

## **Физические основы и приборы радиофизического мониторинга из космоса предвестников землетрясений и последствий радиоактивных загрязнений**

К.А. Боярчук, А.В. Карелин, Л.А. Макриденко

*ФГУП «Научно-производственное предприятие — Всероссийский научно-исследовательский институт электромеханики с заводом им. А.Г. Иосифьяна», Россия, 101000, г. Москва, Хоромный тупик, д. 4, avkarelin@mail.ru*

*Путем сравнения результатов проведенных исследований с имеющимися данными о технических характеристиках существующей аппаратуры ДЗЗ, проанализированы возможности адаптации рассматриваемых методов под бортовую аппаратуру КА. Поскольку только комплексный анализ результатов измерений позволит определить вероятность катастрофического землетрясения и последствия радиоактивного загрязнения, то размещать на борту КА следует несколько приборов или нацеливать на поверхность Земли несколько спутников с различным оборудованием, но с одной общей целью.*

*By comparison of results of the spent researches with the available data about technical characteristics of existing equipment of remote sounding of the Earth, possibilities of adaptation of considered methods under onboard equipment are analysed. As only the complex analysis of results of measurements will allow probability of catastrophic earthquake and a consequence of radioactive pollution to place onboard of space satellites some devices follow or to aim at a surface of the Earth some satellites with the various equipment, but with one overall aim.*

### **Введение**

В ближайшее время в рамках Федеральной космической программы до 2015 года будет запущен ряд космических аппаратов дистанционного зондирования, например, таких как КА серии «Метеор-М», КА серии «Канопус-В» и КА серии «Аркон-2». Рассматривая возможности этих КА шире их целевых задач, можно видеть полноценную космическую группировку, позволяющую осуществлять мониторинг природных и техногенных чрезвычайных ситуаций с помощью аппаратуры, работающей в различных областях электромагнитного спектра. В данной работе мы рассмотрим физические основы и приборы для радиофизического мониторинга из космоса последствий радиоактивных загрязнений и предвестников катастрофических землетрясений. В обоих случаях проявляются сходные физические эффекты в атмосфере: ионизация продуктами радиоактивного распада атмосферы – образование ионных кластеров – образование нейтральных кластеров [1, 2]. Каждый из этих процессов в свою очередь проявляется в виде конкретных явлений, которые могут быть зарегистрированы дистанционно специальной радиоаппаратурой. Предварительные исследования показали, что особое внимание следует уделять следующим эффектам и методам их регистрации:

- Радиоизлучение атмосферных образований (Метод «Нейтральный кластер» [3]);
- Существенное изменение термодинамических свойств атмосферы (Метод «Поправка химического потенциала» [4]);
- Радиозондирование ионосферы из космоса (Метод «Ионосферный отклик» [5, 6]).

## 1 Радиоизлучение атмосферных образований («Нейтральный кластер»)

В последнее время обнаружен ряд физических эффектов в атмосфере, для объяснения которых не нашлось традиционного объяснения. Например, во время сейсмических событий наблюдается необычное радиоизлучение в диапазоне десятков и сотен МГц: в период землетрясения в Кобе (17.01.1995 г.) на астрономической обсерватории Nishiharima, расположенной в 77 км северо-восточней эпицентра наблюдалось импульсное электромагнитное излучение (ЭМИ) на частоте 22,2 МГц (13,5 м) [7], подобное наблюдалось и во время Спитакского землетрясения [8]. Подробные измерения в районе о. Крит на частотах 43 и 51 МГц определили, что источником излучения являются атмосферные зоны в области высот от 100 м до 8 км над зоной будущего землетрясения [9].

Особенностью рассматриваемого диапазона частот является то, что это излучение не отражается ионосферой и регистрируется радиолокаторами непосредственно над местом будущего катаклизма (землетрясения или радиоактивного источника). В работах [2, 3, 10, 11] была высказана рабочая гипотеза, объясняющее это явление. Рассмотрим подробнее:

Основными источниками ионизации в нижней атмосфере, помимо антропогенных источников, являются естественная радиоактивность почвы и воздуха, а также космические лучи. Причем более 60% общей производительности природных источников ионизации дает излучение почвы, так, например, в почвах, характерных для центральной России, обнаруживаются все три основных излучателя:  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ . Следует отметить, что в момент подготовки землетрясений в сейсмоопасных районах наблюдаются эманаии  $\alpha$ -активного радона из земной коры [12, 13], который вносит значительный вклад и ионизацию воздуха.

Смесь газов атмосферы Земли, находящаяся под воздействием жесткого ионизатора, является низкотемпературной рекомбинационно-неравновесной плазмой (когда температура всех нейтральных частиц в энергетических единицах много меньше энергии возбуждения колебательных состояний молекул, входящих в состав смеси), в которой образуется большое количество различных заряженных и нейтральных компонентов с концентрациями, не характерными для атмосферного воздуха в обычных условиях. Атмосферные ионы — это электрически заряженные частицы в атмосфере размерами от молекулярных ионов до частиц атмосферного аэрозоля.

Под действием ионизирующего излучения в атмосфере в первоначальный момент возникает большое количество ионов  $O_2^+$  как в результате непосредственной ионизации, так и в результате реакции перезарядки с первоначальным ионом  $N_2^+$  и электронов, которые быстро прилипают к атомам кислорода, т.к. кислород обладает значительной энергией сродства к электрону, образуя отрицательные ионы  $O^-$  и  $O_2^-$ .

Затем в результате быстрых ион-молекулярных реакций за время порядка  $10^{-7}$  с образуются основные элементарные ионы тропосферы  $O^-$ ,  $O_2^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $CO_3^-$  и  $O_2^+$ ,  $NO^+$ ,  $H_3O^+$ . Концентрация электронов столь незначительна, что ими можно пренебречь.

Так как в тропосфере Земли содержится огромное количество молекул водяного пара ( $\sim 10^{17}$  см<sup>-3</sup>), обладающего заметным дипольным моментом  $p = 1,87D$ , то довольно быстро происходит гидратация элементарных ионов и образование ионных комплексов типа  $NO_2^-(H_2O)_n$  и  $NO_3^-(H_2O)_n$ ,  $NO_3^-(HNO_3)_n(H_2O)_m$  и  $O_2^+(H_2O)_n$ ,  $NO^+(H_2O)_n$  и  $H_3O^+(H_2O)_n$ .

Энергия связи гидратной оболочки, например, из семи молекул воды иона  $H_3O^+(H_2O)_7$  составляет 5,4 эВ, а  $OH^-(H_2O)_7 \sim 4,5$  эВ. Следовательно, на разрушение этих двух кластерных ионов на  $H^+$ ,  $OH^-$ ,  $e^-$  и 15 молекул воды требуется затратить 18,8 эВ. В то же время при рекомбинации протона с электроном выделяется всего 13,5 эВ. Таким образом, система гидратированных ионов оказывается энергетически устойчивой.

Наличие подобной оболочки может мешать рекомбинации. Следовательно основными ионами тропосферы с большой точностью можно считать  $\text{NO}_3^-(\text{H}_2\text{O})_n$ ,  $\text{NO}_3^-(\text{HNO}_3)_n(\text{H}_2\text{O})_m$  и  $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_m$ . Среднее время жизни этих ионов может достигать одного часа в обычных условиях. Замедление рекомбинации ионных кластеров может привести к формированию в атмосфере электрически нейтральных кластеров типа  $\text{NO}_3^-(\text{H}_2\text{O})_p\text{H}_3\text{O}^+$ , устойчивость которого определяется, как ионной, так и ковалентной связями, образующихся при столкновении и ассоциации положительных и отрицательных комплексных ионов [14].

Оценим излучательные характеристики диполей нейтральных кластеров в рамках модели жесткого ротатора. Будем рассматривать частный случай симметричного волчка, основного электронного и нулевого колебательного состояния. В этом случае вращательная постоянная молекулы  $B_e$  ( $\text{см}^{-1}$ ) не зависит от вращательного квантового числа  $J$ , а частота излучения вращательно-вращательного перехода  $\nu$  ( $\text{см}^{-1}$ ) с вращательного уровня  $J$  запишется в виде

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

При этом вращательная постоянная может быть представлена в виде

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

где  $h = 6,62 \cdot 10^{-27}$  эрг·с – постоянная Планка;  $c = 3 \cdot 10^{10}$  см/с – скорость света;  $\mu_m$  – приведенная масса молекулы (г);  $r_e$  – равновесное межъядерное расстояние (см).

Интенсивность линий в спектре излучения ротатора может быть записана следующим образом [15]:

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

где  $R$  – матричный элемент электрического дипольного момента перехода (слабо зависит от  $J$ ), а  $N_J$  – 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). В выражении (6) учтено также, что отношение статистических весов  $J$ -го и нулевого состояний равно  $(2J+1)$ .

Функция  $N_J$  имеет максимум по  $J$  при

$$J_{\max} = \sqrt{\frac{k_B T}{2B_e hc}} - \frac{1}{2}. \quad (5)$$

Заметим, что интенсивность излучения (3) также имеет максимум. Однако положение максимума интенсивности не совпадает с максимумом заселенности, поскольку частота входит в выражение (3) в четвертой степени (другими словами, энергия кванта излучения также зависит от  $J$ ). Подставляя (1) и (4) в (5) и беря производную по  $J$ , получим аналитическое выражение для максимума интенсивности ЭМИ, также зависящее только от вращательной постоянной молекулы  $B_e$  и температуры среды  $T$ :

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

Несмотря на некоторую громоздкость, это выражение вполне пригодно для численных расчетов. В нем специально подчеркнуто, что вращательная постоянная, а следовательно и  $J$ , зависит существенным образом от равновесного межъядерного расстояния  $r_e$  (формула (2)). Таким образом, с учетом (2) и (6) получим следующее выражение для максимума частоты ЭМИ, измеряемой в Гц:

$$f(r_e) = \frac{h}{8 \cdot \pi^3 \cdot \mu_m \cdot r_e^2} \cdot (J(r_e) + 1). \quad (7)$$

Устойчивому ЭМИ соответствуют равновесное расстояние  $r_e \approx 2,72 \cdot 10^{-6}$  см и вращательные квантовые числа  $J \approx 6000$ . При этом энергия кулоновского взаимодействия заряженных кластеров, с учетом вращения, будет порядка температуры окружающей среды.

Максимум излучения без учета развала кластеров приходится на частоту 400 МГц, а максимум заселенности соответствует ЭМИ с частотой 180 МГц. Следует, однако, заметить, что при фиксированном межъядерном расстоянии излучения с уровней с  $J > 6000$ , возможно, не будет из-за неустойчивости таких молекулярных комплексов.

Ожидаемый диапазон излучения перекрывается с диапазонами, на которых работают телевизионные и радиопередатчики. Поэтому следует рассчитывать на получение сигнала в диапазонах 108-142 МГц, 148-173 МГц. При полной концентрации нейтральных кластеров  $10^6 \text{ см}^{-3}$  максимальная возможная удельная мощность излучения в широкополосном диапазоне 108-142 МГц составит  $P_{y\partial} = 5 \cdot 10^{-21} \text{ Вт/м}^3$ , полная мощность с объема радиусом  $R = 2,2$  км, высотой  $H = 1,2$  км и радиусом антенны  $R_a = 1,5$  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  $P_{y\partial} = 1,1 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/м}^3$ ,  $P = 3,2 \cdot 10^{-17} \text{ Вт}$ , а ожидаемая амплитуда напряженности электрического поля  $E = 4,1 \cdot 10^{-8} \text{ В/м}$ .

## 2 Существенное изменение термодинамических свойств атмосферы (Метод «Поправка химического потенциала»)

В ряде наблюдений перед землетрясением было обнаружено резкое падение влажности [1]. Существенные изменения влажности в приземном слое допускают теоретическое описание с позиции молекулярно-кинетической теории конденсации.

Зависимость концентрации насыщенных паров воды от температуры  $T_n$  может быть грубо описана с помощью строго получаемой в термодинамике из уравнения Клаузиуса-Клапейрона [16] формулой

$$n = \frac{A}{T_g} \cdot \exp\left(-\frac{U}{k_B T_g}\right), \quad (8)$$

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, т.е. работа выхода молекулы воды из капли или, так называемый, химический потенциал паров воды,  $A$  – постоянная.

Скрытую теплоту испарения на одну молекулу воды можно оценить исходя из теплоты кипения  $Q=40,683$  кДж/моль при температуре кипения ( $T=100$  °C)  $U_0= Q/N_A= 0,422$  эВ, где  $N_A= 6,022 \cdot 10^{23}$ /моль. В молекулярной кинетике эта работа выхода молекулы воды равна энергии диполь-дипольного взаимодействия вращающихся диполей на расстоянии  $r= 2,46$  А (равном примерно радиусу молекулы воды), рассчитанной по формуле [17]

$$U = \frac{2 \cdot \mu_{H_2O}^4}{3 \cdot k_B T_g \cdot r^6}, \quad (9)$$

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 (8) и (9):

$$H(t) = \frac{\exp\left(-\frac{U(t)}{k_B T_g}\right)}{\exp\left(-\frac{U_0}{k_B T_g}\right)} = \exp\left(\frac{U_0 - U(t)}{k_B T_g}\right) = \exp\left(-\frac{0,032 \cdot \Delta U \cdot \cos^2 t}{(k_B T_g)^2}\right), \quad (10)$$

где  $U(t)=U_0+\Delta U \cos^2 t$ ,  $\Delta U$  – 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 (10) с результатами наблюдений [1] перед землетрясением в Колима (Мексика) 21 января 2003г. показало, 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 [17]:

$$U_{cd} = \frac{q^2 \cdot \mu_{H_2O}^2}{3 \cdot k_B T_g \cdot r^4}, \quad (11)$$

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.

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; это, 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.

Абсолютная величина поправки к усредненному химическому потенциалу атмосферы по данным метеонаблюдений, измеряемая в электронвольтах (эВ), может оцениваться по формуле

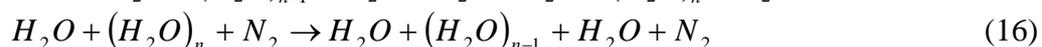
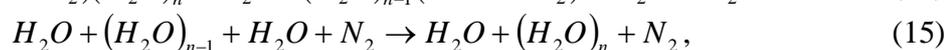
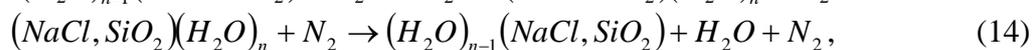
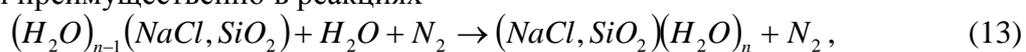
$$\Delta U = 5.8 \cdot 10^{-10} \cdot (20 \cdot T_g + 5463)^2 \cdot \ln\left(\frac{100}{H}\right), \quad (12)$$

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

В гомогенной конденсации выделяют 2 этапа [18]. 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 [19], 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.

Нейтральные и заряженные капли в атмосфере над землей или морем образуются и разваливаются преимущественно в реакциях



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. Конкретное значение температуры доминанции того или иного процесса определяется соленостью океана и концентрацией аэрозолей над его поверхностью.

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.

Поскольку значительное пересыщения 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. Кроме того, 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 [2, 3].

Ассиметрия зарядки и влияние знака вбрасываемых в атмосферу зарядов связано с разницей энергий сродства электронов к молекулам и протонов к атомам. Более детально это описывается высокой подвижностью электрона в капле воды вследствие перезарядки отрицательных ионов и выходом электрона наружу и его беганием по поверхности, в то время как положительный ион облепляется шубой молекул. Перезарядка затруднена и ее следствием может быть рекомбинация с выделением энергии на выброс значительного числа молекул.

Действие ионизирующего излучения в атмосфере приводит к интенсивному образованию центров конденсации плохо распадающихся в обычных условиях. Интенсификация процесса конденсации приводит к нагреву окружающего воздуха. Энергия, которая при этом переходит в нагрев атмосферы, называется латентной или скрытой теплотой. При не очень высокой скорости ионизации существенных вариаций поправка к химическому потенциалу не имеет места только при сочетании следующих параметров: температура воздуха выше 20 °С и относительная влажность выше 70 %. Но в этой области достаточно заметным маркером может оказаться интенсивный нагрев атмосферного воздуха.

Таким образом, сочетание систематического мониторинга пространственно-временной динамики поведения температуры и относительной влажности воздуха с анализом динамики поправки к химическому потенциалу паров воды в атмосфере, может позволить с достаточно высокой вероятностью предсказать сильные землетрясения.

### **3 Радиозондирование ионосферы из космоса (Метод «Ионосферный отклик»)**

В основе этого метода лежит эффект изменчивости характеристик ионосферы (например, ионной и электронной концентрации) над районами радиоактивного загрязнения на поверхности Земли и в нижних слоях тропосферы [5]. Измерение данных характеристик со спутников позволит получать информацию о распространении и уровне радиоактивных загрязнений.

Земная ионосфера очень чувствительна к внешним воздействиям, поэтому ее характеристики подвержены регулярным и нерегулярным вариациям. Обычно режим ионосферы рассматривается исключительно в связи с солнечным и космическим воздействием на нее. Однако существуют исследования, которые показывают, что ионосфера чутко реагирует также на процессы, происходящие в тропосфере [6] и на поверхности Земли. Радиоактивное загрязнение приводит к локальной ионизации в тропосфере и как следствие изменению электрических характеристик последней. В районе радиоактивных выбросов наблюдаются значительные изменения локального электрического поля, что в свою очередь сказывается на состоянии ионосферы.

Тензор проводимости атмосферного воздуха находится в сложной зависимости от высоты, а именно, от поведения заряженных частиц на разных высотах. В нижних слоях атмосферы за счет столкновения заряженных частиц с преобладающим количеством нейтралов проводимость изотропна, но с ростом высоты изотропность тензора проводимости исчезает. В более разреженной атмосфере, а тем более в ионосфере, количество заряженных частиц увеличивается по сравнению с нейтральной составляющей. Магнитное поле Земли приводит к упорядоченному дрейфу ионов и электронов по спирали вдоль силовых магнитных линий. Здесь возникают, помимо удельной проводимости, так называем, проводимость Педерсена и проводимость Холла. Таким образом, в силу анизотропии проводимости, связанной с геомагнитным полем, локальные неоднородности атмосферного электричества в тропосфере, в

частности вариации вертикальной компоненты электрического поля, связанные с полями в облаках радиоактивных выбросов или над ранее загрязненной радиоактивной поверхностью, например, "Южно-Уральский след", могут привести к появлению на уровне ионосферы горизонтальной составляющей компоненты электрического поля величиной порядка, по крайней мере, в несколько единиц мВ/м, такие поля существенны для ионосферы, и приводят к локальным изменениям электронной и ионной концентрации [5]. Таким образом, значительные изменения вертикального электрического поля у поверхности Земли или в нижних слоях тропосферы над большими площадями поверхности приводят к появлению горизонтального электрического поля на ионосферных высотах, которое, в свою очередь, приводит к вариациям, например, электронной и ионной концентраций в ионосфере [5].

В силу анизотропии проводимости, связанной с геомагнитным полем, локальные неоднородности атмосферного электричества в тропосфере, в частности вариации вертикальной компоненты электрического поля, связанные с полями грозных облаков [20, 21], сейсмического и вулканического происхождения [6], а так же вызванные радиоактивными загрязнениями [5, 6], могут привести к появлению на уровне ионосферы только перпендикулярной геомагнитным силовым линиям компоненты электрического поля величиной порядка, по крайней мере, в несколько единиц мВ/м, такие поля существенны для ионосферы, но незначимы для тропосферы.

Предварительные теоретические и экспериментальные исследования на примере аварии в Три-Майл-Айленде США, выполненные с помощью спутника ИНТЕРКОСМОС-19 в ИЗМИРАН [22], показали эффективность данной методики.

### **Заключение**

На основании этого исследования можно сделать выводы о возможности использования штатной аппаратуры КА серии «Метеор-М», «Канопус-В» и космические аппараты КК «Ионозонд» для мониторинга предвестников землетрясений и последствий радиоактивных загрязнений в процессе дистанционного зондирования Земли. В таблице представлена целевая аппаратура для наблюдения этих эффектов.

Таблица 1. Бортовая аппаратура

<b>Физический эффект</b>	<b>Название Метода</b>	<b>Аппаратура</b>	<b>КА</b>
Под действием ионизирующего излучения газа радона в приземном слое может происходить изменение термодинамических параметров воздуха (выделение тепла и падение относительной влажности)	Поправка химического потенциала	СВЧ- радиометр МТВЗА-ГЯ	«Метеор-М» № 1, №2
Влияние вариаций тропосферного электрического поля на характеристики ионосферы	Ионосферный отклик	Комплекс аппаратуры «Ионозонд»	КА «Ионосфера» №1 - №4 КА «Зонд»
Радиоизлучение, возникающее в ионизированном влажном облаке	Нейтральный кластер	Радиоспектрометр	КА «Ионосфера» №1 - №4 КА «Зонд»

На основе проведенного подробного анализа физической природы предвестников землетрясений и доступности их параметров для измерений с помощью существующей бортовой аппаратурой КА можно сделать вывод, что в настоящее время наиболее перспективным для достаточно надежного предсказания возможности катастрофических землетрясений и последствий радиоактивного загрязнения на основе систем ДЗЗ представляется комплекс методов: «Поправка химического потенциала», «Нейтральный кластер» и «Ионосферный отклик».

Из таблицы видно, что мониторинг резкого изменения характеристик приземного слоя атмосферы, возникшего под действием ионизирующего излучения, таких как термодинамические и электрические параметры, может осуществляться на основе СВЧ-радиометров типа МТВЗА КА «Метеор-М» №1 и №2, а также аппаратуры радиозондирования ионосферы МКА «Ионосфера» и МКА «Зонд».

### Литература

1. Pulinetz S.A., Boyarchuk K.A. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*, Springer, 2004, Berlin, Germany, 315 p.
2. Боярчук К.А., Карелин А.В., Широков Р.В. Базовая модель кинетики ионизированной атмосферы. М.: ВНИИЭМ. 2006.
3. 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.537-549.
4. Боярчук К.А., Карелин А.В., Надольский А.В. Мониторинг предвестников землетрясений из космоса на основе метода «химического потенциала», — *Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем*, 2009, Вып. 2 (29), том 14, с. 84 – 93.
5. Boyarchuk K.A., Lomonosov A.M., Pulinetz S.A., Hegai V.V. Ionosphere responds on the radioactive pollution in troposphere. The new remote sensing method, — *BRAS Physics / Supplement, Physics of Vibrations*, 1997, Vol. 61, No. 4, pp. 260 - 266.
6. Пулинец С.А., Хегай В.В., Боярчук К.А., Ломоносов А.М. Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы, — *УФН*, 1998, т. 168, № 5, с. 582 - 589.
7. Maeda K. Pulsed Emission Observed at 22.2 MHz at the Time of the Kobe Earthquake in 1995. In: *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*. Tokyo: TERRAPUB, 1999, 543– 549.
8. Воинов В.В., Гуфельд И.Л., Кругликов В.В. Изв. АН СССР. Эффекты в ионосфере и атмосфере перед Спитакским землетрясением, — *Физика Земли*, 1992, № 3, с. 96-101.
9. Ruzhin Yu., Nomicos C., Vallianatos F. High Frequency Aeismoprecursor Emissions, — *Proc. of Fifteenth International Wroclaw Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC 2000)*. Wroclaw: National Institute of Telecommunications, 2000, Part-II, 512-516.
10. Boyarchuk K.A., Karelin A.V., Oraevsky V.N. Mechanism for generation of the meter range electromagnetic noise from an atmosphere before earthquakes, — *Conference Digest, Asia-Pacific Radio science Conference (AP-RASC'01)*, Chuo University, 2001, Tokyo, Japan, August 1 - 4, 2001, p.363.
11. Oraevsky V.N., Boyarchuk K.A., Ruzhin Yu.Ya., Karelin A.V. About a nature of electromagnetic earthquakes HF precursors, — *Int. Wroclaw Symp. And Exhib. on EMC*, 2002.
12. İnan S., Akgьl T., Seyis C., Saatcılar R., Baykut S., Ergintav S., Baе M. Geochemical monitoring in the Marmara region (NW Turkey): A search for precursors of seismic activity, — *Journal of Geophysical Research*, 2008, Vol. 113, B03401, pp. 1 – 15.

13. Das N.K., Bhandari R.K, Ghose D., Sen P., Sinha B. Anomalous fluctuation of radon, gamma dose and helium emanating from a thermal spring prior to an earthquake, — *Current Science*, 2005, Vol. 89, No. 8, pp. 1399 – 1404.
14. Смирнов В.В. Ионизация в тропосфере. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992.
15. Попова Т.Н., Раводина О.В. Спектроскопия двухатомных молекул. Томск: Изд-во ТГУ, 1984.
16. Ферми Э. Термодинамика. Ижевск: Издательский дом Удмуртский университет, 1998.
17. Зацепина Г.Н. Физические свойства и структура воды. М.: Изд-во МГУ, 1998.
18. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. С.-Пб.: Гидрометеоиздат, 2000.
19. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы. Л. Химия. 1972.
20. Park C.G. , Dejnakarindra M. Penetration of thundercloud electric fields into the ionosphere and magnetosphere.1.Middle and subauroral latitudes, — *J. Geophys. Res.*, 1973. Vol. 78, No 28. P. 6623 - 6633.
21. Hegai V.V., Kim V.P., Illich-Svitych P.V. The Formation of a Cavity in the Night-time Midlatitude Ionospheric E-region above a Thundercloud, — *Planet. Space Sci.*, 1990, Vol. 38, No.6, pp. 703 – 707.
22. Boyarchuk K.A., Pulinets S.A, Depuev V.Kh, Lomonosov A.M, Hegai V.V. New Approach to the Satellit Monitoring of the Radioactive Polution, — Proc. of 32<sup>nd</sup> COSPAR Scientific Assembly, Nagoya, 12-19 julay 1998.