

В.Н. Гридин, А.П. Смахтин

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОВ АКТИВНОГО ПОДАВЛЕНИЯ
ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ НА СТАДИИ ИХ ЗАРОЖДЕНИЯ
И РАЗВИТИЯ**

Разрушительные тропические циклоны по своему негативному воздействию на окружающую среду сравнимы с такими стихийными бедствиями, как землетрясения, извержения вулканов, природные пожары и наводнения. Основные разрушительные тропические циклоны возникают у берегов США, Мексики, Кубы, Японии, Китая, Филиппин и в районах Дальнего Востока Российской Федерации. Ежегодно они приводят к многочисленным человеческим жертвам и многомиллиардным убыткам. Отсутствие, в настоящее время, адекватной физической модели зарождения и развития тропических циклонов не позволяет успешно бороться с этими стихийными бедствиями. В настоящее время на основе мониторинга районов зарождения и развития разрушительных тропических циклонов осуществляется предупреждение населения о возможном стихийном бедствии с целью осуществления своевременной эвакуации людей в безопасные районы. Физическая и математическая модели, представленные в данной статье, позволяют оценить характерное время одного оборота тропического вихря. Сравнение полученных оценочных величин периода вращения тропического циклона на примере циклона Olivia показал неплохое соответствие экспериментально измеренной величине его периода вращения. Этот результат является надежным подтверждением адекватности используемой модели интенсификации тропических циклонов изучаемому природному явлению. Имея в виду ключевую роль, которую играет атмосферное электричество в механизме раскрутки первоначального атмосферного вихря, можно с достаточной степенью уверенности говорить о возможности создания практических методов подавления разрушительных тропических циклонов на стадии их зарождения и развития. Эти методы связаны с использованием различных электроразрядных устройств для подавления тропических циклонов. Создавая, с их помощью, искусственное плазменное образование в облаке зарождения мощного тропического циклона, можно инициировать атмосферный электрический разряд и, тем самым, подавить тропический циклон на начальной стадии его развития. Прототипом предлагаемого электроразрядного устройства может быть выбран один из вариантов, существующих в космической технике, электроракетных двигателей. Например, импульсный плазменный двигатель (ИПД).

Атмосферное электричество; магнитогидродинамическое вращение; Z- и Θ -пинч; искусственный электрический атмосферный разряд.

V.N. Gridin, A.P. Smakhtin

**DEVELOPMENT OF ACTIVE SUPPRESSION METHODS OF HURRICANES
ON STAGE THEIR ORIGIN AND DEVELOPMENT**

The destructive tropical cyclones in its negative impact on the environment is comparable to natural disasters such as earthquakes, volcanic eruptions, wildfires and floods. The main destructive tropical cyclones occur in the United States shores, Mexico, Cuba, Japan, China, the Philippines and the Far East of the Russian Federation. Every year they lead to loss of many lives and billions of US dollars. At present, an absence of an adequate physical model of tropical cyclones does not allow to successfully struggle against these disasters. Nowadays the population is warned about possible disasters for the purpose of timely evacuation to safe areas with the use of areas monitoring of origin and development of destructive tropical cyclones. The physical and mathematical models presented in given paper allow estimating the characteristic time of one turn of a tropical whirlwind. Comparison of the received estimated sizes of the period of rotation of a tropical cyclone on an example of cyclone Olivia has shown quite good conformity to experimentally measured size of its period of rotation. This result is reliable confirming of adequacy using models of the tropical cy-

clones intensification to the studied natural phenomenon. With an eye to a key role, which the atmospheric electricity plays in the mechanism of promotion of an initial atmospheric whirlwind, it is possible with sufficient degree of confidence to speak about a possibility of creation of effective practical methods for suppression of destructive tropical cyclones on their initial stage. One of existing in space technology electro-rocket engines may serve as a prototype of the offered electro-charging arrangement. For example, the pulse plasma thruster (PPT) may be selected.

Atmospheric electricity; magneto-hydrodynamic rotation; Z- and Θ pinch; artificial electrical atmospheric discharge.

Введение. Тропические циклоны, как известно, представляют собой грозное разрушительное природное явление, приводящее ежегодно к многочисленным человеческим жертвам и многомиллиардным убытка в различных странах мира. В основном воздействию тропических циклонов подвержены тропические районы вблизи Флориды (США), Мексиканского залива, стран Юго-Восточной Азии (Япония, Китай, Филиппины, и другие). Что касается территории Российской Федерации, то разрушительные циклоны наблюдаются в районах Дальнего Востока. Иногда подобные явления возникают в районе Чёрного моря и в средней полосе России.

Что касается разрушительных воздушных вихрей, наблюдаемых в прибрежных районах Черного моря, то такие явления периодически наблюдаются в виде мощных смерчей [1]. Принципиальным отличием смерча от тропического циклона является масштаб явления, а именно: диаметр смерча достигает величины 100 м, в то время как диаметр тропического циклона достигает величины 100 км и более.

Постановка задачи. По своим разрушительным действиям тропические циклоны соизмеримы с землетрясениями и извержениями вулканов, хотя физические процессы во всех этих природных явлениях совершенно разные. Создание надежных и эффективных методов подавления разрушительных тропических циклонов является важной задачей защиты людей и инженерных сооружений от воздействия разрушительных атмосферных вихрей. Только понимание физической природы возникновения и развития разрушительных тропических циклонов позволит разработать стратегию успешной борьбы ними, создать на этой основе инженерные устройства для реализации соответствующих методов на практике. Сравнение расчетных и наблюдаемых из космоса параметров тропических циклонов позволяет говорить о ключевой роли атмосферного электричества в природе тропических циклонов. Это обстоятельство создает основу разработки эффективных методов подавления тропических циклонов с помощью искусственно создаваемых электрических разрядов в зоне зарождения и развития разрушительных атмосферных вихрей.

Анализ физических процессов, вызывающих интенсификацию тропических вихрей. Существующие в настоящее время модели развития тропических циклонов, в основном, ориентированы на газодинамические процессы, протекающие в атмосфере Земли над поверхностью океана в тропической зоне, совершенно не принимая во внимание влияние атмосферного электричества на эти процессы [2, 3]. В работе [3] тропический циклон рассматривается как модель природного теплового двигателя, работающего по термодинамическому циклу Карно. В тех же немногочисленных работах, где атмосферное электричество участвует в предлагаемых моделях, не учитывается, как правило, электромагнитные взаимодействия атмосферных токов с собственным магнитным полем. В работе [4] Vonnegut В. учитывал атмосферное электричество лишь как источник дополнительного теплового воздействия на атмосферу в виде джоулева разогрева воздуха за счет атмосферных токов. Это не вполне корректно, так как в природе, как правило, реализуются наиболее эффективные процессы с минимальной затратой энергии. Что касается джоулева разогрева и дальнейшего теплового воздействия на динамику

атмосферного вихря, то такое взаимодействие, как известно из плазмодинамики, существенно менее эффективно по энергозатратам в сравнении с магнитогидродинамическими процессами.

Впервые магнитогидродинамическая модель динамики тропических циклонов была предложена Е.Ю. Красильниковым в работе [5, 6]. В дальнейшем, эти исследования были продолжены в Центре информационных технологий в проектировании (ЦИТП) РАН по программе Президиума РАН «Оценка различных факторов в динамике экстремальных природных явлений и их негативных последствий» [7]. В какой-то степени подобный подход к изучению природы тропических циклонов изложен в работе [8], однако в ней выдвигается идея взаимодействия электрических токов атмосферного вихря с магнитным полем Земли, в то время как в [5] рассматриваются процессы взаимодействия атмосферных токов с собственным магнитным полем.

В работе [5] основные выводы из анализа структуры предгрозовых облаков, предшествующих образованию тропических циклонов, сводятся к следующим положениям:

1. Ключевым явлением, ответственным за удержание крупных облачных образований в предгрозовой стадии в атмосфере Земли, является наличие относительно сильного электрического поля, воздействующего на электрические заряды, образовавшиеся в предгрозовых облаках на высотах порядка 5...7 км и способного удержать облака, содержащие многотонные массы водяного пара.
2. Первоначальный крупномасштабный атмосферный вихрь в тропической зоне порождается явлением, хорошо известным в механике жидкости и газа как дорожка Кармана [9].
3. Основным механизмом увеличения окружной скорости вращения воздушного вихря, то есть интенсификации вращения первоначального воздушного вихря с переходом его в стадию разрушительного тропического циклона, является магнитогидродинамическая раскрутка.

На основе этих положений в работе [5] приведены результаты анализа динамики тропического циклона с использованием изображений районов зарождения и интенсификации тропических циклонов, полученных в ходе мониторинга земной поверхности с помощью искусственных спутников Земли. За последнее время опубликованы фундаментальные монографии, посвященные вопросам мониторинга земной поверхности и, в частности, районов зарождения и интенсификации тропических циклонов, на основе изучения которых появилась возможность более глубокого анализа природы тропических циклонов [10, 11].

В настоящей статье на основе основных положений работы [5] продолжены исследования с целью развития магнитогидродинамической модели процессов интенсификации тропических циклонов и создания на этой основе адекватной математической модели.

Известно, что развитие тропических циклонов всегда сопровождается интенсивными грозами и что внутри, так называемого, «хобота» визуально наблюдаются многочисленные вспышки электрических разрядов.

Разрушительные тропические циклоны, как показывают результаты многолетних наблюдений, в основном сосредоточены в районах, наиболее активно подверженных воздействию сильных гроз. До 78 % гроз, наблюдаемых в течение года, приходится на тропическую и субтропическую зону Земли (от 30° северной широты до 30° южной широты). Это обстоятельство является одним из важнейших факторов, подтверждающих ключевую роль электромагнитных явлений в процессах динамики тропических циклонов.

Об электрической природе тропических циклонов свидетельствует тот факт, что спутниковый мониторинг тропических циклонов показывает возникающий низкочастотные электромагнитные колебания, а также потоки заряженных частиц, выпадающих из радиационных поясов Земли в ионосферу в области тропических циклонов [12]. Кроме того, электрическая активность тропических циклонов характерна для начального усиления циклона на стадии тропического шторма [10]. В работе [11] отмечены явления образования центра электрической активности, видимого в смерчевом облаке в виде округленного пятна светло-голубого цвета, которое появляется за 30...90 минут до образования смерча. Кроме того, существуют многочисленные свидетельства очевидцев о том, что смерчи, зачастую, сопровождаются светящимися колоннами, огненными шарами, молниями в воронке и другими световыми явлениями, природа которых несомненно связана с атмосферным электричеством.



Рис. 1. Фотография мощного тропического циклона (смерча) вблизи поверхности Земли

Электрические разряды имеют место в основном во время интенсивного углубления циклона и локализованы в спиральных полосах и облачной стене. Число разрядов облако – земля весьма изменчиво и колеблется в пределах от единиц до семи сотен в час [15]. Возникновение тропических циклонов возникает, как правило, из так называемых суперячейковых облаков, как правило в форме наковальни, отличительной особенностью которых является наличие вращающихся восходящих воздушных потоков, называемых мезоциклонами.

Анализ изображений, сделанных с борта искусственных спутников Земли в районах зарождения тропических циклонов, и статистические данные мониторинга этих районов из космоса позволяет сделать вывод о том, что первоначальное крупномасштабное завихрение образуется как элемент так называемой дорожки Кармана, возникающей при обтекании воздушными массами цепочек островов, лежащих в Мировом океане.

Образование первоначального крупномасштабного атмосферного вихря в районе островов Зеленого Мыса сопровождается возникновением градиента атмосферного давления, причем в центре вихря давление ниже, чем на периферии. Возникающая газодинамическая сила направлена к центру вращения вихря и представляет собой центробежную силу.

Анализ структуры предгрозовых облаков и распределения электрических зарядов в них и на поверхности Земли показывает, что в атмосфере Земли существуют достаточно сильные вертикальные электрические поля, которые, с одной стороны, удерживают огромные массы воды в атмосфере, а, с другой, создают условия для интенсификации атмосферных вихрей на стадии перехода в тропические циклоны.

Известно, что в предгрозовых облаках электрические заряды, питающие молнии, равны 10...100 Кл, напряженность электрического поля внутри облака равна $E = (1...3) \cdot 10^5$ В/м, а эффективная электропроводность в облаке почти на два порядка выше, чем в окружающей атмосфере. Учитывая, что величина плотности электрического тока над поверхностью Мирового океана в хорошую погоду практически постоянна и оценивается величиной порядка 10^{-2} А/м², то в предгрозовых облаках плотность электрического тока может достигать величины порядка 1 А/м². Взаимодействие вертикальных атмосферных токов приводит к возникновению силы Ампера, направленной к центру вращения атмосферного вихря и стремящейся сжать атмосферу. Подобное явление известно в физике газового разряда как Z-пинч. В результате, во вращающемся предгрозовом облаке происходит увеличение центростремительной силы и, следовательно, рост скорости вращения атмосферных вихрей. Оценки свидетельствуют, что величина силы Ампера в предгрозовых облаках сравнима с силами газодинамического давления, обеспечивающими первоначальную закрутку облака как следствие эффекта Кармана. Таким образом, магнитогидродинамические процессы, протекающие во вращающихся предгрозовых облаках, приводят к раскрутке атмосферного вихря с переходом в стадию разрушительного тропического вихря, то есть к увеличению скорости вращения воздуха вблизи «глаза» циклона до значений порядка 150 км/час и выше. При этом, как известно, внутри «глаза» скорость воздуха практически нулевая и стоит идеальная погода.

Можно предположить, что существование эффекта Z-пинча обусловлено протеканием, так называемого, тихого тлеющего разряда в предгрозовых облаках в течение характерного времени интенсификации первоначального атмосферного вихря до стадии разрушительного тропического циклона, т.е. в течение 4...5 суток. Известно, что тихие тлеющие разряды характерны для высоких слоев атмосферы 30...40 км, где под воздействием солнечного излучения возникает электропроводность атмосферы, достаточная для создания тлеющего разряда. Как известно, именно в этих разрядах в атмосфере Земли создается озоновый слой.

При сжатии вихря происходит увеличение размеров капель, несущих на себе электрические заряды предгрозовых облаков, и нарушаются условия удержания этой массы водяных капель на высотах 5...7 км силами электрического поля. Как результат, возникают сильнейшие ливни. Многочисленные наблюдения свидетельствуют, что разрушительные тропические циклоны сопровождаются, как правило, сильными ливнями и грозами.

Согласно магнитогидродинамической модели, изложенной в работах [5–7], основной вклад в процессы увеличения скорости вращения воздушного вихря до скоростей порядка 100 км/с и выше вносят Θ-пинч и Z-пинч эффекты, а именно: в результате взаимодействия атмосферных токов с собственным магнитным полем возникает эффект стягивания первоначального воздушного и, как результат, увеличение окружной скорости воздушных масс в силу закона сохранения момента количества движения, так как магнитное поле не совершает работы и не изменяет энергию воздушного вихря. О наличии сильных вертикальных электрических полях свидетельствуют экспериментальные данные, опубликованные в [18].

Первые работы по исследованию Z-пинча связаны с идеей по осуществлению реакции управляемого термоядерного синтеза [19]. В результате при разрядных токах порядка ($10^2...10^3$) кА в течение микросекунд, т.е. в результате осуществления быстрого Z-пинча, были получены первые нейтроны из плазмы.

Учитывая, что масштаб первоначального воздушного вихря в диаметре порядка сотен километров, эффекты взаимодействия относительно небольших атмосферных токов (порядка от десятых долей А/м² в хорошую погоду над поверхностью океана до (1...10) А/м² в случае грозы над поверхностью океана) с собственными магнитными полями может быть весьма заметным, особенно в грозовых облаках.

Необходимо отметить, что были зафиксированы пыльные бури на поверхности Марса, сопровождаемые сильными грозами [20]. Авторы этих исследований предполагали, что при этом напряженность электрического поля E имела величину порядка 500 кВ/м при концентрации электронов $n_e = 10^6 \text{ см}^{-3}$. Кроме того, можно предположить, что такие наблюдаемые природные явления как Большое Красное пятно на Юпитере и Большое Тёмное пятно на Нептуне, вполне могут быть объяснены с помощью магнитогидродинамической модели вихревых процессов в атмосфере Юпитера и Нептуна. Эта гипотеза опирается на универсальный характер природных процессов в космосе.

Магнитогидродинамическая модель интенсификации тропических циклонов. Для экспериментальной проверки гипотезы о магнитогидродинамической природе динамики тропических циклонов необходимо провести физический модельный эксперимент по взаимодействию токов, протекающих по модельному рабочему телу, с собственным магнитным полем, то есть смоделировать Z-пинч и Θ -пинч. Как известно, Z-пинч возникает при взаимодействии вертикальных электрических токов с азимутальным собственным магнитным полем, в то время как Θ -пинч возникает при взаимодействии азимутальных электрических токов с осевым собственным магнитным полем. В результате Z-пинч и Θ -пинч происходит самосжатие плазменного образования. Основная проблема постановки такого модельного эксперимента заключается в том, что размеры натурального воздушного вихря тропического циклона порядка сотен километров в диаметре при относительно небольших величинах плотности электрических токов. Однако, благодаря большим размерам вихря величина собственного магнитного поля на периферии вихря порядка 0,3 Тл. Предполагается провести эксперименты на моделях значительно меньших по диаметру, что требует создания относительно больших плотностей токов для получения требуемых магнитных полей. Все это ведет при создании модели тропического циклона, интенсифицируемого магнитодинамическими силами, к необходимости применения теории подобия на основе использования безразмерных критериев подобия. При этом необходимо учесть подобие удельной массы модельного рабочего тела, его электрической проводимости и подобие приложенного электрического поля при существенном уменьшении физической модели в сравнении с натурными размерами тропического циклона.

В основе такого моделирования лежит математическая модель динамики тропического циклона. В качестве исходных уравнений используем:

1. Закон сохранения энергии (кинетической) $W_{\text{кин}}$ вращения воздушного вихря в силу того, что магнитное поле работы не совершает:

$$W_{\text{кин}} = J\omega^2/2 = \text{const}, \quad (1)$$

где J – момент инерции; ω – угловая частота вращения.

2. Момент инерции полого цилиндра относительно оси вращения равен:

$$J = M(R_1^2 + R_2^2)/2, \quad (2)$$

где M – масса воздушного вихря; R_1 – внешний радиус цилиндра; R_2 – внутренний радиус цилиндра.

Учитывая, что в процессе вращения воздушного вихря происходит сжатие вихря из-за пинча, вследствие чего возникает увеличение линейной скорости вращения вихря. Другими словами, уменьшение радиусов R_1 и R_2 сопровождается увеличением окружной скорости вращения воздушного вихря.

Динамика развития тропического циклона определяется следующим алгоритмом:

1. Объемная плотность силы Ампера F_A , направленная по радиусу от периферии вихря к центру вращения, определяется:

$$F_A = j_z \cdot B_\phi, \quad (3)$$

где j_z – плотность вертикальных электрических токов в предгрозовом облаке; B_ϕ – индукция азимутального собственного магнитного поля.

Сила Ампера F_A является центростремительной силой, равной

$$F_A(r) = M \cdot \omega^2 \cdot r, \quad (4)$$

где r – текущий радиус воздушного вихря.

Изменение азимутально магнитного поля по радиусу воздушного вихря определяется уравнением:

$$B_\phi(r) = \mu_0 \cdot j_z \cdot r/2 = 6,28 \cdot 10^{-7} \cdot j_z \cdot r. \quad (5)$$

Для проверки адекватности представленной выше математической модели реальным динамическим процессам тропических циклонов проведем оценку основных параметров циклона Olivia, возникшего 24 сентября 1994 г. на западе южной Калифорнии. Достаточно полные данные по структуре и параметрам этого циклона опубликованы в [16]. Измерения проводились с борта самолета с помощью радара с длиной волны излучения 5,5 см и 3,2 см. В частности, период вращения Olivia равен 3,5 часа.

Диаметр тропического циклоны был равен 60 км. При предполагаемой величине плотности вертикальных электрических токов $j_z = 0,265 \text{ А/м}^2$ в суперячейковых облаках индукция азимутального магнитного поля вокруг облака меняется от 0 в центре вращающегося облака до величины порядка $B_\phi = 0,003 \text{ Тл}$ на периферии облака диаметром 60 км. При этом плотность силы Ампера на периферии облака будет порядка $F_A = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$, причём величина этой силы линейно снижается до 0 в центре вращения облака. При этом расчетная длительность периода вращения циклоны 5,2 часа.

Заключение. Полученное значение периода вращения тропического циклоны по порядку величины соответствует экспериментально наблюдаемым значениям этого параметра по результатам мониторинга тропических циклонов из космоса. Этот факт является, на наш взгляд, объективным подтверждением адекватности предложенной магнитогидродинамической модели наблюдаемым процессам развития тропических циклонов, подтверждая, тем самым, ключевую роль атмосферного электричества в динамике тропических циклонов.

Несмотря на ряд работ, опубликованных ранее по электрической природе тропических циклонов, ни в одной из них не были рассмотрены вопросы взаимодействия атмосферных токов с собственным магнитным полем предгрозовых облаков, которое приводит к Z-пинчу и θ -пинчу, то есть к сжатию электропроводящих участков облаков и, тем самым, к увеличению линейной скорости вращения атмосферных вихрей. Отмеченное отличие является принципиальным, так как позволит в дальнейшем разработать эффективные инженерные методы подавления зарождающихся тропических циклонов. За счет применения различных электро-разрядных устройств, например типа современных импульсных плазменных двигателей (ИПД), можно будет значительно повысить электропроводность первоначальных атмосферных вихрей, вызвать достаточно быстрое снятие электрического напряжения предгрозовых облаков и, тем самым, нарушить механизм интенсификации вращения вихрей, вызвав проливные дожди в районе раскрутки тропического циклоны на начальной стадии его развития.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Аджиев А.Х., Купович Г.В.* Атмосферно-электрические явления на Северном Кавказе. – Таганрог, 2004. – 122 с.
2. *Минина Л.С.* Практика нефанализа. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 336 с.
3. *Kerry A. Emanuel.* The Theory of Hurricanes // Annu. Rev. Fluid Mech. – 1991. – Vol. 23. – P. 179-191.

4. *Vonnegut B.* Electrical Theory of Tornadoes // *Journal of Geophysical Research.* – 1960. – Vol. 65, No. 1. – P. 203-212.
5. *Krasilnikov E.* Electromagnetohydrodynamic Nature of Tropical Cyclones, Hurricanes, and Tornadoes // *Journal of Geophysical Research.* – 1997. – Vol. 102, No. D12. – P. 13,571-13,580.
6. *Krasilnikov E.Yu.* Electromagnetohydrodynamic Intensification Mechanism of Tropical and Extratropical Cyclones, Hurricanes and Tornadoes and Method of their Prevention // 7th PAMIR International Conference on Fundamental and Applied MHD, Presqu'île de Giens - France, September 8-12, 2008.
7. *Gridin V., Krasilnikov E.* Suppression of powerful clouds and prevention of destructive tropical and extra-tropical cyclones, severe thunderstorms, tornadoes, and catastrophic floods // The International Emergency Management Society, 9-th Annual Conference Proceedings. – Canada, 2002. – P. 354-366.
8. *Боев А.Г.* О вращении тропического циклона // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения. – 2010. – № 4. – С. 193-198.
9. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
10. *Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П.* Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. – М.: Научный мир, 2009. – 692 с.
11. *Бондур В.Г., Крапивин В.Ф.* Космический мониторинг тропических циклонов. – М.: Научный мир, 2009. – 506 с.
12. *Ерохин Н.С., Зольникова Н.Н., Михайловская Л.А.* К теории электромагнитных индикаторов тропических циклонов. – М.: Институт космических исследований РАН, 1996. – 28 с.
13. *Голыцын Г.Г.* Ураганы, полярные и тропические, их энергия и размеры, количественный критерий возникновения // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 44, № 5. – С. 579-590.
14. *Бояревич В.В., Фрейберг Я.Ж., Шилова Е.И., Щербинин Э.В.* Электровихревые течения. – Рига: Зинатне, 1985. – 315 с.
15. *Black P.G., Black R.A.* Electrical Activity of the Hurricane // Preprints. 23rd Conf. on Radar Meteorol. And Conf. on Cloud Physics, American Meteorology Society, Snowmass, CO, Boston, Mass., 1986. – 57 p.
16. *Берюлев Г.П., Волков В.В., Литинецкий А.В. и др.* Метеорологические аспекты исследовательских полетов в ураганах // Метеорология и гидрология. – 1991. – № 6. – С. 5-13.
17. *Наливкин Д.В.* Ураганы, бури и смерчи. – Л.: Наука, 1969. – 487 с.
18. *Black R.A., Hallett J.* Electrification of the Hurricane // *Journal of the Atmospheric Sciences.* – June 15, 1999. – Vol. 56. – P. 2004-2028.
19. *Вихрев В.В., Брагинский С.И.* Динамика Z-пинча. Вопросы теории плазмы. Вып. 10. – М.: Атомиздат, 1980. – 320 с.
20. *Farrell W.M., Kaiser M.L., Desch M.D. et al.* Detecting electrical activity from Martian dust storms // *Journal of Geophysical Research.* – 1999. – Vol. 104, No. 2. – P. 3795-3801.
21. *Reasor P.D. et al.* Low-Wavenumber Structure and Evolution of the Hurricane Inner Core Observed by Airborne Dual-Doppler Radar // *Monthly Weather Review.* – June 2000. – Vol. 128. – P. 1653-1680.

REFERENCES

1. *Adzhiev A.Kh., Kupovich G.V.* Atmosferno-elektricheskie yavleniya na Severnom Kavkaze [Atmospheric-electric phenomena in the North Caucasus]. Taganrog, 2004, 122 p.
2. *Minina L.S.* Praktika nefanaliza [The practice of nephanalysis]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970, 336 p.
3. *Kerry A. Emanuel.* The Theory of Hurricanes, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 1991, Vol. 23, pp. 179-191.
4. *Vonnegut B.* Electrical Theory of Tornadoes, *Journal of Geophysical Research*, 1960, Vol. 65, No. 1, pp. 203-212.
5. *Krasilnikov E.* Electromagnetohydrodynamic Nature of Tropical Cyclones, Hurricanes, and Tornadoes, *Journal of Geophysical Research*, 1997, Vol. 102, No. D12, pp. 13,571-13,580.
6. *Krasilnikov E.Yu.* Electromagnetohydrodynamic Intensification Mechanism of Tropical and Extratropical Cyclones, Hurricanes and Tornadoes and Method of their Prevention, 7th PAMIR International Conference on Fundamental and Applied MHD, Presqu'île de Giens - France, September 8-12, 2008.

7. Gridin V., Krasilnikov E. Suppression of powerful clouds and prevention of destructive tropical and extra-tropical cyclones, severe thunderstorms, tornadoes, and catastrophic floods, *The International Emergency Management Society, 9-th Annual Conference Proceedings*. Canada, 2002, pp. 354-366.
8. Boev A.G. O vrashchenii tropicheskogo tsyklona [On the rotation of a tropical cyclon], *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Plazmennaya elektronika i novye metody uskoreniya* [Problems of atomic science and technology. Series: Plasma electronics and new acceleration methods], 2010, No. 4, pp. 193-198.
9. Shlikhting G. Teoriya pogranichnogo sloya [The theory of the boundary layer]. Moscow: Nauka, 1974, 712 p.
10. Bondur V.G., Krapivin V.F., Savinykh V.P. Monitoring i prognozirovanie prirodnykh katastrof [Monitoring and forecasting of natural disasters]. Moscow: Nauchnyy mir, 2009, 692 p.
11. Bondur V.G., Krapivin V.F. Kosmicheskii monitoring tropicheskikh tsiklonov [Satellite monitoring of tropical cyclones]. Moscow: Nauchnyy mir, 2009, 506 p.
12. Erokhin N.S., Zol'nikova N.N., Mikhaylovskaya L.A. K teorii elektromagnitnykh indikatorov tropicheskikh tsiklonov [On the theory of electromagnetic indicators of tropical cyclones]. Moscow: Institut kosmicheskikh issledovaniy RAN, 1996, 28 p.
13. Golitsyn G.G. Uragany, polyarnye i tropicheskie, ikh energiya i razmery, kolichestvennyy kriteriy vozniknoveniya [Hurricanes, polar and tropical, their energy and size, a quantitative criterion for the occurrence of], *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics], 2008, Vol. 44, No. 5, pp. 579-590.
14. Boyarevich V.V., Freyberg Ya.Zh., Shilova E.I., Shcherbinin E.V. Elektrovikhrevye techeniya [See currents.]. Riga: Zinatne, 1985, 315 p.
15. Black P.G., Black R.A. Electrical Activity of the Hurricane, *Preprints. 23rd Conf. on Radar Meteorol. And Conf. on Cloud Physics, American Meteorology Society, Snowmass, CO, Boston, Mass., 1986*, 57 p.
16. Beryulev G.P., Volkov V.V., Litinetskiy A.V. i dr. Meteorologicheskie aspekty issledovatel'skikh poletov v uraganakh [Meteorological aspects of research flights in hurricanes], *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 1991, No. 6, pp. 5-13.
17. Nalivkin D.V. Uragany, buri i smerchi [Hurricanes, storms and tornadoes]. Leningrad: Nauka, 1969, 487 p.
18. Black R.A., Hallett J. Electrification of the Hurricane, *Journal of the Atmospheric Sciences*, June 15, 1999, Vol. 56, pp. 2004-2028.
19. Vikhrev V.V., Braginskiy S.I. Dinamika Z-pincha. Voprosy teorii plazmy [Dynamics of Z-pinch. The questions of plasma theory]. Issue 10. Moscow: Atomizdat, 1980, 320 p.
20. Farrell W.M., Kaiser M.L., Desch M.D. et.al. Detecting electrical activity from Martian dust storms, *Journal of Geophysical Research*, 1999, Vol. 104, No. 2, pp. 3795-3801.
21. Reasor P.D. et. al. Low-Wavenumber Structure and Evolution of the Hurricane Inner Core Observed by Airborne Dual-Doppler Radar, *Monthly Weather Review*, June 2000, Vol. 128, pp. 1653-1680.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.М. Курейчик.

Гридин Владимир Николаевич – Центр информационных технологий в проектировании РАН; e-mail: info@ditc.ras.ru; Одинцово, Московская область, ул. Маршала Бирюзова, 7а; тел.: 84955960219; д.т.н.; профессор; научный руководитель.

Смахтин Андрей Петрович – старший научный сотрудник.

Gridin Vladimir Nikolaevich – Design Information Technology Centre of Russian Academy of Sciences; e-mail: info@ditc.ras.ru; 7a, Marshala Biryuzova street, Odintsovo city, Moscow Region, Russia; phone: +74955960219; dr. of eng. sc.; professor; scientific director.

Smakhtin Andrey Petrovich – senior researcher.