

## МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ КОНДЕНСАЦИИ В АТМОСФЕРЕ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ

В. В. Хегай, А. В. Карелин

*Представлено описание молекулярно-кинетической теории конденсации в атмосфере и показаны некоторые возможные области ее применения. Наиболее эффективно процесс конденсации во влажной приземной атмосфере идет по следующему механизму: вследствие высокой концентрации паров воды образование капель сначала идет в результате ассоциации нейтральных молекул, затем к ним со скоростью поляризационного захвата присоединяются ионные кластеры, образовавшиеся в результате плазмохимических реакций, развивающихся под воздействием внешнего ионизирующего излучения (солнечные космические лучи, галактические космические лучи, радон-222, гроззовые разряды). Это, в свою очередь, приводит к затруднению отрыва молекул воды от заряженных капель из-за более высокой энергии связи и ускорения их удалению из объема под воздействием атмосферного электрического поля. Показано, что перспективы возникновения мощных землетрясений и динамики развития тропических ураганов, циклонов и тайфунов можно оценить с использованием систем глобального космического мониторинга.*

***Ключевые слова:** молекулярно-кинетическая теория, конденсация, нейтральные кластеры, ионные кластеры, центры конденсации, ассоциация, конверсия, плазмохимические реакции, химический потенциал, землетрясения, тропический ураган, гроззовая активность, скорость ионизации, относительная влажность, температура океана, космический мониторинг.*

Многие физические эффекты в природе, в том числе и в атмосфере, связаны с конденсацией. Поэтому ее исследованию посвящено значительное количество работ [1 – 10]. При этом во всех работах для качественного и количественного описания процесса конденсации необходимым способом авторы привлекают такие физические величины, как коэффициенты пересыщения среды (отношение парциального давления паров воды к давлению насыщенных паров, всегда больше единицы) и аккомодации молекул воды к центрам конденсации (эффективность прилипания, всегда меньше единицы). Однако в атмосфере при наличии конденсации не всегда имеет место пересыщение, а коэффициенты аккомодации, по мнению авторов, могут быть получены только из экспериментов для каждого конкретного случая процесса конденсации. Выход из этого положения, по нашему мнению, можно найти, если перейти на молекулярно-кинетический уровень описания данного процесса. Изложению молекулярно-кинетической теории конденсации (МКТК) в воздухе и ее применениям посвящена настоящая работа.

В ряде наблюдений перед землетрясением было обнаружено резкое падение влажности [11]. Попробуем описать существенные изменения влажности в приземном слое с позиции МКТК.

В основу МКТК заложено понимание того, что наиболее эффективно процесс конденсации во влажной приземной атмосфере идет по следующему механизму: вследствие высокой концентрации паров воды образование капель сначала идет в результате ассоциации нейтральных молекул, затем к ним со скоростью поляризационного захвата присоединяются ионные кластеры, образовавшиеся в результате плазмохимических реакций, развивающихся под воздействием внешнего ионизирующего излучения (солнечные

и галактические космические лучи (СКЛ и ГКЛ), радон-222, гроззовые разряды). Это, в свою очередь, приводит к затруднению отрыва молекул воды от заряженных капель из-за более высокой энергии связи и ускорения их удаления из объема под воздействием атмосферного электрического поля.

В гомогенной конденсации выделяют два этапа [8]. На первом из них происходит образование ядер конденсации (кластеров), а на втором – рост капель и их удаление из объема, а также уменьшение концентрации молекул воды вплоть до установления фазового равновесия. Первый этап конденсации требует отдельного рассмотрения.

Согласно существующим представлениям [9] ядрами конденсации в атмосфере являются морская соль (20%), продукты сгорания (40%), частицы почвы (20%), ядра неизвестной природы (20%). Поэтому этап роста ядер конденсации следует проводить на основе молекулярной кинетики с участием гетерофазных реакций.

Детально МКТК удобно рассмотреть на примере результатов измерения влажности перед землетрясением в Мексике [11]. Зависимость концентрации насыщенных паров воды от температуры воздуха  $T_g$  может быть грубо описана с помощью строго получаемой в термодинамике из уравнения Клаузиуса – Клапейрона [12] формулой:

$$n = \frac{A}{T_g} \exp\left(-\frac{U}{k_B T_g}\right), \quad (1)$$

которая согласуется с кинетической формулой Аррениуса для констант скоростей химических реакций. Здесь  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $U$  – скрытая теплота испарения в пересчете на одну молекулу;  $A$  – постоянная.

Скрытую теплоту испарения на одну молекулу воды (химический потенциал, работу выхода) можно оценить исходя из теплоты кипения  $Q = 40,683$  кДж/моль при температуре кипения  $U_0 = Q/N_A = 0,422$  эВ, где  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ /моль. Эта работа выхода молекулы воды равна энергии диполь-дипольного взаимодействия вращающихся диполей на расстоянии  $r = 2,46$  Å (равном примерно радиусу молекулы воды), рассчитанной по формуле [13]:

$$U = \frac{2\mu_{H_2O}^4}{3k_B T_g r^6}, \quad (2)$$

где  $\mu_{H_2O} = 1,85 \cdot 10^{-18}$  СГС·см – дипольный момент молекулы воды.

Присутствие внешних воздействий в усредненной по объему квазиоднокомпонентной системе будет сказываться в качестве временных вариаций химического потенциала в формуле расчета влажности атмосферного воздуха с учетом (2) и (1):

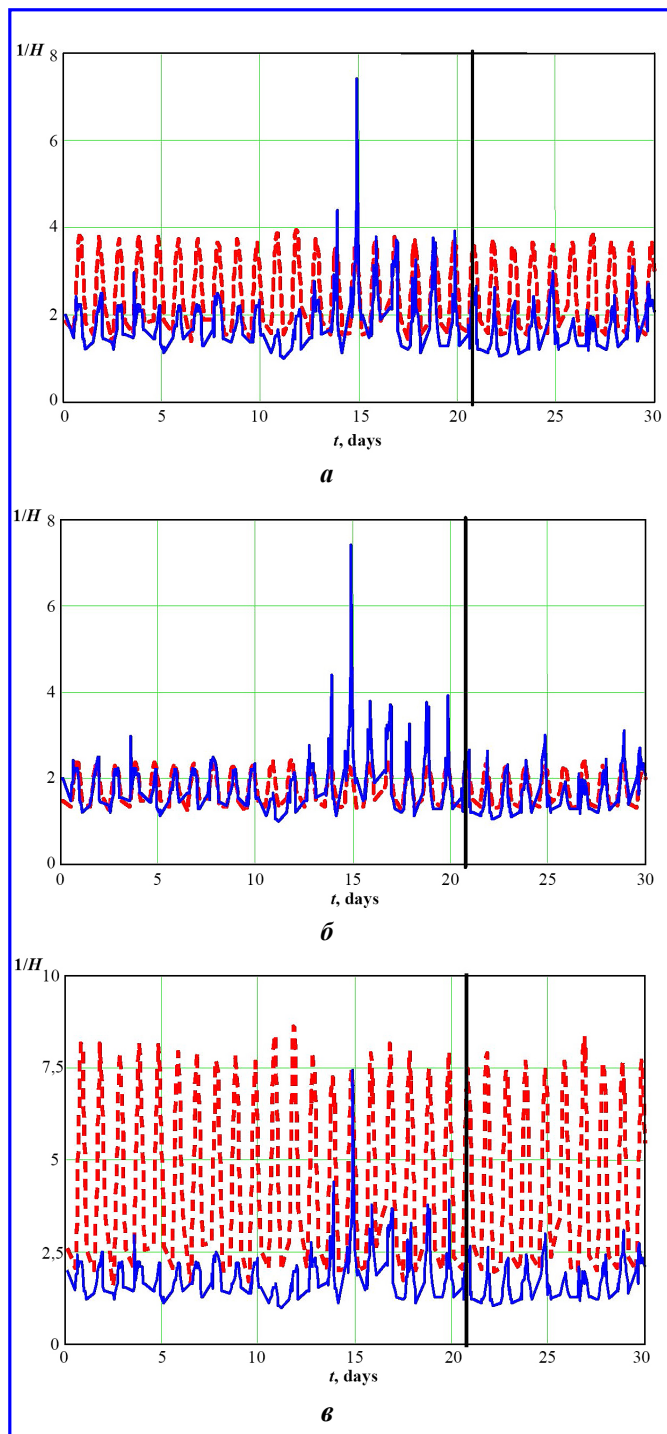
$$H(t) = \frac{\exp\left(-\frac{U(t)}{k_B T_g}\right)}{\exp\left(-\frac{U_0}{k_B T_g}\right)} = \exp\left(\frac{U_0 - U(t)}{k_B T_g}\right) = \exp\left(-\frac{0,032\Delta U \cos^2 t}{(k_B T_g)^2}\right), \quad (3)$$

где  $U(t) = U_0 + \Delta U \cdot \cos^2 t$ ;  $\Delta U$  – поправка химического потенциала в результате внешнего воздействия или наличия посторонних примесей в воздухе. Суточные колебания солнечного излучения учитывались в виде квадрата косинуса. Здесь учтено также, что  $U_0$  рассчитывалась при температуре кипения.

Сравнение результатов расчетов по формуле (3) при  $\Delta U = 0,019, 0,022$  и  $0,03$  эВ с результатами наблюдений перед землетрясением в Колиме (Мексика) 21 января 2003 г. приведено на рис. 1. Видно, что в некоторые дни перед землетрясением поправка к усредненному химическому потенциалу квазиоднокомпонентной системы заметно возрастает. Это может быть обусловлено появлением большего количества заряженных центров конденсации, в которых работа выхода молекул воды определяется взаимодействием заряженного кластера с вращающимся диполем [13]:

$$U_{cd} = \frac{q^2 \mu_{H_2O}^2}{3k_B T_g r^4}, \quad (4)$$

где  $q$  – заряд кластера. При этом энергия заряд-дипольного взаимодействия на расстояниях порядка диаметра молекулы воды  $r_{cd} = 4,7$  Å при температуре кипения составляет  $U_{cd} = 0,654$  эВ.



**Рис. 1.** Временные развертки суточных вариаций обратного значения относительной влажности атмосферного воздуха при различных поправках химического потенциала  $\Delta U = 0,019$  (а),  $0,022$  (б) и  $0,03$  (в) эВ. Сплошные кривые – наблюдения; пунктирные – расчет по формуле (3); вертикальная прямая – дата землетрясения

Детальные расчеты концентрации паров воды в атмосфере проводились с использованием по-

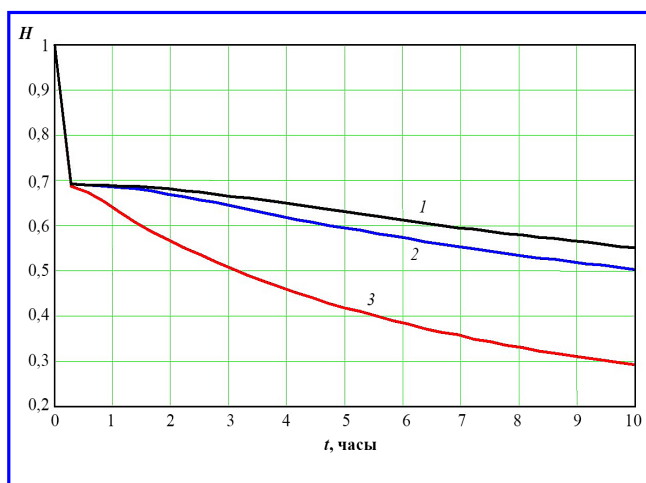
дробной нестационарной кинетической модели влажного атмосферного воздуха [14]. Результаты расчетов влажности атмосферного воздуха в зависимости от длительности и мощности воздействия ионизирующего излучения приведены на рис. 2. Начальная концентрация паров воды полагалась равной стопроцентной влажности для заданной температуры воздуха. Видно, что рост длительности воздействия и скорости ионизации  $f$  приводят к падению относительной влажности. Что, в свою очередь, может приводить к росту концентрации нейтральных кластеров.

Таким образом, величина и динамика поведения поправки химического потенциала паров воды во времени и в атмосфере является показателем наличия заряженных центров конденсации. Абсолютная величина поправки к усредненному химическому потенциалу атмосферы, измеряемая в электронвольтах, может оцениваться по формуле:

$$\Delta U = 5,8 \cdot 10^{-10} (20T_g + 5463)^2 \ln\left(\frac{100}{H}\right), \quad (5)$$

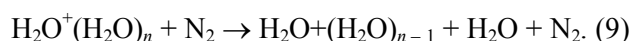
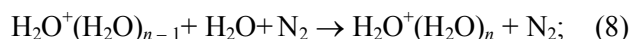
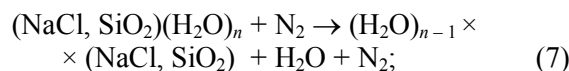
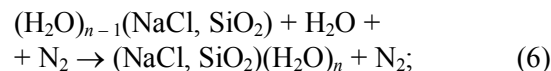
где  $T_g$  – температура воздуха, измеряемая в градусах Цельсия, а  $H$  – относительная влажность, измеряемая в процентах.

Иллюстрации и статистический анализ поведения поправки к химическому потенциалу перед землетрясениями в различных районах земного шара можно увидеть в работах [15 – 17].



**Рис. 2.** Зависимости относительной влажности атмосферного воздуха от длительности внешнего воздействия при различных скоростях ионизации 1 –  $f = 4,5 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ; 2 –  $f = 9 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  и 3 –  $f = 90 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ . Температура воздуха  $T = 27^\circ\text{C}$ , начальная концентрация паров воды  $[\text{H}_2\text{O}] = 7,7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$

Наглядный аналитический анализ МКТК можно провести на основании того, что нейтральные и заряженные капли в атмосфере над землей или морем образуются и разваливаются преимущественно в реакциях:



Рост капли в первом приближении может быть описан следующим уравнением:

$$\frac{dr_k}{dt} = \frac{(k_{as} + k_{con})[\text{H}_2\text{O}][\text{N}_2] - (k_{dis} + k_{dt})[\text{N}_2]}{4\pi r_k^2}, \quad (10)$$

где  $r_k$  – радиус капли;  $k_{as}$  – константа скорости реакции ассоциации (6),  $k_{con}$  – константа скорости реакции конверсии (8), которые можно оценить как [18]:

$$k_{as} = \frac{4\pi^2}{3} \left( \frac{\beta_{\text{N}_2} \mu_{\text{H}_2\text{O}}^2}{k_B T_g} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu_{\text{H}_2\text{O}}^2}{k_B T_g} \right) \left( \frac{2k_B T_g}{M} \right)^{\frac{1}{2}};$$

$$k_{con} = \frac{4\pi^2}{3} \left( \frac{q\mu_{\text{H}_2\text{O}}}{k_B T_g} \right)^{0,75} \left( \frac{q^2 \beta_{\text{N}_2}}{M} \right)^{0,5}.$$

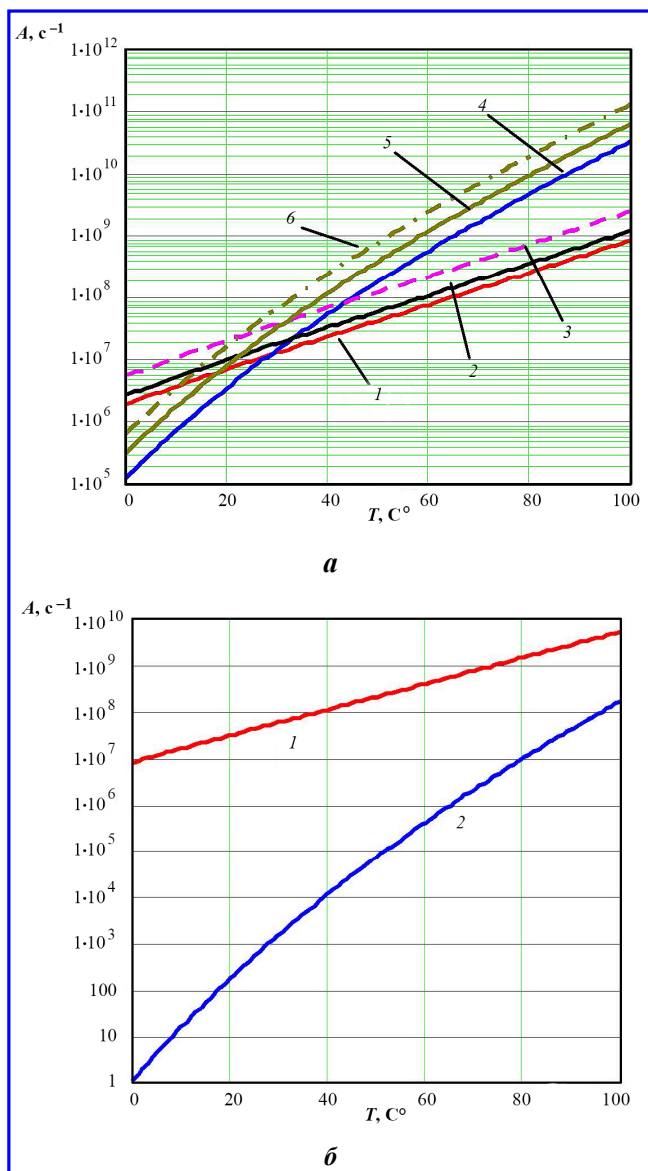
Здесь  $M$  – приведенная масса;  $\beta_{\text{N}_2}$  – поляризуемость молекулы азота. Константы скоростей реакций диссоциации  $k_{dis}$  (7) и отрыва  $k_{dt}$  (9) связаны с константами скоростей ассоциации и конверсии принципом детального равновесия [18]:

$$k_{dis,dt} = \frac{g_{n-1} g_{\text{H}_2\text{O}}}{g_n} k_{as,con} K_{eq}, \quad (11)$$

где  $g_n, g_{n-1}, g_{\text{H}_2\text{O}}$  – статистические веса кластеров и молекулы воды;  $K_{eq}$  – константа равновесия.

$$K_{eq1,2} = 6,53 \cdot 10^{26} \exp\left(-\frac{U_{dd,cd}}{k_B T_g}\right). \quad (12)$$

Характерные вероятности ассоциации (6), конверсии (7), диссоциации (8) и отрыва (9) для ядра конденсации размером  $10^{-7} \text{ см}$  приведены на рис. 3.



**Рис. 3. Зависимость вероятностей: *a* – ассоциации 1 – H<sub>2</sub>O; 2 – NaCl; 3 – SiO<sub>2</sub> и диссоциации 4 – H<sub>2</sub>O; 5 – NaCl; 6 – SiO<sub>2</sub> с участием нейтральных молекул; *b* – конверсии (1) и отрыва (2) нейтральных молекул от заряженных частиц**

Видно, что для реакций с участием только нейтральных молекул вероятности диссоциации начинают превышать вероятности ассоциации в диапазоне температур 22 – 28 °С, а кривые вероятностей конверсии и отрыва с участием заряженных частиц не пересекаются вплоть до температуры кипения. Это означает, что в отсутствие значительного количества заряженных частиц в атмосфере в приповерхностном слое при относительно высоких температурах воздуха и воды испарение начинает превышать конденсацию. Это может быть источником энергии при возникновении различных природных катаклизмов – тропических ураганов, торнадо и

смерчей. Именно этим обстоятельством объясняется хорошо известное из опытных наблюдений значение температуры поверхности океана 26,5°С [19, 20], при которой начинают возникать тропические ураганы. Конкретное значение температуры определяется соленостью океана и концентрацией аэрозолей над его поверхностью.

Характерное время роста капли с начальным радиусом  $r_0$  до радиуса  $r_k$  в процессах (6) – (7) и (8) – (9), соответственно, на основании (10) – (12) рассчитывается по формулам:

$$t_n = \frac{1,2 \cdot 10^{-9} n_w \ln\left(\frac{r_k}{r_0}\right)}{\sqrt[3]{\mu_{H_2O}^2 \beta_{N_2} T_g^{0,5} ([H_2O][N_2] - K_{eq1} [N_2])}}, \quad (13)$$

$$t_c = \frac{3,28 \cdot 10^{-12} n_w \ln\left(\frac{r_k}{r_0}\right)}{\sqrt{q^2 \beta_{N_2} ([H_2O][N_2] - K_{eq2} [N_2])}}, \quad (14)$$

где  $n_w = 4,325 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$  – концентрация молекул в капле воды, а начальный радиус можно принять

$$\text{равным } r_0 = 6 \sqrt{\frac{\mu_{H_2O}^4}{1,5(k_B T_g)^2}}.$$

Характерные времена образования капель в зависимости от их радиуса, центра конденсации, равновесной температуры и влажности воздуха с участием заряженных и нейтральных частиц приведены на рис. 4 – 6. Анализ результатов расчетов показывает, что даже при стопроцентной влажности и наличии нейтральных центров конденсации, но в отсутствие заряженных частиц, при достаточно высокой температуре воздуха (свыше 28°С) конденсации и выпадения осадков не будет. В то же время, даже при достаточно низкой относительной влажности (ниже 40%) и высокой температуре (свыше 30°С) конденсация идет и выпадение осадков возможно при наличии значительного количества заряженных центров конденсации. Понимание этого дает основу для эффективного использования метода вбрасывания в атмосферу заряженных частиц для стимулирования выпадения осадков или, наоборот, их прерывания при достаточно высоких температурах воздуха, а также для предсказания различных природных катаклизмов. При этом подчеркнем, что никакого пересыщения атмосферы водяными парами не требуется. А поскольку процессы зарядки аэрозолей и конденсации в атмосфере характеризуются асимметрией по знаку заряда, то инжекция электронов или отрицательных ионов будет приводить к стимуляции осадков, а положительных ионов – к развалу капель и сдерживанию или ослаблению их потоков.

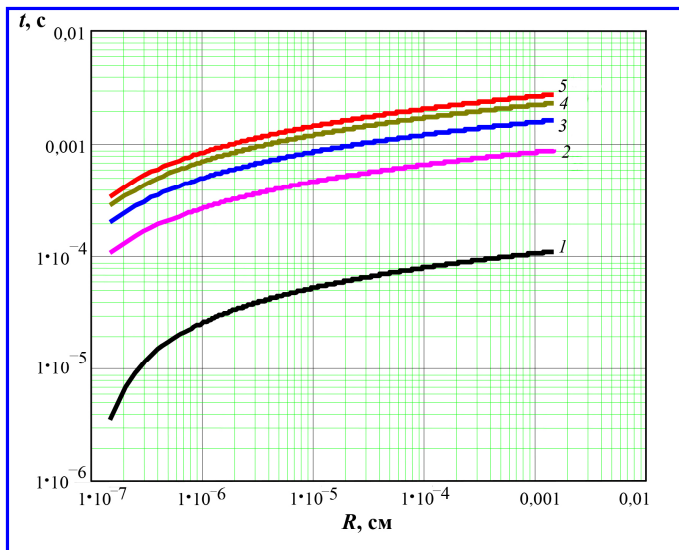


Рис. 4. Зависимость времени роста капли от ее размера при  $H = 100\%$ : 1 – рост заряженной капли при  $T = 25^\circ\text{C}$ ; 2 – рост нейтральных капель на ядре конденсации NaCl при температуре  $T = 5^\circ\text{C}$ ; 3 – 5 – рост нейтральных капель на ядре конденсации  $\text{H}_2\text{O}$  при температурах  $T = 5, 20$  и  $25^\circ\text{C}$

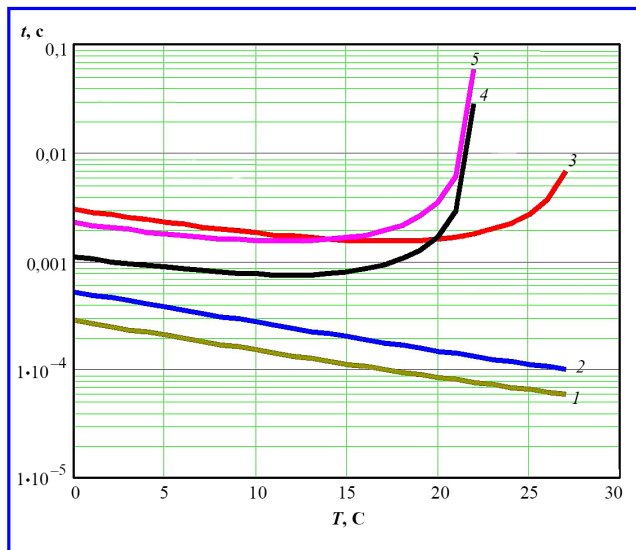


Рис. 5. Зависимость времени роста капель до  $R = 15$  мкм от температуры среды: 1 –  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $H = 1000\%$  (пересыщение); 2 –  $\text{H}_2\text{O}^+$ ,  $H = 100\%$ ; 3 –  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $H = 100\%$ ; 4 – NaCl,  $H = 100\%$ ; 5 –  $\text{SiO}_2$ ,  $H = 100\%$

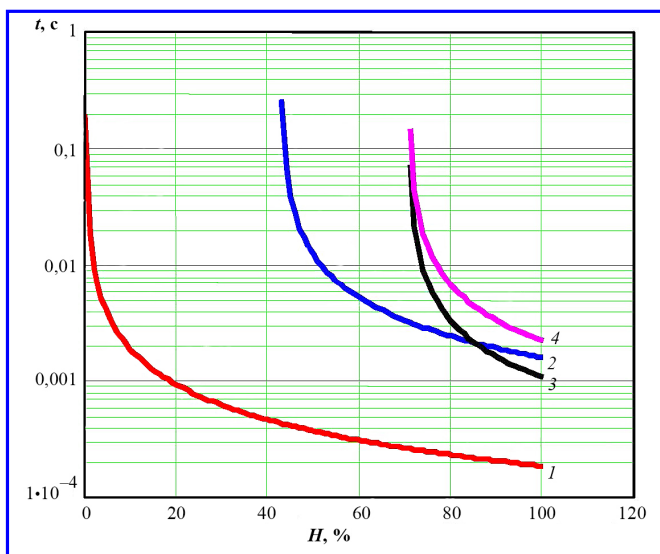


Рис. 6. Зависимость времени образования капли  $R = 15$  мкм от влажности: 1 – заряженная капля,  $T = 30^\circ\text{C}$ ; 2 –  $\text{H}_2\text{O}$ ; 3 – NaCl; 4 –  $\text{SiO}_2$ ,  $T = 18^\circ\text{C}$

Однако в случае с положительными ионами ситуация оказывается значительно более тонкой, чем в случае с отрицательными, поскольку для них задача состоит в нейтрализации уже существующих отрицательно заряженных кластеров, а не в наработке новых центров конденсации. Поэтому превышение потока ионов над оптимальным для данных метеоусловий значением может в итоге привести к отрицательному результату.

Кроме того, на основании приведенных рисунков можно сделать вывод о том, что, поскольку значительное пересыщение паров воды в атмосфере отсутствует, процесс развития ядер конденсации начинается на аэрозольных частицах Айткена, концентрация которых в атмосфере достаточно велика, а продолжается на нейтральных и заряженных каплях воды. В дальнейшем конденсация протекает согласно описанному ранее механизму. К тому же следует сделать вывод, что к ядрам конденсации неизвестной природы следует отнести нейтральные кластеры, которые на расстояниях много больших их размера не идентифицируются как заряженные частицы, но в процессе зарождения ядер конденсации на расстояниях порядка межатомного выступают как заряженные кластеры, взаимодействующие с молекулами воды по схеме заряд-диполь.

Молекулярно-кинетическая теория конденсации в воздухе, кроме обнаружения предвестников землетрясений космическими средствами наблюдения [15], может быть использована для описания и прогноза динамики тропических ураганов, циклонов и тайфунов (ТЦ).

Основную роль в процессе запуска тропического урагана играет количество центров конденсации, особенно заряженных, испарение молекул воды с поверхности которых сильно затруднено. Для развития мощного ТЦ требуется не только замет-

ное 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, приводит к развитию мощных ураганов и тайфунов, что совпадает с результатами многочисленных экспериментальных наблюдений [19].

Концентрация заряженных центров конденсации оценивается через скорость ионизации, которая в дальнейших оценках с учетом суточного вращения Земли задается в следующем виде [21]:

$$f(t) = f_0 \sin^2(\omega t) + f_1 \exp(-\alpha t) \sin^2(\omega t), \quad (15)$$

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 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 [22] и грозовой активности.

Мощность вращения тропического урагана представляется в виде разности преобразованной в поступательное вращение атмосферного воздуха мощности конденсационного тепловыделения и потерь мощности на трение потока воздуха о поверхность воды [19]. Коэффициент полезного действия преобразования тепла в движение воздуха в заданном направлении будем принимать равным отношению ускоряющего перепада давления к полному давлению атмосферы на поверхности океана  $\Delta p/p$ , что согласуется с результатами работы [20]. Тогда уравнение для характерной скорости ТЦ можно записать в следующем виде [23]:

$$v \frac{dv}{dt} = \frac{[(A_c - A_{dt})U_{cd}N_c(t) + (A_{ass} - A_{diss})U_{dd}N_n]V_h \Delta p}{Mp} - \frac{\kappa v^3 S_h}{M}, \quad (16)$$

где  $v$  – искомая скорость ТЦ;  $M$ ,  $V_h$ ,  $S_h$  – полная масса, объем и площадь соприкосновения ТЦ с океаном, соответственно;  $\rho$  – плотность воздуха;  $U_{dd}$ ,  $U_{cd}$  – потенциалы диполь-дипольного (2) и заряд-дипольного взаимодействия (4), соответственно;  $\kappa$  – коэффициент трения воздуха о поверхность

воды и суши, равный 0,0011 и 0,0026 [19], соответственно;  $N_n$ ,  $N_c$  – концентрации нейтральных и заряженных центров конденсации;  $A_c$ ,  $A_{dt}$ ,  $A_{ass}$ ,  $A_{diss}$  – вероятности процессов конверсии и отрыва молекул воды на заряженных центрах конденсации, а также ассоциации и диссоциации на нейтральных центрах, соответственно, которые оцениваются на основании констант скоростей реакций (6) – (9) с использованием (11), (12) (см. рис. 3). 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;  $f(t) = v_i(t)N$  – скорость ионизации в атмосфере (при естественных условиях над сушей составляет около  $10 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ , над морем – не более  $5 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ ),  $v_i$  – частота ионизации;  $N$  – концентрация молекул воздуха. Ускоряющий перепад давления равен  $\Delta p = \rho v^2$ . Вероятность отрыва молекул от заряженного центра конденсации во всем рассматриваемом диапазоне температур много меньше вероятности прилипания (см. рис. 3), поэтому ей можно пренебречь. С учетом всего вышесказанного уравнение (16) преобразуется к виду:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{[A_c(T_g)U_{cd}(T_g)\sqrt{\frac{v_i(t)N}{\beta_{ii}}} + (A_{ass}(T_g) - A_{diss}(T_g))U_{dd}(T_g)N_n(t)]v}{p - \frac{\kappa v^2}{h}}, \quad (17)$$

где  $h = 7200 \text{ м}$  [24] – высота эквивалентного столба равной плотности, оказывающего на поверхность океана давление  $p = 10^5 \text{ Па}$ .  $T_g$  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.

Иллюстрацию применимости уравнения (17) для описания динамики тропического урагана можно привести на основе сравнения результатов численного моделирования с результатами наблюдений динамики развития характерной тангенциальной скорости реального ТЦ «Густав» в Атлантическом океане в 2008 году (рис. 7 [25]).

Для более широкого представления о мощи тропических ураганов и тайфунов на рис. 8 представлена объемная картина поля максимальных расчетных скоростей ТЦ в зависимости от температуры среды и относительной влажности при максимально возможной средней по объему скорости ионизации в грозовых облаках.

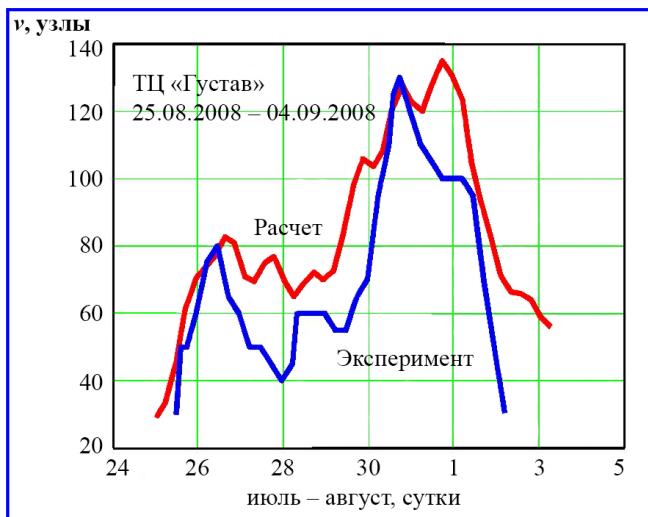


Рис. 7. Сравнение расчетной и экспериментальной зависимостей от времени характерной скорости ветра (в узлах) ТЦ «Густав» в 2008 году [25]

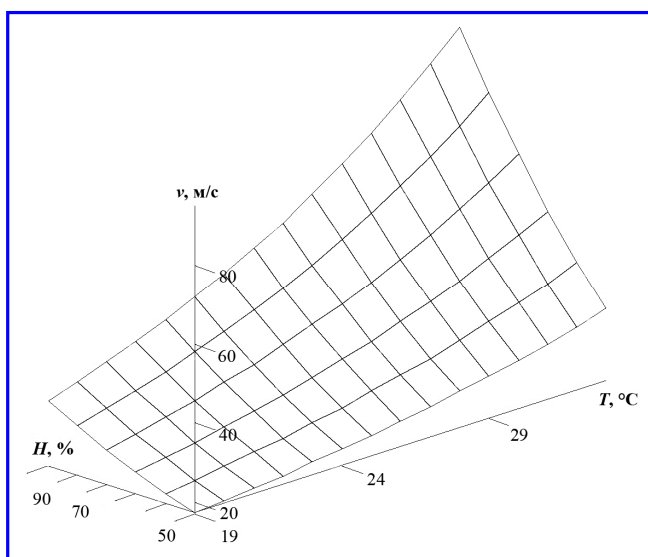


Рис. 8. Поверхность максимальной скорости ТЦ в зависимости от относительной влажности воздуха и температуры океана при  $v_0 = 5$  м/с и  $f_1 = 52 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$

В работе [21] отмечалось, что 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 типа «Метеор-М», «Метеор-МП», «Электро-М» и «Лидер-МЧС».

Таким образом, в настоящей работе представлено описание молекулярно-кинетической теории конденсации в атмосфере и показаны некоторые возможные области ее применения.

Подтверждено, что наиболее эффективно процесс конденсации во влажной приземной атмосфере идет по следующему механизму: вследствие высокой концентрации паров воды образование капель сначала идет в результате ассоциации нейтральных молекул, затем к ним со скоростью поляризационного захвата присоединяются ионные кластеры, образовавшиеся в результате плазмохимических реакций, развивающихся под воздействием внешнего ионизирующего излучения (СКЛ, ГКЛ, радон-222, гроззовые разряды); это, в свою очередь, приводит к затруднению отрыва молекул воды от заряженных капель из-за более высокой энергии связи и ускорения их удаления из объема под воздействием атмосферного электрического поля.

Показано, что перспективы возникновения мощных землетрясений и динамики развития ТЦ можно оценить с использованием систем глобального космического мониторинга.

### Литература

1. Грин Г. Л. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы / Х. Грин, В. Лейн : под ред. д-ра хим. наук Н. А. Фукса. – Ленинград : Химия, 1972. – 426 с.
2. К теории образования новой фазы кавитации / Я. Б. Зельдович // ЖЭТФ. – 1942. – Т. 12. – Вып. 11–12. – С. 524–538.
3. A kinetic theory of steady condensation / P. N. Shankar // J. Fluid Mech. – 1970. – Vol. 40. – № 5. – P. 411–422.
4. Кинетическая теория испарения и конденсационного роста сферических частиц / В. Г. Черняк, А. Е. Маргилевский // ТВТ. – 1980. – Т. 18. – № 5. – С. 1032–1039.
5. Исследование конденсационного роста и испарения водяных капель в воздухе / И. Н. Ивченко // ДАН СССР. – 1984. – Т. 274. – № 3. – С. 572–575.
6. Обобщение теории испарения сферических капель в диффузионном режиме / И. Н. Ивченко, В. А. Никишин // ДАН СССР. – 1984. – Т. 277. – № 5. – С. 1111–1114.
7. К теории зародышеобразования на заряженных ядрах / А. И. Русанов, Ф. М. Куни // Коллоидный журнал. – 1982. – Т. 54. – № 5. – С. 934–941.
8. Кинетика изотермических процессов гомогенной конденсации / Б. Ф. Гордиец, Л. А. Шелепин, Ю. С. Шмоткин // Кинетика низкотемпературной плазмы и газовые лазеры. Труды ФИАН. – 1984. – Т. 145. – С. 189–219.
9. Матвеев Л. Т. Физика атмосферы / Л. Т. Матвеев. – Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 2000. – 777 с.
10. Семченко Б. А. Физическая метеорология : учеб. Для студентов вузов, обучающихся по направлению «Гидрометеорология», «Метеорология», «Океанология» / Б. А. Семченко. – Москва : Аспект Пресс, 2002. – 414, [1] с. : ил.
11. Electromagnetic processes in near ground atmosphere as a source of thermal anomalies before earthquakes. Case study Colima earthquake M7.8, January 21 (22) 2003 / S. A. Pulinet, K. A. Boyarchuk, A. V. Karelin [et al] // Proc. of IV International Workshop on Magnetic, Electric, and Electromagnetic Methods in Seismology and Vulcanology, September 5–9, 2004. La Londe les Maures, France. – P. 43–44.

12. Ферми Э. Термодинамика / Э. Ферми. – Ижевск : Издательский дом Удмуртский университет, 1998. – 163 с.
13. Зацепина Г. Н. Физические свойства и структура воды / Г. Н. Зацепина. – Москва : Изд-во МГУ, 1998. – 183 с.
14. Боярчук К. А. Базовая модель кинетики ионизированной атмосферы / К. А. Боярчук, А. В. Карелин, Р. В. Широков. – Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2006. – 204 с.
15. Дистанционное зондирование предвестников землетрясений из космоса на основе метода «химического потенциала» по данным метеопараметров / К. А. Боярчук, А. В. Карелин, А. В. Надольский // Космонавтика и ракетостроение. – 2010. – № 2 (59). – С. 142 – 150.
16. Статистический анализ зависимости поправки химического потенциала паров воды в атмосфере от удаленности эпицентра землетрясения / К. А. Боярчук, А. В. Карелин, А. В. Надольский // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2010. – Т. 116. – № 3. – С. 39 – 46.
17. Результаты детектирования предвестников землетрясений по данным метеонаблюдений на основе метода «химического потенциала» / К. А. Боярчук, А. В. Карелин, А. В. Надольский // Космонавтика и ракетостроение. – 2011. – № 2 (63). – С. 93 – 99.
18. Смирнов Б. М. Физика слабоионизованного газа / Б. М. Смирнов. – Москва : Наука, 1985. – 423 с.
19. Шулейкин В. В. Расчет развития, движения и затухания тропических ураганов и главных волн, создаваемых ураганами / В. В. Шулейкин. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1978. – 97 с.
20. Голицын Г. С. Введение в динамику планетных атмосфер // Г. С. Голицын. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1973. – 104 с.
21. О связи интенсивности тропических ураганов с грозовой активностью. Взгляд из космоса / В. В. Хегай, А. В. Карелин // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2021. – Т. 180. – № 1. – С. 26 – 32.
22. Лучков Б. И. Солнечное влияние на земную погоду / Б. И. Лучков // Научная сессия МИФИ-2006. Сб. научных трудов. – Москва : МИФИ, 2006. – С. 79 – 80.
23. Dynamics of tropical hurricanes and cyclones / A. V. Karelin // Physics of wave phenomena, 2006. – V. 14. – № 4. – P. 44 – 51.
24. Размеры циклонов и статистические свойства ансамбля / Г. С. Голицын // Доклады Академии наук, 2005. – Т. 401. – № 1. – С. 72 – 74.
25. О возможности космического мониторинга процессов возникновения тропических ураганов / А. В. Карелин // Труды НПП ВНИИЭМ. Вопросы электромеханики, 2009. – Т. 111. – № 4. – С. 43 – 49.

Поступила в редакцию 23.12.2021

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

*Александр Витальевич Карелин, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, т. (495) 513-54-01, e-mail: avkarelin@mail.ru. (АО «ЦНИИмаши»).*

## MOLECULAR-KINETIC THEORY OF CONDENSATION IN THE ATMOSPHERE AND ITS APPLICATIONS

V. V. Kheday, A. V. Karelin

*The paper presents a description of the molecular-kinetic theory of condensation in the atmosphere and shows some possible areas of its application. The most efficient process of condensation in the humid surface atmosphere proceeds according to the following mechanism: due to the high concentration of water vapor, the formation of droplets first proceeds as a result of the association of neutral molecules, then ion clusters, formed as a result of plasma-chemical reactions developing under the influence of an external ionizing radiation (SSR, GSR, Rn-222, lightning discharges), join them at the rate of polarization capture. This, in turn, makes it difficult for water molecules detachment from charged droplets due to the higher binding energy and accelerates their removal from the air volume under the influence of an atmospheric electric field. It is shown that the prospects for the occurrence of powerful earthquakes and the dynamics of TC development can be estimated using global Earth observation system data.*

**Keywords:** molecular-kinetic theory, condensation, neutral clusters, ion clusters, condensation centers, association, conversion, plasma-chemical reactions, chemical potential, earthquakes, tropical hurricane, thunderstorm activity, ionization rate, relative humidity, ocean temperature, Earth observation system.

### References

1. Green H. L. Particulate clouds: dusts, smokes and mists / Green H., W. Lane: edited by Doctor of Chemistry Sciences N. A. Fuks. – Leningrad : Chemistry, 1972. – 426 p.
2. Toward a theory of the new phase generation. Cavitation / Ia. B. Zeldovich // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 1942. – Vol. 12. – Issue 11 – 12. – P. 524 – 538.
3. A kinetic theory of steady condensation / P. N. Shankar // J. Fluid Mech. – 1970. – Vol. 40. – № 5. – P. 411 – 422.



4. Kinetic theory of evaporation and condensation growth of spherical particles / V. G. Cherniak, A. E. Margilevskii // Thermophysics of high temperatures. – 1980. – Vol. 18. – No. 5. – P. 1032 – 1039.
5. Research of condensation growth and evaporation of water droplets in air / I. N. Ivchenko // Reports of the USSR Academy of Sciences. – 1984. – Vol. 274. – No. 3. – P. 572 – 575.
6. Generalization of theory of evaporation of spherical drops in the diffusion mode / I. N. Ivchenko, V. A. Nikishin // Reports of the USSR Academy of Sciences. – 1984. – Vol. 277. – No. 5. – P. 1111 – 1114.
7. Toward a theory of nucleation on charged core / A. I. Rusanov, F. M. Kuni // Colloid Journal. – 1982. – Vol. 54. – No. 5. – P. 934 – 941.
8. Kinetics of isothermal processes of homogeneous condensation / B. F. Gordiets, L. A. Shelepin, Iu. S. Shmotkin // Kinetics of low-temperature plasma and gas lasers. P.N. Lebedev Physical Institute Proceedings. – 1984. – Vol. 145. – P. 189 – 219.
9. Matveev L. T. Atmospheric physics / L. T. Matveev. – St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2000. – 777 p.
10. Semchenko B. A. Physical meteorology : Textbook for students studying ‘Hydrometeorology’, ‘Meteorology’, ‘Oceanology’ / B. A. Semchenko. – Moscow : Aspect Press, 2002. – 414, [1] p. : with ill.
11. Electromagnetic processes in near ground atmosphere as a source of thermal anomalies before earthquakes. Case study Colima earthquake M7.8, January 21 (22) 2003 / S. A. Pulinets, K. A. Boyarchuk, A. V. Karelin [et al] // Proc. of IV International Workshop on Magnetic, Electric, and Electromagnetic Methods in Seismology and Vulcanology, September 5 – 9, 2004. La Londe les Maures, France. – P. 43 – 44.
12. Fermi E. Thermodynamics/ E. Fermi. – Izhevsk: Udmurt University Publishing House, 1998. – 163 p.
13. Zatsepina G. N. Physical characteristics and water structure / G. N. Zatsepina. – Moscow : Moscow University Press, 1998. – 183 p.
14. Boiarchuk K. A. Basic model of the ionized atmosphere kinetics / K. A. Boiarchuk, A. V. Karelin, R. V. Shirokov. – Moscow : FSUE NPP VNIIEEM, 2006. – 204 p.
15. Remote sensing of earthquake precursors from space based on the method of ‘chemical potential’ according to meteorological parameters / K. A. Boiarchuk, A. V. Karelin, A. V. Nadolskii // Cosmonautics and Rocket Engineering. – 2010. – No. 2 (59). – P. 142 – 150.
16. Statistical analysis of the dependence of chemical potential correction of water vapor in the atmosphere on the farness of the earthquake epicenter / K. A. Boiarchuk, A. V. Karelin, A. V. Nadolskii // Matters of Electromechanics. NPP VNIIEEM Proceedings. – 2010. – Vol. 116. – No. 3. – P. 39 – 46.
17. Results of earthquake precursors detection according to meteorological observations based on the ‘chemical potential’ method / K. A. Boiarchuk, A. V. Karelin, A. V. Nadolskii // Cosmonautics and Rocket Engineering. – 2011. – No. 2 (63). – P. 93 – 99.
18. Smirnov B. M. Physics of slightly ionized gas / B. M. Smirnov. – Moscow : Nauka, 1985. – 423 p.
19. Shuleikin V. V. Calculation of the development, movement and fading of tropical hurricanes and the main waves created by hurricanes / V. V. Shuleikin. – Leningrad : Gidrometeoizdat, 1978. – 97 p.
20. Golitsyn G. S. Introduction to the dynamics of planetary atmospheres // G. S. Golitsyn. – Leningrad : Gidrometeoizdat, 1973. – 104 p.
21. About relationship between the intensity of tropical hurricanes and thunderstorm activity. Space view / V. V. Khagai, A. V. Karelin // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – 2021. – Vol. 180. – No. 1. – P. 26 – 32.
22. Luchkov B. I. Solar impact on Earth weather / B. I. Luchkov // Scientific Conference MEPhI-2006. Collection of proceedings. – Moscow : MEPhI, 2006. – P. 79 – 80.
23. Dynamics of tropical hurricanes and cyclones / A. V. Karelin // Physics of wave phenomena, 2006. – V. 14. – № 4. – P. 44 – 51.
24. Cyclone dimension and statistical characteristics of assembly / G. S. Golitsyn // Reports of the Academy of Sciences, 2005. – Vol. 401. – No. 1. – P. 72 – 74.
25. About the possibility of space monitoring of tropical hurricanes generation processes / A. V. Karelin // Matters of Electromechanics. NPP VNIIEEM Proceedings , 2009. – Vol. 111. – No. 4. – P. 43 – 49.

*Valerii Varlamovich Khagai, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Leading Researcher,  
tel. +7 (495) 851-97-80, e-mail: hegai@izmiran.ru.  
(Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS).*  
*Aleksandr Vitalevich Karelin, Doctor of Physics and Mathematics (D. Sc.), Chief Researcher,  
tel. +7 (495) 513-54-01, e-mail: avkarelin@mail.ru.  
(JSC TSNIMash).*