

Космические технологии радиозондирования для мониторинга радиационной обстановки окружающей среды вокруг АЭС

А.В. Карелин¹, К.А. Боярчук², М.В. Туманов²

¹Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, Московская область, г. Королев, ул. Пионерская, д. 4, avkarelin@mail.ru

²Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт электромеханики», Московская область, г. Истра, ул.Панфилова, д. 11

Рассматриваются методы и средства дистанционного мониторинга из космоса радиоактивного загрязнения территорий. Предлагается создание специализированной космической системы оперативного мониторинга территории на базе орбитальной группировки малых космических аппаратов (КА), оснащенных комплексами специальной целевой аппаратуры.

Methods and tools for remote monitoring from space of radioactive contamination observed. Proposed the creation of a specialized space system for monitoring of the territory on the basis of the orbital constellation of small spacecraft (SC), equipped with a set of special target equipment.

В современных условиях растущего энергопотребления общества, по-видимому, трудно найти альтернативу дальнейшему развитию ядерной энергетики. Ядерная энергетика должна стать главным энергоисточником двадцать первого века, не став таковым по ряду причин в конце двадцатого и, прежде всего, из-за наличия достаточного количества нефти и природного газа на мировом рынке по умеренным ценам, аварий на атомных станциях, вызвавших недоверие к ним общества, отсутствие убедительных концепций ядерной и радиационной безопасности.

За краткую историю развития атомной отрасли произошёл целый ряд крупных аварий на ядерных объектах, среди которых следует выделить тепловой взрыв емкости-хранилища высокоактивных отходов предприятия «Маяк» на Южном Урале вблизи г. Кыштым в конце сентября 1957 г., аварию на АЭС в Уиндскейле (Великобритания) в октябре 1957 г., аварию на АЭС Три-Майл-Айленд (США) в 1979 г., аварию на Чернобыльской АЭС в апреле 1986 г. И наконец, в марте 2011 года в Японии произошло землетрясение и вызванное им цунами принесло самую крупную атомную катастрофу XXI века - аварию на АЭС Фукусима-1 (управляется компанией ТокуоElectricPower, Япония) с последующими взрывами в зданиях реакторов, неконтролируемыми выбросами радиоактивного пара в атмосферу. Ситуация в Японии продемонстрировала кризис МАГАТЭ как международного института, который с подачи США выдвигает на первый план угрозу ядерного оружия, затушевывая опасность недостаточного контроля международного сообщества за использованием мирного атома [1].

Последняя авария акцентировала необходимость не только в серьёзном пересмотре вопроса повышения безопасности работающих станций, но и к вопросам разработки новых эффективных методов дистанционного обнаружения и контроля радиоактивного загрязнения окружающей среды, а также геофизической обстановки данного района.

Существующие методы дистанционного зондирования следов радиоактивной ионизации естественно разделить на прямые и косвенные. Первые основаны на регистрации интенсивности и спектра ионизирующего излучения объекта, вторые регистрируют изменение окружающей среды под действием этого излучения [2].

Прямые методы мониторинга получили наибольшее распространение, и в настоящее время контроль над радиационной обстановкой основан на методах детектирования ионизирующих излучений, например, использующих различные сцинтилляторы. Однако для реальных дистанционных методов (позволяющих обеспечивать мониторинг с космического аппарата) их пространственная разрешающая способность и чувствительность недостаточны, реально они позволяют производить измерения с расстояний не более сотен метров. К тому же некоторые типы ионизирующих излучений (α , β) обладают весьма слабой проникающей способностью и не могут быть зарегистрированы такими методами дистанционно.

Выход состоит в использовании косвенных методов, позволяющих оценить уровень радиоактивного загрязнения по отклику окружающей среды на ионизирующее излучение. Такой подход позволяет использовать традиционные методы дистанционного мониторинга окружающей среды: приземных слоев атмосферы, поверхности океана и Земли. Основное воздействие, которое оказывают продукты радиоактивного деления на окружающую среду — это ее ионизация и, как следствие, протекание различных стимулируемых ионами биологических и физических эффектов.

Условно предлагаем разделять следующие природные эффекты, вызванные ионизирующим излучением [3]:

- биологические эффекты, в том числе изменение цветности водоемов и растительных покровов;
- геохимические эффекты, в том числе изменение концентрации основных малых газовых составляющих атмосферы, изменение термодинамических параметров атмосферы;
- электромагнитные эффекты, в т. ч. изменение концентрации электронов в ионосфере, радиоизлучение атмосферных образований.

Эти эффекты можно положить в основу методов дистанционного зондирования радиоактивных загрязнений. И если первые два типа методов могут использоваться с уже существующей аппаратурой на КА, то для методов, основанных на электромагнитных эффектах, следует остановиться подробнее. Было замечено, что под действием радиоактивного излучения во влажной атмосфере могут образовываться не совсем обычные физические объекты, излучающие в радиодиапазоне спектра, и происходить резкие погодные изменения, обусловленные резкой интенсификацией процессов конденсации [4, 5].

Нейтральный кластер

Процесс ионизации в обычном воздухе заканчивается образованием сложных ион-молекулярных структур, например, типа $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_m$, $\text{NO}_3^-\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}$, $\text{NO}_3^-(\text{H}_2\text{O})_n$ и др. В результате ассоциации таких гидратированных ионов, независимо от количества молекул воды в оболочке, образуется нейтральный кластер, например, типа $\text{NO}_3^-(\text{H}_2\text{O})_n\text{-H}_3\text{O}^+$, устойчивость которого определяется как ионной, так и ковалентной связями [6]. Естественно предположить, что в таком комплексе источником электромагнитного излучения могут быть вращательно-вращательные переходы соответствующих диполей.

Если рассматривать частный случай симметричного волчка, основного электронного и нулевого колебательного состояния, то в этом случае вращательная постоянная молекулы B_e (см^{-1}) не зависит от вращательного квантового числа J , а частота излучения вращательно-вращательного перехода ν (см^{-1}) с вращательного уровня J запишется в виде

$$\nu_J = 2 \cdot B_e \cdot (J + 1), \quad (1)$$

при этом вращательная постоянная может быть представлена в виде

$$B_e = \frac{h}{8 \cdot \pi^2 \cdot c \cdot \mu \cdot r_e^2}, \quad (2)$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг·с – постоянная Планка;

$c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с – скорость света;

μ – приведенная масса молекулы (г);

r_e – равновесное межъядерное расстояние (см).

Интенсивность линий в спектре излучения может быть записана следующим образом [7]

$$I_J = N_J \frac{64\pi^4}{3c^3} f_J^4 \cdot R^2, \quad (3)$$

где R – матричный элемент электрического дипольного момента перехода (слабо зависит от J),

f_J – частота перехода (Гц),

N_J – заселенность J -го состояния, которая может быть представлена в виде

$$N_J = N_0 (2J + 1) \exp\left(-\frac{hcB_e J(J+1)}{k_B T}\right). \quad (4)$$

Здесь N_0 – заселенность нулевого вращательного состояния,

$k_B = 1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг/К – постоянная Больцмана,

T – температура воздуха (К).

Подставляя (1) и (4) в (3) и беря производную по J , получим аналитическое выражение для квантового числа максимума интенсивности ЭМИ, также зависящее только от вращательной постоянной молекулы B_e и температуры среды T :

$$J(r_e) = \frac{\left[\frac{18k_B T + hcB_e(r_e)}{216hcB_e(r_e)} + \frac{\sqrt{-6k_B T(500k_B^2 T^2 + 44k_B ThcB_e(r_e) + h^2 c^2 B_e^2)}}{72(hcB_e(r_e))^{\frac{3}{2}}} \right]^{\frac{1}{3}} - \left[\frac{hcB_e(r_e) - 10k_B T}{12hcB_e(r_e)} - \frac{1}{9} \right]}{\left[\frac{18k_B T + hcB_e(r_e)}{216hcB_e(r_e)} + \frac{\sqrt{-6k_B T(500k_B^2 T^2 + 44k_B ThcB_e(r_e) + h^2 c^2 B_e^2)}}{72(hcB_e(r_e))^{\frac{3}{2}}} \right]^{\frac{1}{3}}}. \quad (5)$$

Несмотря на некоторую громоздкость, это выражение вполне пригодно для численных расчетов. В нем специально подчеркнуто, что вращательная постоянная, а, следовательно, и $J(r_e)$, зависит существенным образом от равновесного межъядерного расстояния r_e (формула (2)). Таким образом, с учетом (2) и (5) получим следующее выражение для частоты максимума интенсивности ЭМИ, измеряемой в Гц:

$$f(r_e) = \frac{h}{8 \cdot \pi^3 \cdot \mu \cdot r_e^2} \cdot (J(r_e) + 1). \quad (6)$$

В том случае, если детектируемое излучение не соответствует максимуму излучения квазимолекулы, соответствующее вращательное квантовое число можно оценить из условия баланса сил кулоновского притяжения $F_q = -e^2/r_e^2$ и центробежного

разлета $F_r = M \cdot r_e \cdot \omega^2$, где M – масса относительно легкого кластера, а ω – циклическая частота вращения. Таким образом, для циклической частоты получаем

$$\omega(r_e) = \sqrt{\frac{e^2}{M \cdot r_e^3}}. \quad (7)$$

Далее, пользуясь тем, что энергию жесткого ротатора можно представить в виде

$$E(r_e) = h \cdot c \cdot B_e J(J+1) = \frac{\mu \cdot r_e^2 \cdot \omega(r_e)^2}{2},$$

с учетом (6) получим выражение для вращательного квантового числа:

$$J(r_e) = \sqrt{\frac{E(r_e)}{hcB_e(r_e)} + \frac{1}{4}} - \frac{1}{2},$$

или

$$J(r_e) = \sqrt{\frac{4\pi^2 \mu^2 q^2 r_e}{h^2 M} + \frac{1}{4}} - \frac{1}{2}. \quad (8)$$

Приведенные оценочные формулы получены для одиночного кластера. В реальной ситуации следует учесть не только разлет при больших J , но и возможность столкновительного развала. Поэтому энергия кулоновского взаимодействия заряженных кластеров, с учетом вращения, должна быть порядка температуры окружающей среды. С учетом столкновительного развала нейтральных кластеров устойчивому ЭМИ соответствуют равновесное расстояние $r_e \approx 2,72 \cdot 10^{-6}$ см и вращательные квантовые числа $J \approx 6000$.

Интенсивность линий в спектре излучения на вращательно-вращательных переходах нейтральных кластеров с учетом столкновительного развала, согласно (7), будет соответствовать приведенной на рис. 1.

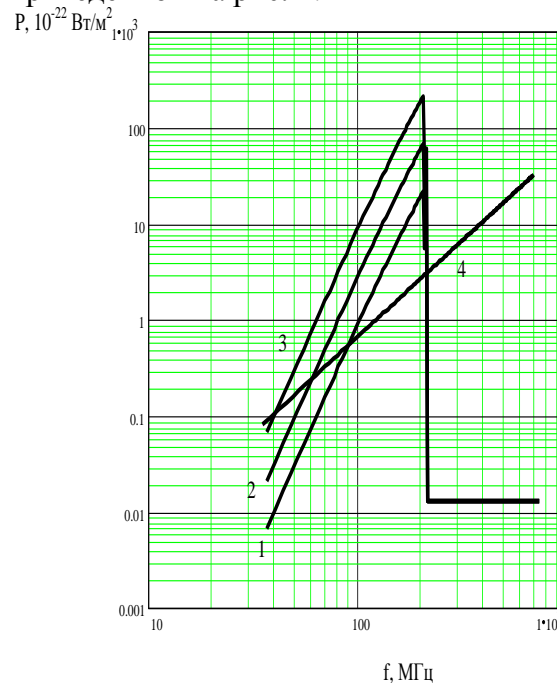


Рис. 1. Спектры излучения нейтральных кластеров с учетом столкновительного развала при концентрации паров воды $[H_2O] = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и различных скоростях ионизации $f = 10 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (1); $f = 100 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (2) и $f = 1000 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (3), а также спектр равновесного излучения при температуре $T = 7 \text{ °K}$ (4).

Здесь приведено также распределение мощности равновесного излучения в радиодиапазоне спектра (кривая 4) для эффективной температуры 7 °К. Все расчеты плотности мощности излучения приведены без учета диаграммы направленности приемной антенны. Видно, что в метровом диапазоне спектра с частотой от 40 до 200 МГц, в принципе, возможно наблюдение излучения нейтральных кластеров.

Ожидаемый диапазон излучения перекрывается с диапазонами, на которых работают телевизионные и радио передатчики. Поэтому следует рассчитывать на получение сигнала в диапазонах 108-142 МГц, 148-173 МГц. При полной концентрации нейтральных кластеров 10^6 см^{-3} максимальная возможная удельная мощность излучения в диапазоне частот 105-142 МГц составит $P_{y0} = 5 \cdot 10^{-21} \text{ Вт/м}^3$, полная мощность с объема радиусом $R = 2,2 \text{ км}$, высотой $H = 1,2 \text{ км}$ и радиусом антенны $R_a = 1,5 \text{ м}$ составит $P = 1,5 \cdot 10^{-17} \text{ Вт}$, а ожидаемая амплитуда напряженности электрического поля $E = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ В/м}$. В диапазоне частот 148-173 МГц соответствующие параметры составят $P_{y0} = 1,1 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/м}^3$, $P = 3,2 \cdot 10^{-17} \text{ Вт}$, $E = 4,1 \cdot 10^{-8} \text{ В/м}$. Эти значения получены при суммировании по всем частотам указанных полос. Если полосу уменьшать, то сигнал будет слабеть.

Метод химического потенциала

Внаблюдений перед землетрясением было обнаружено резкое падение влажности [9]. Оно вызвано выделением из напряженной земной коры радиоактивного газа радона-222, излучающего альфа-частицы с энергией 5 МэВ. Соответственно, поступление любых радиоактивных нуклидов или жесткого (альфа, бета и другие заряженные частицы; гамма- и рентгеновские лучи) излучения будет вызывать изменение термодинамических параметров атмосферы.

Существенные изменения влажности в приземном слое допускают теоретическое описание с позиции молекулярно-кинетической теории конденсации.

Зависимость концентрации насыщенных паров воды от температуры T может быть грубо описана с помощью строго получаемой в термодинамике из уравнения Клаузиуса-Клапейрона [10] формулой

$$n = \frac{A}{T} \cdot \exp\left(-\frac{U}{k_B T}\right), \quad (9)$$

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 $Q = 40,683 \text{ кДж/моль}$ при температуре кипения $U_0 = Q/N_A = 0,422 \text{ эВ}$, где $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}/\text{моль}$. Эта работа выхода молекулы воды равна энергии диполь-дипольного взаимодействия вращающихся диполей на расстоянии $r = 2,46 \text{ \AA}$ (равном примерно радиусу молекулы воды), рассчитанной по формуле [11]

$$U = \frac{2 \cdot \mu_{H_2O}^4}{3 \cdot k_B T \cdot r^6}, \quad (10)$$

где $\mu_{H_2O} = 1,85 \cdot 10^{-18} \text{ СГС} \cdot \text{см}$ – дипольный момент молекулы воды. Эта же энергия соответствует работе образования зародыша [12] при критическом радиусе $r_{cr} = 4,76 \text{ \AA}$ и поверхностном натяжении $\gamma = 72,88 \text{ дин/см}$:

$$W_{cr} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{cr}^2 \cdot \gamma. \quad (11)$$

Отсюда следует, что работа выхода молекулы из электрически нейтральной капли воды соответствует энергии диполь-дипольного взаимодействия. Однако, влажный атмосферный воздух, находящийся под воздействием солнечного и естественного фонового излучения, не является, с точки зрения молекулярной кинетики, однокомпонентной системой, где конденсация идет только в результате флуктуаций концентрации паров воды.

Для удобства предварительной оценки мы будем полагать систему квазиоднокомпонентной с переменным химическим потенциалом. 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 (10) и (11):

$$H(t) = \frac{\exp\left(-\frac{U(t)}{k_B T}\right)}{\exp\left(-\frac{U_0}{k_B T}\right)} = \exp\left(\frac{U_0 - U(t)}{k_B T}\right) = \exp\left(-\frac{0,032 \cdot \Delta U \cdot \cos^2 t}{(k_B T)^2}\right), \quad (12)$$

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

В некоторые дни перед землетрясением поправка к 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 [11]:

$$U_{cd} = \frac{q^2 \cdot \mu_{H_2O}^2}{3 \cdot k_B T \cdot r^4}, \quad (13)$$

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

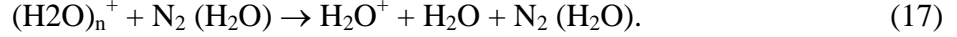
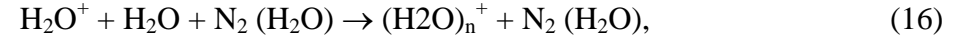
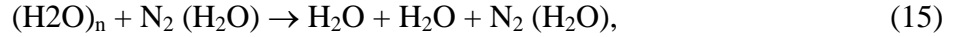
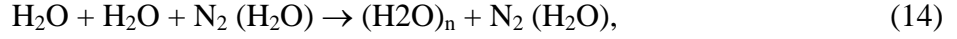
Детальные расчеты концентрации паров воды в атмосфере проводились с использованием подробной нестационарной кинетической модели влажного атмосферного воздуха [13]. Процессы конденсации и испарения эффективно учитывались с помощью реакций ассоциации нейтральных молекул воды в присутствии третьей частицы, конверсии молекул воды с ионным кластером в более сложный кластер и соответствующих обратных реакций развала нейтральных и ионных кластеров. Константы равновесия для нейтральных молекулярных и ион-молекулярных процессов равны, соответственно, $K_{dd}= 1,34 \cdot 10^{25} \cdot \exp(-0,422/T_g)$ и $K_{cd}= 1,34 \cdot 10^{25} \cdot \exp(-0,654/T_g)$ см³. Константы скоростей трехчастичных реакций ион-молекулярной конверсии и молекулярной ассоциации равны $k_{con}= 6,5 \cdot 10^{-34} \cdot T_g^{-0,75}$ и $k_{ac}= 0,3 \cdot 10^{-34} \cdot T_g^{-1/3}$ см⁶/с, а для обратных реакций отрыва молекул от однозарядных и нейтральных кластеров, соответственно, – $k_{cn}= 2 \cdot 10^{-6} \cdot T_g^{0,75} \cdot \exp(-0,422/T_g)$ и $k_{nn}= 9,5 \cdot 10^{-8} \cdot T_g^{7/6} \cdot \exp(-0,654/T_g)$ см³/с. Температура газа T_g измеряется в электрон-вольтах.

Расчеты показали, что важную роль в процессе конденсации играет зарядка нейтральных капель ионными кластерами, константа скорости которой принималась порядка поляризационного захвата $k_{ch}= 10^{-9}$ см³/с.

Рост длительности воздействия и скорости ионизации приводят к падению относительной влажности. Что, в свою очередь, может приводить к росту концентрации нейтральных кластеров и мощности ЭМИ в УКВ диапазоне спектра.

Эти же результаты являются экспериментальным обоснованием молекулярно-кинетической теории конденсации атмосферного воздуха, согласно которой процесс

конденсации в атмосфере идет преимущественно по следующим каналам



Таким образом, мы можем написать уравнение для скорости роста водяной капли

$$\frac{dr_k}{dt} = \frac{(k_{as} + k_{con}) \cdot [\text{H}_2\text{O}]^2 + (k_{asn} + k_{conN}) \cdot [\text{H}_2\text{O}] \cdot [\text{N}_2] - (k_{dis} + k_{dt}) \cdot [\text{H}_2\text{O}] - (k_{disn} + k_{dtN}) \cdot [\text{N}_2]}{4 \cdot \pi \cdot r_k^2}, \quad (18)$$

где k_{as} , k_{con} , k_{dis} , k_{dt} – константы скоростей реакций (14), (15), (16), (17) соответственно.

Вероятность развала капли начинает превосходить вероятность ассоциации при температуре 26.5°C, что соответствует температуре поверхности воды в области образования тропических ураганов. Для заряженных кластеров конверсия в более крупные комплексы превалирует во всем рассматриваемом диапазоне температур.

Далее для обоих механизмов (14),(15) и (16),(17) образования водяных капель в отдельности (в отсутствие заряда и при его участии) мы можем написать 2 упрощенных аналитических решения уравнения (18), связывающих размер капли с временем ее образования

$$t_n = \frac{1.2 \cdot 10^{-9} \cdot n_w \cdot \ln\left(\frac{r_k}{r_0}\right)}{\sqrt[3]{\mu^2 \cdot \beta_{N_2} \cdot T^{0.5} \cdot ([\text{H}_2\text{O}] \cdot [\text{N}_2] - K_{eq} \cdot [\text{N}_2])}} \quad (19)$$

$$t_c = \frac{3.28 \cdot 10^{-12} \cdot n_w \cdot \ln\left(\frac{r_k}{r_0}\right)}{\sqrt{q^2 \cdot \beta_{N_2} \cdot ([\text{H}_2\text{O}] \cdot [\text{N}_2] - K_{eq} \cdot [\text{N}_2])}}, \quad (20)$$

где q – заряд иона; n_w – концентрация молекул воды в жидкой фазе; μ – дипольный момент молекулы воды; β_{N_2} – поляризуемость азота; r_0 – начальный размер зародыша

$$r_0 = \sqrt[6]{\frac{\mu^4}{1.5 \cdot (k \cdot T)^2}}, \quad (21)$$

k – постоянная Больцмана; K_{eq} – константы равновесия для соответствующих механизмов

$$K_{eq} = 6.53 \cdot 10^{24} \cdot \exp\left(-\frac{U}{k \cdot T}\right), \quad (22)$$

U – энергии диполь-дипольного и заряд-дипольного взаимодействия соответственно.

Наиболее эффективно конденсация 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; что, в свою очередь, приводит к затруднению отрыва молекул воды от заряженных капель вследствие более высокой энергии связи и ускорению их удаления из объема под воздействием атмосферного электрического поля.

Таким образом, на основании проведенного рассмотрения можно сделать вывод, что под действием ионизирующего излучения в приземном слое в зоне радиоактивного выброса может происходить резкое падение влажности воздуха, а поступление

радионуклидов в верхние слои тропосферы будет приводить к образованию облаков и выпадению радиоактивных осадков. Контроль соответствующих параметров атмосферы следует включать в общий комплекс мониторинга радиоактивных выбросов.

Для организации мониторинга перспективно использовать малые спутники, позволяющие проводить измерения квазипостоянных и переменных электрических и магнитных полей, вертикального профиля электронной концентрации, температуры плазмы, потоков частиц малой и высокой энергий, массового состава основных ионов и нейтральных компонент, оптической эмиссии.

Для этого целесообразно использовать планируемые к запуску спутники, оснащенные многозональными и гиперспектральными камерами в оптическом диапазоне спектра, а также радиометрами, позволяющими проводить измерения излучения в СВЧ и УКВ диапазонах спектра.

Литература

1. Шарко М.В. Японская техногенная катастрофа и её последствия, - *Мир и Политика*, 2011, №08(59). (<http://mir-politika.ru/175-yaпonskaya-tehnogennaya-katastrofa-i-ee-posledstviya.html>).
2. Боярчук К.А., Карелин А.В., Макриденко Л.А. Перспективы мониторинга из космоса радиоактивных загрязнений на поверхности Земли и в нижних слоях атмосферы, - *Вопросы электромеханики*, 2005, т. 102, с. 183 -209.
3. Боярчук К.А., Салихов Р.С., Сенник Н.А., Туманов М.В., Карелин А.В. Космические технологии мониторинга радиационной обстановки окружающей среды вокруг АЭС, - *Космонавтика и ракетостроение*, 2013 (в печати)
4. Boyarchuk K.A., Karelin A.V., Shirokov R.V. Atmospheric Electric Phenomena Caused by Neutral Clusters, — *Physics of Wave Phenomena*, 2003, Vol. 11, No. 3, pp. 128-139.
5. Боярчук К. А., Карелин А. В., Широков Р. В. Нейтральный кластер и его влияние на электромагнитные эффекты в атмосфере, — *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2005. Т. 41. № 4. С. 1-13.
6. Смирнов В.В. Ионизация в тропосфере, СПб.: Гидрометеиздат, 1992, 312с.
7. Попова Т.Н., Раводина О.В. Спектроскопия двухатомных молекул. Томск: Изд-во ТГУ, 1984.
8. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия. М.: Эдиториал УРСС, 2001.
9. Pulinets S.,A., Boyarchuk K.A., Karelin A.V., et al. // Proc. of IV International Workshop on Magnetic, Electric, and Electromagnetic Methods in Seismology and Vulcanology, September 5-9, 2004. LaLondelesMaures, France.
10. Ферми Э. Термодинамика. Ижевск: Издательский дом Удмуртский университет, 1998.
11. Зацепина Г.Н. Физические свойства и структура воды. М.: Изд-во МГУ, 1998.
12. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы. Л.: Химия, 1972.
13. Боярчук К. А., Карелин А. В., Широков Р. В. Базовая модель кинетики ионизированной атмосферы. М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2006, 203 с.