

Об использовании поверхностных тепловых потоков в качестве предвестников тропического циклогенеза

А. Г. Гранков*

Анализируются возможности локализации районов зарождения ураганов на основе данных спутникового архива HOAPS о пространственном распределении поверхностных тепловых потоков. В данных районах в течение 4–6 суток, предшествующих зарождению ураганов, отмечается нарастание потоков скрытого и явного тепла. При этом максимальные значения тепловых потоков достигаются одновременно с переходом тропических образований из стадии тропического шторма в стадию тропического урагана.

Ключевые слова: зарождение ураганов, поверхностные тепловые потоки, сверхвысокочастотные радиометрические измерения, архив HOAPS.

DOI: 10.52002/0130-2906-2025-3-111-117

Введение

Поиск индикаторов и предвестников тропических ураганов (ТУ) является актуальной задачей разработки информационных (в том числе спутниковых) технологий диагностики их зарождения [1]. Одно из перспективных направлений ее решения — мониторинг общего влагосодержания атмосферы в районах циклогенеза на основе данных спутниковых измерений яркостной температуры системы океан — атмосфера в спектральной области поглощения радиоволн водяным паром атмосферы.

Некоторые возможности использования спутниковых СВЧ-радиометрических оценок общего влагосодержания атмосферы в качестве предвестника зарождения ТУ рассматривались в рамках изучения процессов циклогенеза в Мексиканском заливе путем анализа группового (усредненного над акваторией залива) отклика их суточных значений на эти процессы [3]. Проведенный анализ пространственной изменчивости полей общего влагосодержания в периоды зарождения ТУ Брет (1999 г.), Умберто (2007 г.), Лоренцо (2007 г.), Катя (2017 г.) выявил общую для них особенность, связанную с приходом с западного побережья Африки тропических волн, — усиление в течение нескольких дней пространственной изменчивости поля влагосодержания над акваторией Мексиканского залива и дальнейшее ее ослабление (сглаживание поля) перед финальной стадией — зарождением урагана. Данная сигнатура может служить предвестником зарождения и развития ураганов в заливе, но не позволяет по своему определению

* Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук; e-mail: agrankov@inbox.ru (Гранков Александр Георгиевич).

дифференцировать поле общего влагосодержания в различных частях его акватории и тем самым не обеспечивает локализации районов формирования ТУ.

Рассмотрен иной подход к процессам циклогенеза, основанный на использовании более динамичной по сравнению с общим влагосодержанием атмосферы характеристики — вертикального турбулентного потока скрытого (латентного) тепла на границе раздела поверхности океана и атмосферы.

Развитие тропического урагана (переход от стадии морского шторма к стадии собственно урагана) рассматривается как результат прекращения условий существования стационарного режима в процессах теплообмена между океаном и атмосферой, подобно тому как в теории Н. Н. Семенова появление нестационарного режима — теплового взрыва — формулируется как условие исчезновения стационарного режима, когда процессы тепловыделения не уравниваются процессами теплоотвода [5]. При этом следует ожидать, что в этот момент будут наблюдаться значительные изменения временной динамики теплового потока на границе раздела океана и атмосферы, который является четким индикатором изменений теплового баланса между океаном и атмосферой.

На ряде примеров анализируются особенности изменчивости полей вертикальных турбулентных потоков скрытого и явного тепла на поверхности океана в районах развития ТУ. Оцениваются возможности их использования не только для диагностики времени развития ураганов, но и для определения местоположения их очагов.

Исходные данные

В качестве исходных данных используются значения поверхностных потоков скрытого (латентного, q_e) и явного тепла, а также общего влагосодержания атмосферы (Q) в Мировом океане с 6-часовым временным разрешением на сетке $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ из глобального архива HOAPS (The Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite) [7]. Архив базируется на данных долговременных СВЧ-радиометрических измерений со спутников DMSP и ИК-радиометрических измерений со спутников NOAA: первые используются для определения температуры, влажности воздуха, скорости ветра в приводном слое атмосферы и общего влагосодержания атмосферы, а вторые — для определения температуры поверхности океана. Те и другие параметры в совокупности позволяют рассчитать поверхностные потоки явного и скрытого тепла на основе формул тепло- и влагообмена между океаном и атмосферой — балк-формул.

Анализ архива HOAPS показывает, что его отдельные данные представлены неполно (фрагментарно), что можно объяснить наличием слепых зон, образующихся в результате расхождения полос сканирования СВЧ-радиометров спутников DMSP в тропических широтах, которые и являются областью интересов в нашем случае. Указанная особенность учитывается при анализе пространственно-временной изменчивости тепловых потоков, а также общего влагосодержания атмосферы в районах зарождения рассмотренных ниже тропических ураганов. Необходимое качество их количественного описания при этом достигается путем отбора областей с минимальным влиянием слепых зон.

Пространственная динамика общего влагосодержания атмосферы и поверхностных потоков влаги в районе развития ураганов

Ураган Лоренцо. В соответствии с историей развития [8], тропический ураган Лоренцо образовался из тропической волны, которая прошла через западное побережье Африки 11 сентября 2007 г., и сформировался первоначально в виде тропической депрессии в юго-западной части Мексиканского залива 25 сентября 2007 г. в точке 21,8 с. ш., 94,8 з. д.; стадия урагана была достигнута 28 сентября в точке 20,5 с. ш., 96,3 з. д.

С помощью данных архива HOAPS проведен анализ пространственной изменчивости полей общего влагосодержания атмосферы и поверхностных потоков тепла и влаги в акватории Мексиканского залива, прилегающей к району зарождения ТУ Лоренцо, на разных стадиях его развития.

На рис. 1 представлены результаты анализа на примере одной из 6-часовых временных выборок спутниковых изображений полей общего влагосодержания атмосферы и потока скрытого тепла за 18 ч до зарождения ТУ Лоренцо.

Отмечаются следующие особенности пространственного распределения параметров Q и q_e в заливе:

- максимальные значения поля потока скрытого тепла локализованы в районе зарождения урагана Лоренцо в отличие от поля общего влагосодержания атмосферы, пространственная картина которого лишь указывает на направление к этому району;
- максимальный рост потока скрытого тепла наблюдается в направлении от наиболее глубоководной центральной области Мексиканского залива к мелководной его части в районе зарождения урагана.

Ураган Брет сформировался первоначально в виде тропической депрессии у побережья п-ова Юкатан в Мексиканском заливе 18 августа 1999 г. в точке 19,5 с. ш., 94,4 з. д., стадия урагана была достигнута 21 августа в точке 21,9 с. ш., 94,5 з. д. [10]. Ураган Брет примечателен

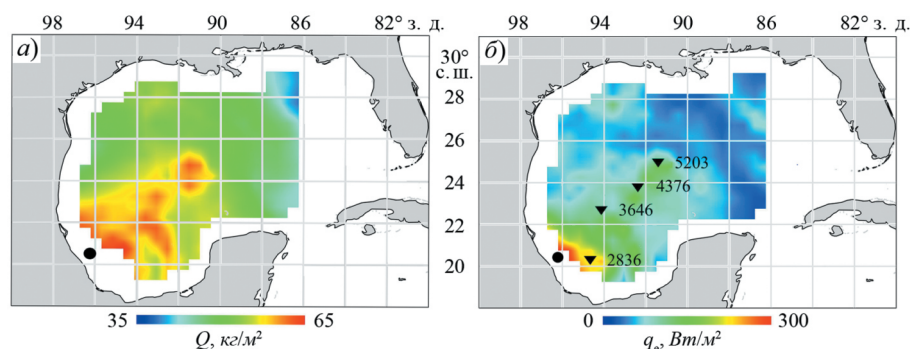


Рис. 1. Пространственное распределение общего влагосодержания атмосферы Q (а) и потока скрытого тепла q_e (б) в Мексиканском заливе в 6 ч 27 сентября 2007 г.

Здесь и на рис. 2 точка — район зарождения урагана, цифры на рисунке б — глубина залива в метрах.

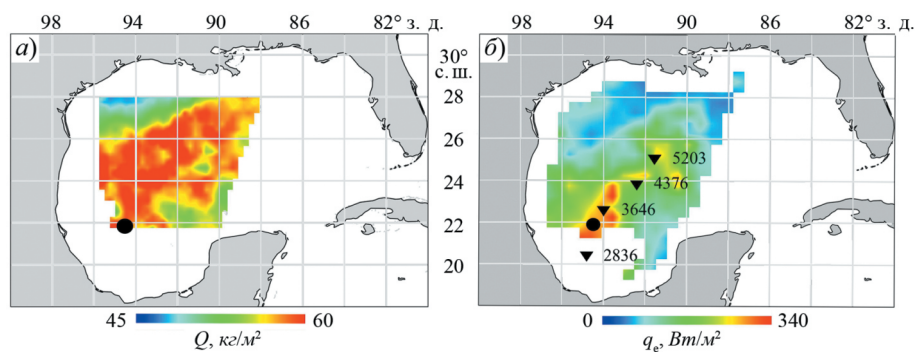


Рис. 2. Пространственные распределения общего влагосодержания атмосферы Q в Мексиканском заливе в 6 ч 20 августа 1999 г. (а) и потоков скрытого тепла q_e в 12 ч 20 августа 1999 г. (б).

тем, что он является самым мощным ураганом из числа зародившихся в Мексиканском заливе за всю историю наблюдений.

С помощью данных архива HOAPS проведен анализ пространственной изменчивости полей общего влагосодержания атмосферы и поверхностных потоков тепла в акватории Мексиканского залива, прилегающей к району развития ТУ Брет, на разных стадиях развития урагана (рис. 2).

Здесь, как и в случае с ТУ Лоренцо, максимальные значения поля потока скрытого тепла локализованы в районе развития урагана Брет, в отличие от поля общего влагосодержания атмосферы, пространственная картина которого лишь указывает на направление к данному району. Одновременно наблюдается максимальный рост потока скрытого тепла в направлении от наиболее глубоководной центральной области Мексиканского залива к его мелководной части в районе зарождения урагана.

Временная динамика тепловых потоков в районах развития ураганов

На основе данных архива HOAPS проведен анализ временной изменчивости потоков явного и скрытого тепла на разных стадиях развития тропических образований Лоренцо и Брет в районах, координаты которых соответствуют моментам их перехода из стадии тропического шторма в стадию тропического урагана; в качестве примеров на рис. 3 приведены результаты для временной динамики потоков скрытого тепла.

Анализ рис. 3 показывает, что образованию ураганов Лоренцо и Брет предшествует нарастание в течение 5—6 суток потоков скрытого тепла, максимальные значения которых знаменуют переход данных тропических образований из стадии тропического шторма в стадию тропического урагана. После ухода ураганов из районов зарождения величина q_e начинает уменьшаться, возвращаясь к своим первоначальным значениям, наблюдавшимся до начала процессов циклогенеза.

Согласно данным архива HOAPS, интенсивность потоков явного тепла в области развития ТУ Лоренцо и Брет на порядок меньше интенсивности

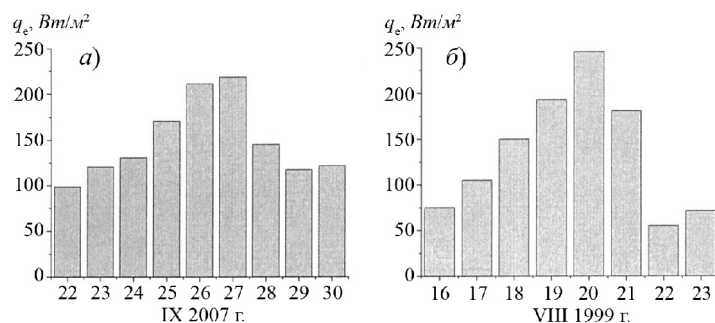


Рис. 3. Динамика изменения суточных потоков скрытого тепла q_e в районах развития ТУ Лоренцо — в квадрате $1^\circ \times 1^\circ$ с координатами центра $20,5^\circ$ с. ш., $96,3^\circ$ з. д. (а) и Брет — в квадрате $1^\circ \times 1^\circ$ с координатами центра $21,9^\circ$ с. ш., $94,5^\circ$ з. д. (б).

потоков скрытого тепла. Данный результат согласуется с известными сведениями о доминировании в тропических широтах процессов влагообмена между поверхностью океана и атмосферой над процессами теплообмена в виде явного тепла [4].

При этом в пространственной и временной динамике потоков явного тепла отмечаются такие же особенности, как у потоков скрытого тепла, что можно объяснить высокой корреляцией в тропических широтах синоптических полей температуры и влажности воздуха в приводном (10-метровом) слое — ключевом для формирования турбулентных потоков тепла и влаги.

Анализ временной динамики поверхностных тепловых потоков был также проведен для районов развития атлантических ураганов Иван и Рита.

По данным оптических и ИК-изображений, полученных с геостационарных спутников “GOES-12” и “Aqua” (“EOS PM-1”), ТУ Иван сформировался в тропической зоне Атлантики 5 сентября 2004 г. в точке $9,5^\circ$ с. ш., $43,4^\circ$ з. д. [11]. Ураган соответствует 5-й категории интенсивности по шкале Саффира — Симпсона, максимальная скорость ветра составляла 270 км/ч.

Ураган Рита зародился во Флоридском проливе ($23,7^\circ$ с. ш., $80,3^\circ$ з. д.) 20 сентября 2005 г. [9] и набрал полную силу в центральной части Мексиканского залива, скорость ветра достигала 285 км/ч (5-я категория интенсивности).

На основе данных архива HOAPS проведен анализ временной изменчивости потоков скрытого и явного тепла на разных стадиях развития тропических образований Иван и Рита в районе, где происходил их переход из стадии тропического шторма в стадию тропического урагана; результаты анализа в виде 6-часовых выборок для потоков скрытого тепла q_e приведены на рис. 4.

Видно, что зарождению ураганов Иван и Рита предшествовало нарастание в течение 5 суток потока скрытого тепла, который достиг максимальных значений в моменты перехода данных тропических образований из стадии тропического шторма в стадию тропического урагана. После ухода ураганов из районов зарождения величина q_e начинает уменьшаться.

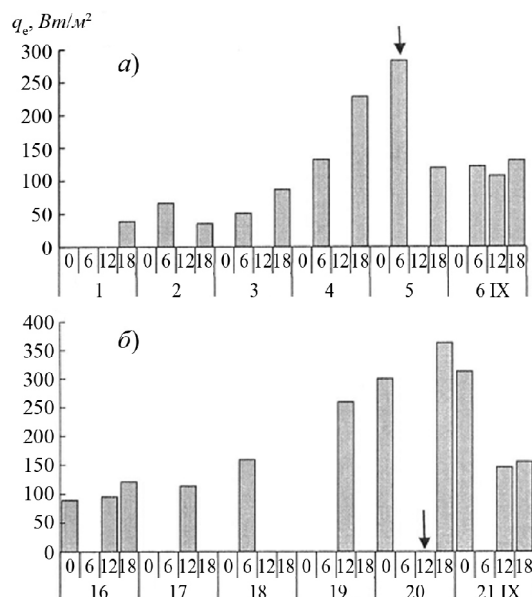


Рис. 4. Вариации поверхностных потоков скрытого тепла q_e в районах развития ТУ Иван в сентябре 2004 г. (а) и ТУ Рита в сентябре 2005 г. (б).

Стрелки указывают время зарождения ураганов. Период с 18 ч 18 сентября до 6 ч 19 сентября на рисунке б совпадает с пересечением траектории ТУ Рита гряды Бермудских островов; для таких районов океана спутниковый архив НОАПС не содержит данных.

Зарождение ТУ Лоренцо и Брет в данной области Мексиканского залива (залив Кампече) можно объяснить глубинной дегазацией в зонах разлома земной коры, связанной с гидротермальной деятельностью на дне океана [2, 6], в данном случае — в зоне Карибской литосферной плиты в районе ее проецирования на поверхность залива Кампече. Данный фактор может приводить к дополнительному росту поверхностных потоков тепла, усиливая неустойчивость (нестационарность) процессов тепло- и влагообмена между водной поверхностью и атмосферой в первую очередь в мелководных областях Мексиканского залива, наиболее близких к зонам дегазации его дна. Такое же предположение можно сделать относительно района зарождения ТУ Рита, находящегося в зоне Карибской литосферной плиты, а также ТУ Иван в Атлантическом океане (в зоне разлома Срединно-Атлантического хребта на дне океана), где регулярно наблюдается зарождение многих других тропических ураганов. Для подтверждения гипотезы влияния глубинной дегазации на местоположение зарождения тропических ураганов в дальнейшем необходим совместный анализ спутниковых данных о поверхностных тепловых потоках и данных проецирования прямых измерений выходов подводных гидротерм на поверхность океана.

Следует также отметить, что потоки явного и скрытого тепла достигают максимальных значений на финальной стадии развития ураганов Лоренцо, Брет, Иван, Рита — их перехода из стадии шторма в стадию собственно урагана. Этот результат, рассматриваемый как условие исчезновения стационарного режима в тепловом взаимодействии поверхности океа-

Интенси́вность потоков явного тепла в период формирования ТУ Иван и Рита на порядок меньше интенсивности потоков скрытого тепла; при этом в их временной динамике также отмечаются общие закономерности.

Обсуждение результатов

Результаты анализа полученных на основе данных спутниковых измерений пространственных распределений тепловых потоков в районах формирования ураганов в Мексиканском заливе указывают на возможность определения местоположения районов их развития. Примеры формирования ТУ Лоренцо и Брет в Мексиканском заливе показывают, что максимальные значения потока скрытого тепла локализуются в этих районах.

на и атмосферы в процессе формирования урагана, когда процессы тепло-выделения не уравниваются процессами теплоотвода (по Н. Н. Семенову), удалось получить, не прибегая к подробному математическому анализу развития нестационарности процессов тепло- и влагообмена между океаном и атмосферой, что является задачей отдельного исследования.

Развитию тропических ураганов Лоренцо, Брет, Иван, Рита предшествовало нарастание в течение 5—6 суток потоков явного и скрытого тепла; эта особенность их временной динамики может оказаться полезной при разработке методов диагностики процессов развития тропических ураганов.

Наличие слепых зон, образующихся в результате расхождения полос сканирования СВЧ-радиометров спутников DMSP в тропических широтах океана, приводит к нарушению цельности спутниковых изображений полей поверхностных тепловых потоков в архиве HOAPS и снижению их временной регулярности. В частности, как показано на примере ТУ Иван и Рита, фактическая (с учетом пропусков в архиве) регулярность данных о потоках явного и скрытого тепла в районе его зарождения составляет 12 ч.

Автор признателен Е. П. Новичихину и Н. К. Шелобановой за помощь в обработке спутниковых данных.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук.

Литература

1. Бондур В. Г., Крапивин В. Ф. Космический мониторинг тропических циклонов. — М., Научный мир, 2014, 508 с.
2. Горяинов И. Н., Казакова В. Е., Смекалов А. С. Проецирование на поверхность океана выходов подводных гидротерм. — Отечественная геология, 1996, № 2, с. 50—53.
3. Гранков А. Г. О связи полей влажности атмосферы в Мексиканском заливе с процессами зарождения и развития ураганов. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2021, т. 57, № 4, с. 495—506.
4. Лаппо С. С., Гулев С. К., Рождественский А. Е. Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан — атмосфера и энергоактивные области Мирового океана. — Л., Гидрометеиздат, 1990, 336 с.
5. Семенов Н. Н. Избранные труды, в 4 т. /Отв. ред. А. Е. Шилов, Г. Б. Сергеев. Т. 2. Горение и взрыв. — М., Наука, 2005, 703 с.
6. Сывороткин В. Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. — М., Геоинформцентр, 2002, 250 с.
7. Andersson A., Fennig K., Klepp C., et al. The Hamburg ocean atmosphere parameters and fluxes from satellite data — HOAPS-3. — Earth Syst. Sci. Data, 2010, vol. 2, pp. 215—234.
8. Franklin J. L. Tropical Cyclone Report: Hurricane Lorenzo, 22—28 September 2007. — Miami, National Hurricane Center, 18 October 2007.
9. Knabb R. D., Brown D. P., and Rhome J. R. Tropical Cyclone Report: Hurricane Rita, 18—26 September 2005. — National Hurricane Center, 17 March 2006 (Updated 14 August 2006 and 14 September 2011).
10. Lawrence M. B. and Kimberlain T. B. Tropical Cyclone Report: Hurricane Bret, 18—25 August 1999. — Miami, National Hurricane Center (Revised 26 February 2001).
11. Stewart S. R. Tropical Cyclone Report: Tropical Hurricane Ivan, 2—12 September 2004. — Miami, National Hurricane Center 16 December 2004 (Updated 27 May 2005 and 11 August 2011).