследования в Азиатско-Тихоокеанском регионе (RSAP2013)», 24–27 сентября 2013, Владивосток, Россия. 2013б. С. 63–64.
7. Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Покровская И.В., Чернушич А.П. Обнаружение энергетических источников в перемежаемых режимах интенсивности ТЦ Alberto при его эволюции по данным спутникового микроволнового зондирования // Исследование Земли из космоса. 2013в. № 4. С. 39–49.
8. Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушич А.П. Возможности количественного описания мезомасштабных процессов в атмосфере на основе анимационного анализа // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014а. Т. 11. № 4. С. 153–162.
9. Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушич А.П. Оценка тропосферных адвективных потоков скрытого тепла над океаном при анимационном анализе радиотепловых данных спутникового мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2014б. № 4. С. 32–38.

10. *Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушич А.П.* Роль тропосферных адвективных потоков скрытого тепла в интенсификации тропических циклонов // Исследование Земли из космоса. 2014в. № 4. С. 3–15.
11. *Ермаков Д.М., Чернушич А.П., Шарков Е.А.* Оценки и достижимые точности описания динамики и энергетики мезомасштабных и синоптических атмосферных процессов с помощью спутникового радиотепловидения // 8-я Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь»: Доклады. Москва, ИРЭ РАН, 24–28 ноября 2014г. С. 174–179.
12. *Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушич А.П.* Оценка точности интерполяционной схемы спутникового радиотепловидения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. (в печати)
13. *Покровская И.В., Шарков Е.А.* Глобальный тропический циклогенез как случайный пуассоновский процесс // Доклады АН СССР. 1993. Т. 331. № 5. С. 625–627.
14. *Покровская И.В., Шарков Е.А.* Каталог тропических циклонов и тропических возмущений Мирового океана за 1983–1998 гг. Версия 1.1. М.: Полиграф сервис, 1999. 160 с.
15. *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.
16. *Покровская И.В., Шарков Е.А.* Тропические циклоны и тропические возмущения Мирового океана: хронология и эволюция. Версия 3.1 (1983–2005). М.: Полиграф сервис, 2006. 728 с.
17. *Покровская И.В., Шарков Е.А.* Тропические циклоны и тропические возмущения Мирового океана: хронология и эволюция (2006–2010). Версия 4.1. М.: КДУ, 2011. 212 с.
18. *Шарков Е.А.* Глобальный тропический циклогенез как слабо неравновесная геофизическая система // Исследование Земли из космоса. 1996. № 6. С. 11–17.
19. *Шарков Е.А.* Аэрокосмические исследования тропических циклонов // Исследование Земли из космоса. 1997. № 6. С. 87–111.
20. *Шарков Е.А.* Глобальный тропический циклогенез: эволюция научных взглядов и роль дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2006. № 1. С. 68–76.
21. *Шарков Е.А.* Универсальная постоянная генерации стохастического режима глобального тропического циклогенеза в контексте климатических вариаций // Исследование Земли из космоса. 2009. № 6. С. 31–38.
22. *Шарков Е.А.* Дистанционные исследования атмосферных катастроф // Исследование Земли из космоса. 2010. № 1. С. 52–68.
23. *Шарков Е.А.* Глобальный тропический циклогенез как трехкомпонентная стохастическая структура в климатической системе Земли // Международная конференция «Турбулентность, динамика атмосферы и климата». 13–15 мая 2013, ИФА РАН: Сборник тезисов докладов. М.: ГЕОС, 2013. С. 97–99.
24. *Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В.* Эволюция тропического циклона Gopi и его связь с полем интегрального водяного пара в экваториальной области // Исследование Земли из космоса. 2008. № 6. С. 25–30.
25. *Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В.* Энергетические особенности множественного тропического циклогенеза по мультиспектральным спутниковым наблюдениям // Исследование Земли из космоса. 2011. № 2. С. 18–25.
26. *Шарков Е.А., Шрамков Я.Н., Покровская И.В.* Повышенное содержание водяного пара в атмосфере тропических широт как необходимое условие генезиса тропических циклонов // Исследование Земли из космоса. 2012. № 2. С. 73–82.
27. *Шарков Е.А., Шрамков Я.Н., Покровская И.В.* Обнаружение высокоэнергетичных куполов в экваториальном поле интегрального водяного пара при генезисе тропического циклона Francisco (2001) // Исследование Земли из космоса. 2013. № 5. С. 3–11.
28. *Elsner J.B., Kara A.B.* Hurricanes of the North Atlantic. Climate and Society // Oxford University Press. N.Y.: Oxford, 1999. 488 p.
29. *Ermakov D.M., Sharkov E.A.* Evolution of hurricane Alberto (2000) in the field of water vapor over North Atlantic retrieved from satellite data // ESA Living Planet Symposium. 9–13 September, 2013. Edinburgh, UK: Abstracts. 4-P-81. URL: <http://www.livingplanet2013.org/abstracts/848296.htm>.
30. *Ermakov D.M., Chernushich A.P., Sharkov E.A.* A closed algorithm to create detailed animated water vapor fields over the oceans from polar-orbiting satellites' data // ESA Living Planet Symposium. 9–13 September, 2013. Edinburgh, UK: Abstracts. 2013. 4-P-321. URL: <http://www.livingplanet2013.org/abstracts/847176.htm>.
31. *Gray W.M.* A personal (and perhaps unpopular) view of tropical meteorology over the last 40 years and future outlook // 22<sup>nd</sup> Conference Hurricane and Tropical Meteorology. 19–23 May, 1997, Ft Collins, Colorado. American Meteorological Society. Boston. 1997. P. 19–24.
32. *Sharkov E.A.* Remote Sensing of Tropical Regions. Chichester, John Wiley and Sons/PRAXIS, 1998. 310 p.
33. *Sharkov E.A.* Global Tropical Cyclogenesis. N.Y. etc.: Springer/PRAXIS, 2000. 361 p.
34. *Sharkov E.A.* Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Springer/PRAXIS. 2003. Berlin, Heidelberg, New York. 612 p.
35. *Sharkov E.A.* Global Tropical Cyclogenesis. 2<sup>nd</sup> Edition. N.Y. etc.: Springer/PRAXIS, 2012. 650 p.
36. *Willoughby H.E., Jorgensen D.P., Black R.A., Rosenthal S.L.* Project STORMFURY: A Scientific Chronicle 1962–1983 // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1985. V. 66. No. 5. P. 505–514.

# Latent heat polar transfer by mesoscale tropospheric systems: animation analysis of microwave satellite data

E.A. Sharkov

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*  
*E-mail: e.sharkov@mail.ru*

In this paper, a brief review of main scientific results in the field of microwave radiothermal investigation of special features in the planet ocean-atmosphere system associated with polar transfer of latent heat by mesoscale tropospheric systems from tropical regions to polar regions is presented. The first stage of this research was concentrated on physical approaches to the investigation of genesis of tropical cyclones as most dramatic and hazardous mesoscale events in tropical regions of the Earth. Theoretical approaches were proposed in 1983 by academician R.Z. Sagdeev and professor S.S. Moiseev, while and experimental (marine) and observational works were performed by scientists of the Department of Space Geophysics IKI RAS. Based on detailed reanalysis of satellite and contact data, GLOBAL-TC scientific database of multiyear (1983-2014) data on global tropical cyclogenesis was built. Beginning in 2002, these investigations were continued in the Department of Earth Research from Space on a much larger scale, including development of scientific foundations and methods of analysis of global satellite radiophysical observations for reliable evaluation of changes in Earth environment and climate. First and foremost, we focus on the development of animation techniques of investigating circulation and transport features of global fields of water vapor in Earth's atmosphere based on data of satellite radiothermal sensing.

**Keywords:** Earth research from space, microwave passive remote sensing, atmospheric catastrophes, polar transfer, climate, animation of global fields

## References

1. Ermakov D.M., Sharkov E.A., Vzaimodeistvie migriruyushchikh polei vodyanogo para s dochernimi polyami kak neobkhodimiy element pri intensivatsii tropicheskikh tsiklonov (Interaction of migratory water vapor fields with daughter fields as the necessary element with tropical cyclones intensification), *Turbulentnost', dinamika atmosfery i klimata* (Conf. Turbulence, atmosphere and climate dynamics), 13–16 May 2013, IFA RAN, Book of Abstracts, Moscow: GEOS, 2013, pp. 109–112.
2. Ermakov D.M., Raev M.D., Suslov A.I., Sharkov E.A., Elektronnaya baza mnogoletnikh dannykh global'nogo radioteplovogo polya Zemli v kontekste mnogomasshtabnogo issledovaniya sistemy okean-atmosfera (Electronical long-standing database for the global radiothermal field of the Earth in context of multiscale investigation of the atmosphere–ocean system), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2007, No. 1, pp. 7–13.
3. Ermakov D.M., Chernushich A.P., Sharkov E.A., Pokrovskaya I.V., Poisk istochnika energii pri intensivatsii TTs Katrina po dannym mikrovolnovogo sputnikovogo zondirovaniya (Search for an energy source for the intensification of TC Katrina by microwave satellite data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012a, No. 4, pp. 47–56.
4. Ermakov D.M., Chernushich A.P., Sharkov E.A., Detalizatsiya faz razvitiya TTs Katrina po interpolirovannym global'nym polyam vodyanogo para (Detailing the developmental phases of the TC Katrina by interpolated global fields of water vapor), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012b, Vol. 9, No. 2, pp. 207–213.
5. Ermakov D.M., Raev M.D., Chernushich A.P., Sharkov E.A., Algoritm postroeniya global'nykh radioteplovykh polei sistemy okean-atmosfera vysokoi prostranstvenno-vremennoi diskretizatsii po sputnikovym mikrovolnovym izmereniyam (An Algorithm for Construction of Global Ocean Atmosphere Radiothermal Fields with High Spatiotemporal Sampling Based on Satellite Microwave Measurements), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013a, No. 4, pp. 72–82.
6. Ermakov D.M., Sharkov E.A., Chernushich A.P., Animatsionnyi analiz pretsedentov bystroj intensivatsii tropicheskikh tsiklonov (Animated analysis of precedents of tropical cyclones' rapid intensification), Remote Sensing of Environment: Scientific and Applied Research in Asia-Pacific (RSAP2013), 24–27 September 2013, Vladivostok, Russia, Book of Abstracts, 2013b, pp. 63–64.
7. Ermakov D.M., Sharkov E.A., Pokrovskaya I.V., Chernushich A.P., Obnaruzhenie energeticheskikh istochnikov v peremezhaemykh rezhimakh intensivnosti TTs Alberto pri ego evolyutsii po dannym sputnikovogo mikrovolnovogo zondirovaniya (Detection of energy sources in the intermittent stages of TC Alberto's intensity by satellite microwave data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013c, No. 4, pp. 39–49.
8. Ermakov D.M., Sharkov E.A., Chernushich A.P., Vozmozhnosti kolichestvennogo opisaniya mezomasshtabnykh protsessov v atmosfere na osnove animatsionnogo analiza (Possibility of quantitative description of mesoscale processes in the atmosphere based on the animated analysis), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014a, Vol. 11, No. 4, pp. 153–162.
9. Ermakov D.M., Sharkov E.A., Chernushich A.P., Otsenka troposfernykh advektivnykh potokov skrytogo tepla nad okeanom pri animatsionnom analize radioteplovykh dannykh sputnikovogo monitoringa (Evaluation of troposphere advective latent heat fluxes over oceans by animated analysis of satellite radiothermal remote data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014b, No. 4, pp. 32–38.

10. Ermakov D.M., Sharkov E.A., Chernushich A.P., Rol' troposferykh advektivnykh potokov skrytogo tepla v intensivatsii tropicheskikh tsiklonov (The role of tropospheric advection of latent heat in the intensification of tropical cyclones), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014c, No. 4, pp. 3–15.
11. Ermakov D.M., Chernushich A.P., Sharkov E.A., Otsenki i dostizhimye tochnosti opisaniya dinamiki i energetiki mezomasshtabnykh i sinopticheskikh atmosferykh protsessov s pomoshch'yu sputnikovogo radioteplovideniya (Estimations and attainable accuracies for the explanation of dynamics and energetics in mesoscale and synoptic atmospheric processes by satellite radiothermvision), *8 konferentsiya "Radiolokatsiya i radiosvyaz"* (8<sup>th</sup> Conf. Radiolocation and Communication), Moscow, IRE RAS, 24–28 November 2014d, Proc. Conf., pp. 174–179.
12. Ermakov D.M., Sharkov E.A., Chernushich A.P., Otsenka tochnosti interpolatsionnoi skhemy sputnikovogo radioteplovideniya (Estimation of the accuracy in the interpolation pattern for the satellite radiothermvision), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015 (in print).
13. Pokrovskaya I.V., Sharkov E.A., Global'nyi tropicheskii tsiklogenez kak sluchainyi puassonovskii protsess (Global tropical cyclogenesis as Poisson random process), *Doklady AN SSSR*, 1993, Vol. 331, No. 5, pp. 625–627.
14. Pokrovskaya I.V., Sharkov E.A., *Katalog tropicheskikh tsiklonov i tropicheskikh vozmushchenii Mirovogo okeana za 1983–1998 gg, Versiya 1.1*, (Catalogue of tropical cyclones and tropical disturbances of the World Ocean for 1983–1998), Moscow: Poligraf servis, 1999, 160 p.
15. Pokrovskaya I.V., Sharkov E.A., *Tropicheskie tsiklony i tropicheskie vozmushcheniya Mirovogo okeana: khronologiya i evolyutsiya, Versiya 2.1 (1983–2000)*, (Tropical cyclones and tropical disturbances: Chronology and Evolution. Version 2.1 (1983–2000)), Moscow: Poligraf servis, 2001, 548 p.
16. Pokrovskaya I.V., Sharkov E.A., *Tropicheskie tsiklony i tropicheskie vozmushcheniya Mirovogo okeana: khronologiya i evolyutsiya, Versiya 3.1 (1983–2005)*, (Tropical cyclones and tropical disturbances: Chronology and Evolution. Version 3.1 (1983–2005)), Moscow: Poligraf servis, 2006, 728 p.
17. Pokrovskaya I.V., Sharkov E.A., *Tropicheskie tsiklony i tropicheskie vozmushcheniya Mirovogo okeana: khronologiya i evolyutsiya (2006–2010). Versiya 4.1*, (Tropical cyclones and tropical disturbances: Chronology and Evolution. Version 4.1 (2006–2010)), Moscow: KDU, 2011, 212 p.
18. Sharkov E.A., Global'nyi tropicheskii tsiklogenez kak slabo neravnovesnaya geofizicheskaya sistema (The global tropical cyclogenesis as a weakly nonequilibrium geophysical system), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1996, No. 6, pp. 11–17.
19. Sharkov E.A., Aerokosmicheskie issledovaniya tropicheskikh tsiklonov (Airspace investigations of tropical cyclones), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1997, No. 6, pp. 87–111.
20. Sharkov E.A., Global'nyi tropicheskii tsiklogenez: evolyutsiya nauchnykh vzglyadov i rol' distantsionnogo zondirovaniya (Global tropical cyclogenesis: evolution of scientific concepts and the role of remote sensing), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 1, pp. 68–76.
21. Sharkov E.A., Universal'naya postoyannaya generatsii stokhasticheskogo rezhima global'nogo tropicheskogo tsiklogeneza v kontekste klimaticheskikh variatsii (The Universal Constant of Generation for Stochastic Regimes of Global Tropical Cyclogenesis in the Context of Climatic Variations), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 6, pp. 31–38.
22. Sharkov E.A., Distantsionnye issledovaniya atmosferykh katastrof (Remote Sensing of Atmospheric Catastrophes), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2010, No. 1, pp. 52–68.
23. Sharkov E.A., Global'nyi tropicheskii tsiklogenez kak trekhkomponentnaya stokhasticheskaya struktura v klimaticheskoi sisteme Zemli (Global tropical cyclogenesis as three component stochastic structure in the Earth climatic system), *Turbulentnost', dinamika atmosfery i klimata* (Conf. Turbulence, atmosphere and climate dynamics), 13–15 May 2013, IFA RAN: Book of Abstracts. Moscow: GEOS, 2013, pp. 97–99.
24. Sharkov E.A., Kim G.A., Pokrovskaya I.V., Evolyutsiya tropicheskogo tsyklona Gonu i ego svyaz' s polem integral'nogo vodyanogo para v ekvatorial'noi oblasti (Evolution of Tropical Cyclone Gonu and its Interaction with the Precipitable Water Field in the Equatorial Zone), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2008, No. 6, pp. 25–30.
25. Sharkov E.A., Kim G.A., Pokrovskaya I.V., Energeticheskie osobennosti mnozhestvennogo tropicheskogo tsiklogeneza po mul'tispektral'nym sputnikovym nablyudeniya (Energy Properties of the Plural Tropical Cyclogenesis in Global Water Vapor Field Using Multispectral Satellite Observations), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 2, pp. 18–25.
26. Sharkov E.A., Shramkov Ya.N., Pokrovskaya I.V., Povyshennoe sodержanie vodyanogo para v atmosfere tropicheskikh shirot kak neobkhodimoe uslovie genezisa tropicheskikh tsiklonov (The Integral Water Vapor in Tropical Zone as the Necessary Condition for Atmospheric Catastrophes Genesis), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 2, pp. 73–82.
27. Sharkov E.A., Shramkov Ya.N., Pokrovskaya I.V., Obnaruzhenie vysokoenergetichnykh kupolov v ekvatorial'nom pole integral'nogo vodyanogo para pri genezise tropicheskogo tsyklona Francisco (2001) (The detection of high-energy domes in the water vapor equatorial field under the tropical cyclone Francisco (2001) genesis), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 5, pp. 3–11.
28. Elsner J.B., Kara A.B., *Hurricanes of the North Atlantic, Climate and Society*, Oxford University Press, New York: Oxford, 1999, 488 p.
29. Ermakov D.M., Sharkov E.A., Evolution of hurricane Alberto (2000) in the field of water vapor over North Atlantic retrieved from satellite data, *ESA Living Planet Symposium*, 9–13 September, 2013, Edinburgh, UK: Abstracts, 4-P-81, available at: URL: <http://www.livingplanet2013.org/abstracts/848296.htm>.
30. Ermakov D.M., Chernushich A.P., Sharkov E.A., A closed algorithm to create detailed animated water vapor fields over the oceans from polar-orbiting satellites' data, *ESA Living Planet Symposium*, 9–13 September, 2013, Edinburgh, UK: Abstracts, 2013, 4-P-321, available at: URL: <http://www.livingplanet2013.org/abstracts/847176.htm>.
31. Gray W.M., A personal (and perhaps unpopular) view of tropical meteorology over the last 40 years and future outlook, *22<sup>nd</sup> Conference Hurricane and Tropical Meteorology*, 19–23 May, 1997, Ft Collins, Colorado. American Meteorological Society, Boston, 1997, pp. 19–24.

32. Sharkov E.A., *Remote Sensing of Tropical Regions*, Chichester, John Wiley and Sons/PRAXIS, 1998, 310 p.
33. Sharkov E.A., *Global Tropical Cyclogenesis*, New York etc.: Springer/PRAXIS, 2000, 361 p.
34. Sharkov E.A. *Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations*, Springer/PRAXIS. 2003. Berlin, Heidelberg, New York. 612 p.
35. Sharkov E.A., *Global Tropical Cyclogenesis, 2<sup>nd</sup> Edition*, New York etc.: Springer/PRAXIS, 2012, 650 p.
36. Willoughby H.E., Jorgensen D.P., Black R.A., Rosenthal S.L., Project STORMFURY: A Scientific Chronicle 1962–1983, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1985, Vol. 66, No. 5, pp. 505–514.