

## О СВЯЗИ ИНТЕНСИВНОСТИ ТРОПИЧЕСКИХ УРАГАНОВ С ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТЬЮ. ВЗГЛЯД ИЗ КОСМОСА

В. В. Хегай, А. В. Карелин

*Проанализирована возможность оценки скорости ионизации атмосферы в тропических ураганах с помощью детекторов молний из космоса. Установлено, что совместный анализ временной динамики грозовой активности и темпа нарастания скорости тропических ураганов за первые несколько суток позволит оценить перспективы развития тропических ураганов с использованием фундаментального уравнения для тангенциальной составляющей скорости тропических ураганов и временной развертки скорости ионизации атмосферы. Состояние океана и атмосферы (температура, влажность, насыщенность центрами конденсации) в областях возникновения и распространения тропических ураганов можно установить с помощью космического мониторинга микроволновыми зондировщиками и детекторами молний, установленными на спутниках «Метеор-М», «Метеор-МП», «Электро-М» и «Лидер-МЧС». Перспективы возникновения и развития тропических ураганов можно оценить с использованием систем глобального космического мониторинга.*

**Ключевые слова:** тропический ураган, детектор молний, грозовая активность, центры конденсации, скорость ионизации, относительная влажность, температура океана, космический мониторинг.

### Введение

Тропические ураганы, циклоны и тайфуны (ТЦ) являются одними из самых грозных проявлений природных катаклизмов. Интенсивность ТЦ определяется тангенциальной составляющей скорости ветра по радиусу урагана. Энергия ветра, запасенная в мощных ТЦ, может превышать  $10^{18}$  Дж. Надежный прогноз динамики развития ТЦ необходим для защиты населения прибрежных зон в тропических регионах Земли. Знание истинной природы столь сложного природного явления необходимо для того, чтобы оценить перспективы и возможные методы борьбы с этим катаклизмом. Существенное продвижение в понимании природы этого явления, усиленное эффективными методами моделирования, было достигнуто в работах [1 – 6]. Физическая природа ТЦ основана на выделении большого количества тепла в результате конденсации паров воды в атмосфере на заряженных центрах конденсации, возникающих под воздействием грозовой активности, радиоактивного газа радона-222 в областях повышенной сейсмической активности, а также солнечных и галактических космических лучей. В работе [1] было получено фундаментальное уравнение для тангенциальной составляющей скорости ветра, в котором только один параметр – скорость ионизации в атмосфере – не подлежит прямым измерениям и простым оценкам. Частичному восполнению этого пробела и посвящена данная статья.

В настоящее время ни для кого уже не секрет, что ураганы и тайфуны тем сильнее, чем выше грозовая активность в облаках урагана. Поэтому космические аппараты (КА) на геостационарных орбитах начинают оснащать детекторами молний для

расширения представления о динамике ТЦ. На КА GOES-16 и GOES-17 (США) установлены детекторы молний GLM (Geostationary Lightning Mapper), которые должны улучшить идентификацию и заблаговременность предупреждений гроз, обеспечивая непрерывный мониторинг грозовой активности. Основная цель – измерение с геостационарной орбиты общей грозовой активности как в дневное, так и в ночное время над Северной и Южной Америкой и частями прилегающих океанов. GLM осуществляет непрерывную фиксацию молний для обеспечения:

- прогнозирования сильных штормовых явлений, торнадо, ливней и ливневых наводнений;
- изучения сезонной и межгодовой изменчивости штормов.

GLM – это система камер, оптимизированных для обнаружения и определения местоположения молнии. Основными подсистемами прибора являются: система формирования изображения, блок фокальной плоскости, процессоры событий реального времени, источник питания и интерфейсная электроника. Подсистема формирования изображений – это светосильный телескоп с диаметром апертуры 12 см и интерференционным фильтром с полосой пропускания 1 нм. Широкополосный блокирующий фильтр размещен на передней поверхности фильтрующей подложки, чтобы максимизировать эффективность узкополосного фильтра. Вывод научных данных прибора GLM состоит в основном из событий, а не изображений. Чтобы понять, как GLM обнаруживает молнию, полезно рассматривать его как детектор событий.

На китайский КА FY-4A установлен детектор молний LMI (Lightning Mapper Imager), который

является первым датчиком обнаружения молний на спутниках Китая, камера CCD (Charge Connection Device, прибор с зарядовой связью) работает на длине волны 777,4 нм (атомарный кислород O), для подсчета вспышек и измерения их интенсивности. LMI имеет возможность непрерывного мониторинга в зоне покрытия (поле обзора по диагонали 9000 км). Разрешение – 7,8 км на пиксель в подспутниковой точке и непрерывное наблюдение за полным диском с временным разрешением около 2 мс. LMI используется для наблюдения за региональной грозовой активностью в Китае. Космическая информация с LMI необходима для прогнозирования и предупреждения конвективных осадков, а также для изучения электрического поля Земли. Цели миссии – это фиксация общей плотности молний, непрерывное измерение общей активности разрядов молний (как внутри облаков, так и между облаками и землей) в пределах поля обзора как днем, так и ночью.

Кроме того, в настоящее время в Европе идёт разработка геостационарного инструмента LI (Lightning Imager). Он предназначен для установки на борт перспективного геостационарного гидрометеорологического КА Meteosat 3-го поколения MTG-I (Meteosat Third Generation «Imaging»). Комплекс содержит в себе четыре одинаковых камеры, общее поле зрения которых обеспечивает покрытие большей части видимого диска Земли.

Детекторы молний планируется также поставить на перспективные КА «Электро-М».

Детекторы молний ставились также на низкоорбитальные спутники. Наибольшую известность приобрёл американский инструмент LIS (Light Imaging Sensor), запущенный в 1997 году в составе КА TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission). Этот прибор впервые позволил регистрировать молнии, как на ночной, так и на дневной стороне Земли. Данные, полученные с этого прибора, позволили существенно уточнить климатические модели Земли [7]. Инструмент покрывает 81% поверхности Земли, но при этом фиксируются 98% всех молниевых событий в атмосфере.

В 2016 году запасной образец LIS, хранившийся 19 лет на заводе-изготовителе, был доставлен на Международную космическую станцию и установлен на её внешней поверхности. Таким образом, был продолжен эксперимент по непрерывному наблюдению молний с КА на низкой околоземной орбите. Данный прибор получил название ISS LIS (Light Imaging Sensor on the International Space Station).

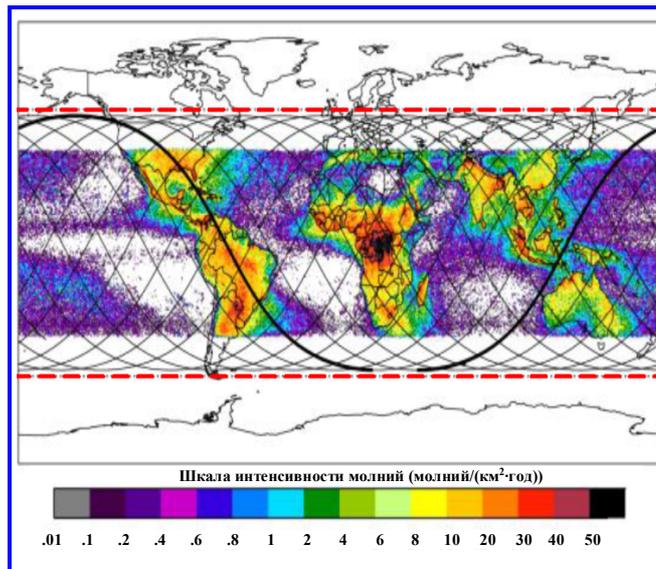


Рис. 1. Распределение частоты молний (молний/(км<sup>2</sup>·год)) по данным ISS LIS

Эксплуатация LIS позволила составить карту распределения частоты молний по поверхности Земли [7], показанную на рис. 1.

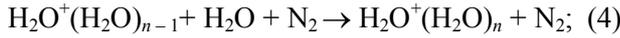
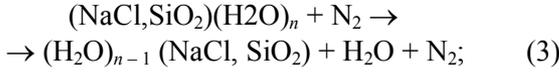
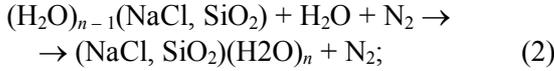
#### Уравнение динамики тропических ураганов

Фундаментальное уравнение для тангенциальной составляющей скорости ветра [1, 2] развито на основе молекулярно-кинетической теории конденсации [2]. В уравнении для характерной скорости ТЦ, которое можно записать в виде (1):

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\left[ A_c(T_g)U_{cd}(T_g)\sqrt{\frac{v_i(t)N}{\beta_{ii}}} + (A_{ass}(T_g) - A_{diss}(T_g))U_{dd}(T_g)N_n(t) \right] v}{p} - \frac{\kappa v^2}{h}, \quad (1)$$

где  $v$  – искомая скорость ТЦ;  $h = 7200$  м – высота эквивалентного столба равной плотности, оказывающего на поверхность океана давление  $p = 10^5$  Па;  $T_g$  в скобках указывает на зависимость соответствующих параметров от температуры среды (при этом предполагается, что тяжелые частицы в воздухе находятся в состоянии локального термодинамического равновесия с поверхностью океана);  $U_{dd}$  и  $U_{cd}$  – потенциалы диполь-дипольного и заряд-дипольного взаимодействия, соответственно [2];  $\kappa$  – коэффициент трения воздуха о поверхность воды, равный 0,0011 [8];  $N_n$  и  $N$  – концентрации нейтральных центров конденсации и нейтральных молекул;  $A_c$ ,  $A_{ass}$ ,  $A_{diss}$  – вероятности процессов конверсии молекул воды на заряженных центрах конденсации,

а также ассоциации и диссоциации на нейтральных центрах, соответственно, которые оцениваются на основании констант скоростей реакций [2]:



Константы скоростей реакций диссоциации  $k_{dis}$  (3) и отрыва  $k_{dt}$  (5) связаны с константами скоростей ассоциации (2) и конверсии  $k_{ac, con}$  (4) принципом детального равновесия [2]:

$$k_{dis, dt} = \frac{g_{n-1}g_{H_2O}}{g_n} k_{ac, con} K_{eq1,2}; \quad (6)$$

$$K_{eq1,2} = 6,53 \cdot 10^{26} \exp\left(-\frac{U_{dd,cd}}{k_B T_g}\right), \quad (7)$$

где  $g_n, g_{n-1}, g_{H_2O}$  – статистические веса кластеров и молекулы воды;  $K_{eq1,2}$  – константы равновесия для обоих случаев.

Вероятность отрыва молекул от заряженного центра конденсации во всем рассматриваемом диапазоне температур много меньше вероятности прилипания, поэтому ею можно пренебречь.

В уравнении (1) учтено, что концентрация заряженных центров конденсации оценивается как  $N_c = 2 \sqrt{\frac{f(t)}{\beta_{ii}}}$ , где  $\beta_{ii}$  – скорость ион-ионной ре-

комбинации тяжелых ионных кластеров (равна  $10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$  [2]);  $f(t) = v_i(t)N$  – скорость ионизации в атмосфере (при естественных условиях над сушей составляет около  $10 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ , над морем – не более  $5 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ );  $v_i$  – частота ионизации;  $N$  – концентрация молекул воздуха.

Ещё одной отличительной особенностью уравнения (1) является то, что все коэффициенты в нем понятны с физической точки зрения и не являются результатом аппроксимации результатов наблюдений (за исключением коэффициента трения  $\kappa$ ), а также наличием в первом члене множителя искомой характерной скорости ТЦ  $v$ . Откуда следует принципиальная невозможность запуска ТЦ в

условиях полного штиля. Требуется какая-то начальная скорость ветра или неоднородность подстилающей поверхности, обеспечивающая ее.

Основную роль в процессе запуска тропического урагана играет количество центров конденсации, особенно заряженных, испарение молекул воды с поверхности которых сильно затруднено. Концентрация нейтральных центров конденсации, согласно [2], принималась равной  $N_n = 10^3 \text{ см}^{-3}$ . Следует отметить, что концентрация фракции ядер Айткена (радиус частиц в диапазоне  $10^{-7} - 10^{-5} \text{ см}$ ) в обычных условиях может достигать  $10^5 \text{ см}^{-3}$  [9], однако величина морской компоненты значительно ниже. При этом концентрация средних и тяжелых ионов может значительно превышать величину  $10^4 \text{ см}^{-3}$ .

Концентрация заряженных центров конденсации, как отмечалось выше, оценивается через скорость ионизации, которая в дальнейших оценках с учетом суточного вращения Земли задавалась в следующем виде:

$$f(t) = f_0 \sin^2(\omega t) + f_1 \exp(-\alpha t) \sin^2(\omega t), \quad (8)$$

где  $\omega = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  – циклическая частота вращения Земли;  $\alpha = 1,45 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$  – постоянная затухания максимальной скорости ионизации (соответствует характерному времени затухания 8 суток);  $f_0$  – характерная максимальная скорость ионизации под воздействием солнечных и галактических космических лучей высокой энергии (СКЛ и ГКЛ) без учета высыпания частиц из радиационного пояса;  $f_1$  – максимальная скорость ионизации с учетом высыпания заряженных частиц, вспышечного воздействия СКЛ и ГКЛ, выделения радиоактивного газа радона перед землетрясениями [10] и грозовой активности.

### Результаты расчетов

С учетом результатов наблюдений за грозовыми облаками [11, 12] и космическими лучами [13] можно заключить, что молнии проходят по ионизованным следам космических лучей. Они появляются при напряженностях электрического поля в облаке порядка 3 кВ/см, что на порядок ниже пробивного напряжения воздуха при нормальных условиях ( $E \approx 30 \text{ кВ/см}$ ), имеют ступенчатую (или зигзагообразную) форму и ветвятся с преимущественным направлением вниз. При этом длины их ступеней лежат в областях широких атмосферных ливней (ШАЛ), инициирующих появление молнии. Характерная высота, где зарождаются молнии облако – земля ( $\sim 5 \text{ км}$ ), соответствует характер-

ной высоте максимумов числа частиц в ливнях, образуемых космическими лучами с  $\varepsilon \geq 10^{15}$  эВ. Частицы этих ливней достигают поверхности Земли. Характерная высота внутриоблачных молний ( $\sim 10$  км) соответствует высоте максимума общего числа ливней, образуемых космическими частицами с  $\varepsilon \geq 10^{12}$  эВ. Молния бывает многоимпульсной в тех случаях, когда к неостывшему каналу предшествующего разрядного импульса новый ШАЛ подключает новую содержащую объемный заряд область грозового облака. Период следования (десятки миллисекунд) и число разрядных импульсов молнии (от 1 до 26) определяются потоком ШАЛов, падающих на грозовое облако, а также размерами находящегося в облаке объемного заряда. Без ШАЛов появление молний невозможно [14, 15].

Основным поставщиком разноименно заряженных частиц на стадии зарождения грозового облака являются ионы, образуемые радиоактивными газами и космическими лучами. Появление молний в облаке инициируют широкие атмосферные ливни, образуемые космическими частицами сверхвысоких энергий ( $\varepsilon > 10^{14}$  эВ). Основным поставщиком разноименно заряженных аэрозольных частиц и, соответственно, активных ядер конденсации в стадии развития грозового облака являются сильно разветвленные и сильно ионизованные каналы молний. Электрическая активность и влагосодержание грозового облака возрастают при увеличении интенсивности молний, которая, в свою очередь, увеличивается при усилении ионизации атмосферы [16].

Грозовое облако, в отличие от обычного кучево-дождевого облака, является мощным электрическим генератором [16]. Ток, текущий через облако средних размеров, равен  $\sim 1$  А [17, 18], напряжение между его вершиной и основанием составляет ( $10^8 \div 10^9$ ) В, а электрическая мощность равна  $\sim (100 \div 1000)$  МВт [19]. По своей мощности грозовое облако сравнимо с самыми мощными гидрогенераторами (так, на Братской ГЭС были установлены гидрогенераторы мощностью 225 МВт, на Красноярской – 508 МВт, на Саяно-Шушенской ГЭС – 640 МВт) [20]. Электрический генератор грозового облака работает благодаря протеканию в облаке двух процессов – процесса образования разноименных электрических зарядов и процесса их макромасштабного пространственного разделения [16].

В обычных условиях при невысокой скорости ионизации в атмосфере, независимо от начальной скорости и температуры среды даже при высокой относительной влажности воздуха, развитие мощного тропического урагана (максимальная скорость ветра свыше 60 м/с или 200 км/ч [8]) не происходит [4].

Сравнение результатов численного моделирования с результатами наблюдений динамики развития характерной тангенциальной скорости реального ТЦ «Густав» в Атлантическом океане в 2008 г. приведены на рис. 2 [4]. Зависимость коэффициента трения воздуха о подстилающую поверхность задавалась в виде:

$$k(t) = \begin{cases} 0,0011, & \text{если } 0 < t \leq 1,273 \text{ суток;} \\ 0,0026, & \text{если } 1,273 < t \leq 4,5 \text{ суток;} \\ 0,0011, & \text{если } 4,5 < t \leq 7,269 \text{ суток;} \\ 0,0026, & \text{если } t > 7,269 \text{ суток.} \end{cases} \quad (9)$$

Значения  $k = 0,0026$  обусловлены временем выхода ТЦ на поверхность суши. Максимальная скорость ионизации оценивалась по темпу нарастания скорости ТЦ за первые 1 – 2 суток и составляла  $f_i = 26 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , что примерно в пять раз больше максимальной обычной скорости ионизации над морем. Характерное время затухания максимальной скорости ионизации на пути следования ТЦ  $\alpha^{-1} = 8$  суток. Видно удовлетворительное согласие расчета с результатами наблюдений.

Для развития мощного ТЦ требуется не только заметное повышение скорости ионизации, но и наличие достаточного количества паров воды в атмосфере для последующей ее конденсации. Соответственно рост температуры океана свыше 27 – 28 °С при условии достаточно высокой относительной влажности, что совпадает с результатами многочисленных экспериментальных наблюдений [8].

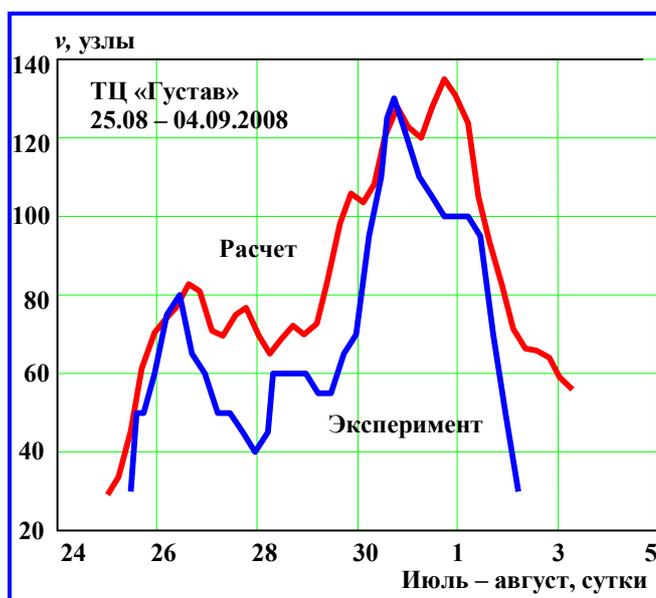
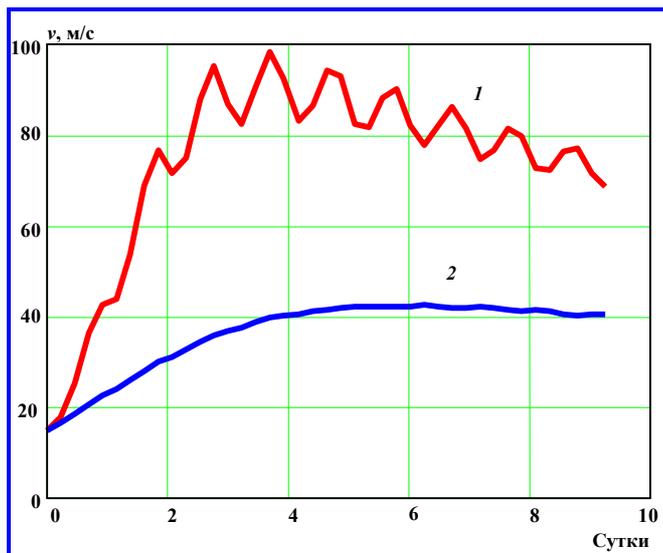


Рис. 2. Сравнение расчетной и экспериментальной зависимостей от времени характерной скорости ветра (в узлах) тропического циклона «Густав» [4]



**Рис. 3. Зависимость скорости тропического циклона от времени при  $T_g = 30^\circ\text{C}$ , влажности  $H = 100\%$  и скоростях ионизации  $f_1 = 36 \text{ см}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$  (1) и  $f_1 = 5,2 \text{ см}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$  (2)**

Исходя из оценки электрической мощности грозового облака [19], можно оценить максимальную скорость ионизации в ТЦ. Она составит  $2600 \text{ см}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$ . Такая скорость ионизации в локальном объеме должна была бы привести к скорости ветра в несколько махов и возникновению ударной волны, как это имеет место в разрядах молний. Однако, многолетние наблюдения показывают, что скорость ветра даже в самых мощных тропических ураганах и тайфунах не превышает  $85 - 100 \text{ м/с}$ . Это означает, что усредненная по объему ТЦ скорость ионизации атмосферы не превышает  $f_1 = 36 \text{ см}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$  (рис. 3).

### Заключение

Очевидно, что скорость ионизации не связана прямо с частотой молниевых вспышек, фиксируемых детектором молний из космоса. Однако, совместный анализ временной динамики грозовой активности и темпа нарастания скорости ТЦ за первые несколько суток позволит оценить перспективы развития ТЦ с использованием фундаментального уравнения для тангенциальной составляющей скорости тропических ураганов (1) и временной развертки скорости ионизации атмосферы.

Состояние океана и атмосферы (температура, влажность, насыщенность центрами конденсации) в областях возникновения и распространения ТЦ можно установить с помощью космического мониторинга микроволновыми зондировщиками и детекторами молний, расположенными на спутниках

«Метеор-М», «Метеор-МП», «Электро-М» и «Лидер-МЧС». Перспективы возникновения и развития ТЦ можно оценить с использованием систем глобального космического мониторинга.

### Литература

1. Dynamics of tropical hurricanes and cyclones / A. V. Karelin // Physics of wave phenomena. – 2006. – Vol. 14. – № 4. – P. 44 – 51.
2. Боярчук К. А. Базовая модель кинетики ионизированной атмосферы / К. А. Боярчук, А. В. Карелин, Р. В. Широков. – Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2006. – 204 с.
3. Динамика тропических ураганов / А. В. Карелин // Сборник трудов VI Российской конференции по Атмосферному электричеству. – Нижний Новгород, 2007. – С. 223 – 224.
4. О возможности космического мониторинга процессов возникновения тропических ураганов / А. В. Карелин // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 111. – № 4. – С. 43 – 49.
5. О возможности космического мониторинга процессов возникновения тропических ураганов / К. А. Боярчук, А. В. Карелин // Международный Российско-Американский научный журнал «Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем». – 2010. – Т. 15. – № 1 (30). – С. 23 – 32.
6. Механизм генерации электричества в грозовых облаках и тропических ураганах / А. В. Карелин // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2010. – Т. 118. – № 5. – С. 45 – 49.
7. Lightning Imaging Sensor (LIS) for the International Space Station (ISS): Mission Description and Science Goals / R. J. Blakeslee, H. J. Christian, M. F. Stewart [и др.] // XV International Conference on Atmospheric Electricity : [electronic text]. – Norman, Oklahoma, 2014. – URL : <https://strives-uploads-prod.s3.us-gov-west-1.amazonaws.com/20140011702/20140011702.pdf?AWSAccessKeyId=AKIASEVSKC45ZTTM42XZ&Expires=1598718753&Signature=G2ySVP%2FLL%2BQt46QkeN0uNgCvdAk%3D> (дата обращения: 29.08.2020).
8. Шулейкин В. В. Расчет развития, движения и затухания тропических ураганов и главных волн, создаваемых ураганами / В. В. Шулейкин. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1978. – 98 с.
9. Грин Х. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы / Х. Грин, В. Лейн. – Ленинград : Химия, 1972. – 214 с.
10. Pulinets S. Ionospheric precursors of earthquakes / S. Pulinets, K. Boyarchuk. – Luxembourg : Springer, 2004. – 318 p.
11. Юман М. Молния / М. Юман. – Москва : Мир, 1972. – 327 с.
12. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество / Дж. А. Чалмерс. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1974. – 420 с.
13. Мурзин В. С. Введение в физику космических лучей / В. С. Мурзин. – Москва : МГУ, 1988. – 319 с.
14. Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы / А. В. Гуревич, К. П. Зыбин //

- Успехи физических наук. – 2001. – Т. 171. – № 11. – С. 1177 – 1199. – URL : <https://ufn.ru/ru/articles/2001/11/b/>. – DOI : 10.3367/UFN.0171.200111b.1177.
15. Роль космических лучей в образовании молний / В. И. Ермаков, Ю. И. Стожков // Краткие сообщения по физике Физического института им. П. Н. Лебедева Российской Академии Наук. – 2003. – № 9. – С. 43 – 50.
16. Ермаков В. И. Физика грозových облаков / В. И. Ермаков, Ю. И. Стожков. – Москва : Препринт ФИАН, 2004. – 39 с.
17. Thunderstorms and Earth's General Electrification / O. H. Gish, G. R. Wait // Journal of Geophysical Research, 1950. – Vol. 55. – № 4. – P. 473 – 484.
18. Electric field measurements above thunderstorms / C. G. Stergis, G. C. Rein, T. Kangas // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. – 1957. – Vol. 11. – P. 83 – 90.
19. Reiter R. Phenomena in atmospheric and environmental electricity / R. Reiter. – Amsterdam : Elsevier, 1992. – 541 с.
20. Политехнический словарь / главный редактор академик А. Ю. Ишлинский. – 2-е изд. – Москва : Советская энциклопедия, 1980. – 656 с.

Поступила в редакцию 18.02.2021

**Валерий Варламович Хегай**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, т. (495) 851-97-80, e-mail: [hegai@izmiran.ru](mailto:hegai@izmiran.ru). (ИЗМИРАН).

**Александр Витальевич Карелин**, доктор физико-математических наук, начальник отдела, т. (495) 513-54-01, e-mail: [avkarelin@mail.ru](mailto:avkarelin@mail.ru). (АО «ЦНИИМаши»).

## ON THE RELATIONSHIP OF THE INTENSITY OF TROPICAL HURRICANES WITH THUNDERING ACTIVITY. VIEW FROM SPACE

V. V. Khegay, A. V. Karelin

*The possibility of estimating the ionization rate of the atmosphere in tropical hurricanes (TC) using lightning detectors from space is analyzed. It has been established that a joint analysis of the temporal dynamics of thunderstorm activity and the rate of increase in the TC speed for the first few days will make it possible to assess the prospects for TC development using the fundamental equation for the tangential component of the speed of tropical hurricanes and the time sweep of the atmospheric ionization rate. The state of the ocean and the atmosphere (temperature, humidity, saturation with condensation centers) in the areas of occurrence and propagation of TCs can be established using space monitoring by microwave sounding devices and lightning detectors installed on the «Meteor-M», «Meteor-MP», «Electro-M» and «Leader-MES» satellites. Prospects for the emergence and development of TC can be assessed using global space monitoring systems.*

**Key words:** tropical hurricane, lightning detector, thunderstorm activity, condensation centers, ionization rate, relative humidity, ocean temperature, space monitoring.

### References

1. Dynamics of tropical hurricanes and cyclones / A. V. Karelin // Physics of wave phenomena. – 2006. – Vol. 14. – No. 4. – Pp. 44 – 51.
2. Boiarchuk K. A. Basic model of ionized atmosphere kinetics / K. A. Boiarchuk, A. V. Karelin, R. V. Shirokov. – Moscow: FGUE 'NPP VNIIEМ', 2006. – 204 p.
3. Dynamics of tropical hurricanes / A. V. Karelin // Collected proceedings of the VIth Russian Conference on Atmospheric Electricity. – Nizhny Novgorod, 2007. – Pp. 223 – 224.
4. About possibility of space monitoring of tropical hurricane formation processes / A. V. Karelin // Matters of Electromechanics. NPP VNIIEМ Proceedings. – Moscow : FGUE 'NPP VNIIEМ', 2009. – V. 111. – No. 4. – Pp. 43 – 49.
5. About possibility of space monitoring of tropical hurricane formation processes / K. A. Boiarchuk, A. V. Karelin // International Russian-American Scientific Journal 'Actual Problems of Aviation and Aerospace Systems'. – 2010. – V. 15. – No. 1 (30). – Pp. 23 – 32.
6. Mechanism of electricity generation in thunderstorm clouds and tropical hurricanes / A. V. Karelin // Matters of Electromechanics. NPP VNIIEМ Proceedings. – 2010. – V. 118. – No. 5. – Pp. 45 – 49.
7. Lightning Imaging Sensor (LIS) for the International Space Station (ISS): Mission Description and Science Goals / R. J. Blakeslee, H. J. Christian, M. F. Stewart [et al.] // XV International Conference on Atmospheric Electricity : [electronic text]. – Norman, Oklahoma, 2014. – URL : <https://strives-uploads-prod.s3.us-gov-west-1.amazonaws.com/20140011702/20140011702.pdf?AWSAccessKeyId=AKIASEVSKC45ZTTM42XZ&Expires=1598718753&Signature=G2ySVP%2FLI%2BQt46QkeN0uNgCvdAk%3D> (date of access: 29.08.2020).
8. Shuleikin V. V. Calculation of development, motion and decay tropical hurricanes and principal waves induced by hurricanes / V. V. Shuleikin. – Leningrad : Gidrometeoizdat, 1978. – 98 p.

9. Green H. Aerosols - dust, smoke and fog / H. Green, V. Leyn. – Leningrad : Khimiya (Chemistry), 1972. – 214 p.
10. Pulinets S. Ionospheric precursors of earthquakes / S. Pulinets, K. Boyarchuk. – Luxembourg : Springer, 2004. – 318 p.
11. Uman M. Lightning / M. Uman. – Moscow : Mir, 1972. – 327 p.
12. Chalmers J. A. Atmospheric electricity / J. A. Chalmers. – Leningrad : Gidrometeoizdat, 1974. – 420 p.
13. Murzin V. S. Introduction to the physics of cosmic rays / V. S. Murzin. – Moscow : MSU, 1988. – 319 p.
14. Breakdown on escaping electrons and electric discharges during a thunderstorm / A. V. Gurevich, K. P. Zybin // Success of Physical Sciences. – 2001. – V. 171. – No. 11. – Pp. 1177 – 1199. – URL : <https://ufn.ru/ru/articles/2001/11/b/>. – DOI : 10.3367/UFNr.0171.200111b.1177.
15. Role of cosmic rays in lightning formation / V. I. Ermakov, Iu. I. Stozhkov // Bulletin of the Lebedev Physics Institute of the Russian Academy of Sciences. – 2003. – No. 9. – Pp. 43 – 50.
16. Ermakov V. I. Thunderstorm cloud physics / V. I. Ermakov, Iu. I. Stozhkov. – Moscow : Preprint FIAN, 2004. – 39 p.
17. Thunderstorms and Earth's General Electrification / O. H. Gish, G. R. Wait // Journal of Geophysical Research, 1950. – Vol. 55. – No. 4. – Pp. 473 – 484.
18. Electric field measurements above thunderstorms / C. G. Stergis, G. C. Rein, T. Kangas // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. – 1957. – Vol. 11. – Pp. 83 – 90.
19. Reiter R. Phenomena in atmospheric and environmental electricity / R. Reiter. – Amsterdam : Elsevier, 1992. – 541 p.
20. Polytechnic dictionary / chief editor: academician A. Iu. Ishlinskii. – 2nd edition. – Moscow : Soviet encyclopedia, 1980. – 656 p.

**Valerii Varlamovich Khagai**, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Leading Researcher,  
tel.: +7 (495) 851-97-80, e-mail: [hegai@izmiran.ru](mailto:hegai@izmiran.ru).  
(Institute of Terrestrial Magnetism of RAS).

**Aleksandr Vitalevich Karelin**, Doctor of Physics and Mathematics (D. Sc.), Head of Department,  
tel.: +7 (495) 513-54-01, e-mail: [avkarelin@mail.ru](mailto:avkarelin@mail.ru).  
(JC «TSNIIMASH»).