

АКТУАЛИЗАЦИЯ СОЗДАНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ МОНИТОРИНГА РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ МЕСТНОСТИ НА ПЛАТФОРМЕ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. В. Карелин, К. А. Молодцов, В. В. Хегай

Рассмотрены методы и средства дистанционного мониторинга из космоса радиоактивного загрязнения территорий. Выделяются прямые и косвенные методы зондирования следов радиоактивной ионизации. Указываются недостатки прямых методов и дается характеристика косвенных методов, среди которых выделяются: биоиндикация, метод малых газовых составляющих, ионосферный отклик, нейтральный кластер, латентное тепло. На основе молекулярно-кинетической теории конденсации описан процесс отклика атмосферы на радиоактивное загрязнение. Предложено создание специализированной космической системы оперативного мониторинга территории на базе орбитальной группировки малых космических аппаратов, оснащенных комплексами специальной целевой аппаратуры. Отмечается недостаточность получаемой информации о нижних слоях атмосферы, важных для мониторинга радиоактивных загрязнений, с функционирующих в настоящее время зондировщиков атмосферы и предлагается описание перспективного сверхвысокочастотного радиометрического комплекса.

Ключевые слова: орбитальная группировка, дистанционное зондирование, космический аппарат, радиоактивное загрязнение, микроволновый зондировщик, конденсация, ионизация.

В современных условиях растущего энергопотребления в обществе, по-видимому, трудно найти альтернативу ядерной энергетике. 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 электростанциях (АЭС), вызвавших недоверие к ним общества, отсутствие убедительных концепций по ядерной и радиационной безопасности. С ростом же удельной доли атомных электростанций в общем производстве электроэнергии все более актуальной становится разработка новых эффективных методов обнаружения и контроля радиоактивного загрязнения окружающей среды.

АЭС при нормальной работе практически не выбрасывают в атмосферу продуктов, ведущих к существенным радиоактивным загрязнениям. Серьезным исключением являются аварии на ядерных объектах, среди которых следует выделить:

1. 29 сентября 1957 г. около 16:20 по местному времени на радиохимическом заводе по выделению плутония атомного предприятия «Маяк» (ныне – ФГУП «Производственное объединение «Маяк») на Южном Урале вблизи города Кыштым произошел тепловой взрыв одной из емкостей-хранилищ высокоактивных отходов (70 – 80 т), 10% было поднято в воздух на высоту до 1 км, остальную часть отходов разбросало взрывом вокруг емкости [1]. В атмосферу было выброшено 2,1 МКи смеси средне- и долгоживущих радионуклидов.

2. 10 октября 1957 г. на АЭС Windscale Piles (ныне Sellafield), расположенной неподалеку от города Seascale (Великобритания), начался сильнейший по-

жар, вследствие которого радиоактивный дым унесен по прилегающим сельским территориям. Это была авария промышленного уран-графитового реактора с воздушным охлаждением, в атмосферу было выброшено более 20 000 Ки долгоживущего йода-131 (^{131}I). Основной выброс аварии в Windscale проходил через вентиляционную трубу [2].

3. 28 марта 1979 г. примерно в 4:00 незначительный сбой произошел в системе охлаждения АЭС Three Mile Island (ТМИ). Этот случай первый наиболее серьезный в истории США в коммерческом использовании ядерной энергии. Один блок станции был поврежден более чем на 90%. Радиоактивному загрязнению подверглись здание АЭС и окружающая его территория [3].

4. Крупнейшая авария произошла 26 апреля 1986 г. на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) [3]. Суммарная β -активность приземного воздуха над центральными районами России в период с 28 апреля по 2 мая 1986 г. возросла в 10 раз, но не превысила уровня 1963 г., который возник в результате ядерных испытаний в атмосфере [4]. Высокая плотность выпадения йода-131 была отмечена в Швеции и Финляндии [5]: 3 – 5 Ки/км² в сутки. Подобный уровень β -выпадений соответствует повышению интенсивности ионообразования до $3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$. Следует сказать, что в 30-километровой зоне ЧАЭС отмечался более высокий уровень загрязнения йодом-131 (100 – 150 Ки/км²). Но период полураспада данного изотопа невелик (~8 суток) и загрязнение почвы йодом к августу сошло на нет.

Согласно работе [6], наиболее мощное истечение радиоактивных продуктов из аварийного блока наблюдалось в первые 2 – 3-е суток после аварии в северо-западном и северо-восточном направле-

нии. По самолетным данным высота струи 27 апреля превышала 1200 м. Максимальный уровень радиации вблизи АЭС отмечался на высоте 600 м. В последующие дни высота струи не превышала 200 – 400 м. Основной след загрязнения прослеживался по направлению: Чернобыль – Белоруссия – Скандинавия – Океан.

5. В результате землетрясения, произошедшего в Японии 11 марта 2011 г., из строя вышли системы охлаждения по крайней мере на двух АЭС страны. Наибольший ущерб был нанесен станции «Фукусима-1», на четырех энергоблоках которой с 12 марта произошла целая серия взрывов. В результате аварий на территории вокруг станции повысился радиационный фон. Население, проживающее в радиусе 20 километров от АЭС «Фукусима-1» и «Фукусима-2», было эвакуировано. 12 апреля правительство Японии повысило уровень опасности на «Фукусиме-1» до максимального – до семи баллов по Международной шкале ядерных и радиологических событий (International Nuclear Event Scale, INES). Ранее таким образом оценивали только аварию на Чернобыльской АЭС.

Следует отметить, что в течение целого месяца четкой официальной информации о серьезности аварии в Японии не было. Таким образом, для развития атомной энергетики необходимо существование независимого дистанционного контроля за радиационной обстановкой в районе АЭС.

Последняя авария акцентировала необходимость не только в серьезном 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 [7].

Прямые методы мониторинга получили наибольшее распространение, и в настоящее время контроль над радиационной обстановкой основан на методах детектирования ионизирующих излучений, например, использующих различные сцинтилляторы. Реально они позволяют производить измерения с расстояний не более сотен метров. Некоторые типы ионизирующих излучений (α , β) обладают весьма слабой проникающей способностью и не могут быть зарегистрированы 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.

Биоиндикация. Реакция биоты на радиоактивное загрязнение приводит к изменению цветности водоемов или растительных покровов, что может быть зарегистрировано с помощью традиционной спектральной съемки [8].

Данный метод основан на быстрой реакции живых фотосинтезирующих организмов на радиоактивное загрязнение, в частности, изменение цветности водоемов, обеспеченной фитопланктоном. В зависимости от дозы излучения от радиоактивного вещества, сбрасываемого в этом районе, интенсивность и форма спектра флуоресценции фитопланктона приобретает характерный вид в диапазонах 450 – 480 и 650 – 700 нм.

Более медленную реакцию оказывают растительные покровы – от недели до месяца. Но индикация по растительным покровам более продолжительная.

Метод малых газовых составляющих. Быстрые ион-молекулярные реакции ионизированной атмосферы приводят к изменению концентраций малых газовых составляющих, регистрация которых возможна, например, с помощью метода газокорреляционной инфракрасной (ИК) радиометрии или лидарных технологий [9].

Атмосферный воздух под воздействием продуктов радиоактивного распада (γ - и X -лучи) представляет собой низкотемпературную рекомбинационно-неравновесную плазму, где производится огромное число различных заряженных и нейтральных компонент в концентрациях нетипичных для стандартных условий. Известно, что во влажном атмосферном воздухе, возбужденном жестким ионизирующим излучением радиоактивных выбросов атомных электростанций, наблюдается изменение содержания таких малых газовых составляющих, как озон (O_3), гидроксил (ОН), окислы азота (NO и NO_2), а также метана (CH_4) и окиси углерода (CO). Измеряемая концентрация этих молекул отчетливо характеризует дозу поглощенной радиации. Эти газы могут детектироваться с необходимой точностью современными методами газокорреляционной ИК-радиометрии или лидарными технологиями.

Ионосферный отклик. Ионизация атмосферы приводит к изменению основных характеристик в электрической цепи Земля – ионосфера. Эти возмущения могут быть зарегистрированы в ионосфере с помощью бортового ионозонда [9].

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. Измерение данных характеристик со спутников позволит получать информацию о распространении и уровне радиоактивных загрязнений. Предварительные теоретические и экспериментальные исследования на примере аварии на АЭС Three Mile Island (ТМИ) в США, выполненные с помощью спутника «Интеркосмос-19» в ИЗМИРАН и ИОФ РАН, показали эффективность данной методики.

Нейтральный кластер. Во влажной атмосфере, подверженной радиоактивному воздействию, при определенных условиях наблюдается радиоизлучение, которое может быть зарегистрировано специальными радиоспектрометрами [7].

Латентное тепло. Под действием ионизирующего излучения в приземной атмосфере в зоне радиоактивного выброса интенсифицируются процессы конденсации и, как следствие, локально изменяются ее термодинамические характеристики [7].

Многие физические эффекты в природе, в том числе и в атмосфере, связаны с конденсацией. Поэтому ее исследованию посвящено значительное количество работ [10 – 19]. 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 по отношению 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 всех авторов, могут быть получены только из экспериментов для каждого конкретного случая процесса конденсации. Выход из этого положения можно найти, если перейти к молекулярно-кинетической теории конденсации (МКТК) [20].

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 воз-

действием внешнего ионизирующего излучения (солнечные и галактические космические лучи, радон-222, грозовые разряды); 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.

В гомогенной конденсации выделяют 2 этапа. 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 [10], 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.

Зависимость концентрации насыщенных паров воды от температуры T_g может быть грубо описана с помощью строго получаемой в термодинамике из уравнения Клаузиуса – Клапейрона [21] 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 $r = 2,46$ А (равном примерно радиусу молекулы воды), рассчитанной по формуле [22]:

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

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 $U(t) = U_0 + \Delta U \cos^2 t$, ΔU – 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.

Возрастание поправки 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 [7]:

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

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

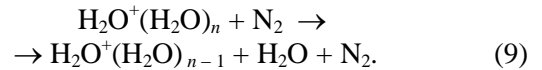
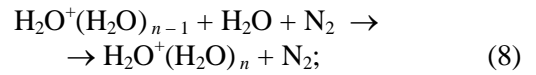
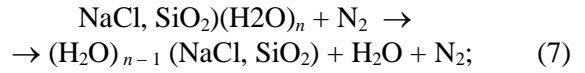
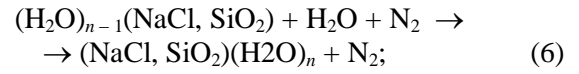
Величина и динамика поведения поправки химического потенциала паров воды во времени в атмосфере является показателем наличия заряженных центров конденсации. Абсолютная величина поправки к усредненному химическому потенциалу атмосферы, измеряемая в электронвольтах (эВ), может оцениваться по формуле:

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

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

Наглядный аналитический анализ МКТК можно провести на основании того, что нейтральные и заряженные капли в атмосфере над землей или мо-

рем образуются и разваливаются преимущественно в реакциях [20]:



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. 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 межмолекулярного выступают как заряженные кластеры, взаимодействующие с молекулами воды по схеме заряд-диполь.

Для организации мониторинга перспективно использовать космические системы (КС), состоящие из малых космических аппаратов (МКА), позволяющих проводить измерения вертикальных и горизонтальных профилей температуры и влажности приземной атмосферы, 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 МКА, оснащенные многозональными и гиперспектральными камерами в оптическом диапазоне спектра, а также радиометрами, позволяющими проводить измерения излучения в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне спектра. Такие МКА могут быть организованы по принципу «аппарат-прибор».

Микроволновые зондировщики являются одними из основных приборов в разделе оперативной метеорологии.

Ключевые параметры целевых характеристик КС радиолокационного наблюдения:

1. Перспективный бортовой пассивный СВЧ радиометрический комплекс (СВЧ-зондировщик) среднего разрешения (1 – 3 км) с целью измерения высотных профилей температуры и влажности атмосферы с особым вниманием к нижним слоям.

2. Анализ характеристик исследуемого объекта диктует необходимость реализации следующих технических параметров СВЧ-зондировщика:

– пространственное разрешение по горизонтали 1 – 3 км;

– возможность получения информации о температуре и влажности атмосферы, включая нижние (1 – 3 км) ее слои, для чего проводить спектральные измерения в диапазонах 15 – 22 ГГц, 50 – 60 ГГц, 80 – 100 ГГц, 170 – 196 ГГц;

– точность измерений радиоярких температур в элементе разрешения не хуже 0,03 – 0,1 К.

СВЧ-зондировщики атмосферы позволяют выполнять определение параметров профилей температуры и влажности атмосферы по измерениям восходящего теплового излучения системы «атмосфера – подстилающая поверхность». Основным достоинством СВЧ-зондировщиков является слабая зависимость от погодных условий в районе измерений и возможность получать информацию о параметрах температуры и влажности атмосферы вблизи поверхности Земли.

Актуальность разработки определяется отсутствием бортовых приборов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для решения задач изучения атмосферы и мониторинга опасных явлений с требуемым пространственным разрешением и дающих необходимую информацию о нижних слоях атмосферы.

Несмотря на довольно большое количество зондировщиков атмосферы, функционирующих в настоящее время, в основном на иностранных космических аппаратах, получение достаточно точной и достоверной информации о нижних слоях атмосферы, с нашей точки зрения, остается проблематичным.

Пространственная (горизонтальная) изменчивость профилей температуры и влажности зависит от влияния различных внешних факторов. Знание локальных вариаций профилей на масштабах порядка 1 – 3 км требуется для решения задач контроля опасных явлений, где такие локальные изменения служат основным индикатором активных процессов ионизации атмосферы.

Варианты возможной технической реализации представлены в [23] в виде СВЧ радиометрических модулей.

СВЧ радиометрический зондировщик измеряет собственное тепловое излучение системы «атмосфера – подстилающая поверхность» в полосе и с пространственным разрешением, определяемыми типом антенной системы. В зависимости от выбранной конфигурации системы (соотношения пространственного разрешения и полосы обзора) возможна непрерывная работа приборов для регулярной

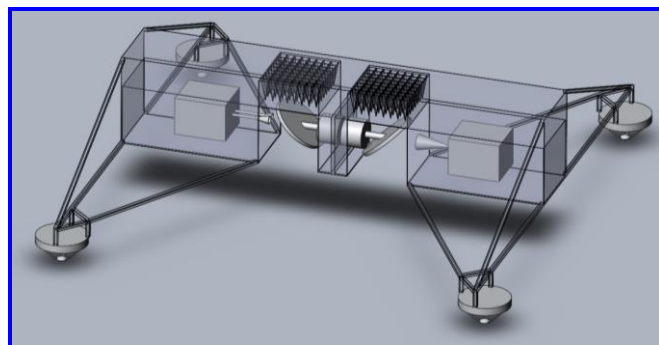
съемки территорий, либо поиск и съемка целевых объектов. Кроме того, требуется совмещение данных нескольких приборов (модулей) для учета дополнительной информации, а также влияния подстилающей поверхности.

На выходе СВЧ-радиометра формируются выходные сигналы, пропорциональные измеряемым радиоярким температурам Земли, которые регистрируются в приборе. Кроме того, собирается дополнительная информация о температурных характеристиках антенно-фидерного тракта и самого приемника. Целевая обработка информации производится на Земле.

КС в перспективе имеет высокую технико-экономическую эффективность, поскольку ориентирована на использование уникального СВЧ радиометрического комплекса (рисунок) [20], востребованного в рамках прикладных и научно-исследовательских работ ДЗЗ из космоса.

Данный СВЧ-комплекс обеспечит проведение спутникового всепогодного круглосуточного глобального мониторинга Земли с высоким пространственным разрешением, позволяющим наблюдать изменчивость полей гидрометеорологических параметров с пространственным разрешением порядка 1 км. Результаты работы целесообразно внедрить на предприятиях Госкорпораций «Роскосмос», «Росатом», Росгидромета, МЧС России, Минприроды России, Минсельхоза России, институтах РАН.

Информация, получаемая с перспективных СВЧ-комплексов, устанавливаемых на КС ДЗЗ, может быть использована для решения задач мониторинга чрезвычайных ситуаций. Однако в настоящее время при контроле и прогнозе чрезвычайных ситуаций данные наблюдения в СВЧ-диапазоне применяются не в полном объеме, вследствие низкого пространственного разрешения (16 – 150 км) существующей СВЧ-аппаратуры. Таким образом, развитие КС мониторинга чрезвычайных ситуаций связано с созданием нового поколения целевой аппаратуры ДЗЗ в СВЧ-диапазоне спектра.



Общий вид СВЧ радиометрического комплекса (вид сбоку)

Поскольку общая масса трехмодульного СВЧ радиометрического комплекса не превысит 100 кг, он может быть использован на платформе любого из существующих МКА («Канопус-В», «Аист-2Д» и т. д.) по принципу «аппарат-прибор». Орбитальная группировка из таких КА может быть востребована как для задач гидрометеорологии и океанографии, так и для мониторинга чрезвычайных ситуаций, включая оперативный мониторинг радиоактивного загрязнения местности и обнаружение краткосрочных предвестников землетрясений.

Литература

1. Никипелов Б. В. Взрыв на южном Урале / Б. В. Никипелов, Е. Г. Дрожко // Природа. – 1990. – № 5. – С. 48–49.
2. Быховский А. В. Горячие аэрозольные частицы при техническом использовании атомной энергии / А. В. Быховский, О. М. Зараев. – Москва : Атомиздат, 1974. – 253 с.
3. Израэль Ю. А. Радиоактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий / Ю. А. Израэль. – Санкт-Петербург : Прогресс-Погода, 1996. – 355 с.
4. Смирнов В. В. Ионизация в тропосфере / В. В. Смирнов. – Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 1992. – 312 с.
5. Pöllänen R. Transport of Radioactive particles from the Chernobyl Accident / R. Pöllänen, I. Valkama, H. Toivonen // Atmospheric Environment. – 1997. – Vol. 31. – No. 21. – P. 3575–3590.
6. Израэль Ю. А. Радиоактивное загрязнение природных сред в зоне аварии на Чернобыльской АЭС / Ю. А. Израэль, В. Н. Петров, С. И. Авдюшин [и др.] // Метеорология и гидрология. – 1987. – № 2. – С. 5–18.
7. Боярчук К. А. Базовая модель кинетики ионизированной атмосферы / К. А. Боярчук, А. В. Карелин, Р. В. Широков. – Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2006. – 204 с.
8. Ефременко В. В. Некоторые результаты модельного эксперимента по трехканальной обработке многозональных изображений / В. В. Ефременко, А. В. Мошков, А. А. Семенов [и др.] // Труды Всероссийской научной конференции «Физические проблемы экологии». – Москва, 1998. – Т. 1. – С. 28.
9. Boyarchuk K. A. Ionosphere response on the radioactive pollution in troposphere. The new remote sensing method / K. A. Boyarchuk, A. M. Lomonosov, S. A. Pulnits [et. al.] // BRAS, Physics / Supplement Physics of Vibrations. – 1997. – Vol. 61. – No. 4. – P. 260–266.
10. Грин Х. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы : Пер. с англ. / Х. Грин, В. Лейн. – Ленинград : Химия. Ленинградское отделение, 1969. – 426 с. : ил.
11. Зельдович Я. Б. К теории образования новой фазы кавитации / Я. Б. Зельдович // ЖЭТФ. – 1942. – Т. 12. – Вып. 11–12. – С. 524–538.
12. Shankar P. N. A kinetic theory of steady condensation / P. N. Shankar // J. Fluid Mech. – 1970. – Vol. 40. – No. 5. – P. 411–422.
13. Черняк В. Г. Кинетическая теория испарения и конденсационного роста сферических частиц / В. Г. Черняк, А. Е. Маргилевский // ТВТ. – 1980. – Т. 18. – № 5. – С. 1032–1039.
14. Ивченко И. Н. Исследование конденсационного роста и испарения водяных капель в воздухе / И. Н. Ивченко // ДАН СССР. – 1984. – Т. 274. – № 3. – С. 572–575.
15. Ивченко И. Н. Обобщение теории испарения сферических капель в диффузионном режиме / И. Н. Ивченко, В. А. Никишин // ДАН СССР. – 1984. – Т. 277. – № 5. – С. 1111–1114.
16. Русанов А. И. К теории зародышеобразования на заряженных ядрах / А. И. Русанов, Ф. М. Куни // Коллоидный журнал. – 1982. – Т. 54. – № 5. – С. 934–941.
17. Гордиец Б. Ф. Кинетика изотермических процессов гомогенной конденсации / Б. Ф. Гордиец, Л. А. Шелепин, Ю. С. Шмоткин // Труды ФИАН : Кинетика низкотемпературной плазмы и газовые лазеры. – 1984. – Т. 145. – С. 189–219.
18. Матвеев Л. Т. Физика атмосферы : Учеб. для студентов вузов, обучающихся по направлению «Гидрометеорология» и специальности «Метеорология» / Л. Т. Матвеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 2000. – 777, [1] с. : ил.
19. Семенченко Б. А. Физическая метеорология : Учеб. для студентов вузов, обучающихся по направлению «Гидрометеорология» и специальностям «Гидрология», «Метеорология», «Океанология» / Б. А. Семенченко. – Москва : Аспект Пресс, 2002. – 414, [1] с. : ил.
20. Хегай В. В. Молекулярно-кинетическая теория конденсации в атмосфере и ее применения / В. В. Хегай, А. В. Карелин // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2021. – Т. 185. – № 6. – С. 11–19.
21. Ферми Э. Термодинамика / Э. Ферми. – Ижевск : Издательский дом «Удмуртский университет», 1998. – 163 с.
22. Зацепина Г. Н. Физические свойства и структура воды / Г. Н. Зацепина. – 3-е изд., перераб. – Москва : Изд-во МГУ, 1998. – 183 с. : ил.
23. Перспективный подход к созданию космической системы мониторинга чрезвычайных ситуаций / А. В. Карелин, В. П. Саворский, М. Т. Смирнов [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. – 2017. – № 2 (95). – С. 111–116.

Поступила в редакцию 09.06.2023

Александр Витальевич Карелин, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, т. 8 (495) 513-54-01, e-mail: avkarelin@mail.ru.

Кирилл Алексеевич Молодцов, инженер, т. 8 (495) 513-40-88, e-mail: kir-molodcov@yandex.ru. (АО «ЦНИИмаш»).

Валерий Варламович Хегай, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, т. 8 (495) 851-97-80, e-mail: hegai@izmiran.ru. (ИЗМИРАН).

UPDATING THE MATTER OF CREATION OF AN ORBITAL CONSTELLATION FOR MONITORING RADIOACTIVE CONTAMINATION OF AN AREA BASED ON THE SMALL SPACECRAFT PLATFORM

A. V. Karelin, K. A. Molodtsov, V. V. Khagai

Methods and means of remote monitoring from space of radioactive contamination of territories are considered. There are direct and indirect methods for studying traces of radioactive ionization. The disadvantages of direct methods are indicated and the characteristics of indirect methods are given, among which the following stand out: bioindication, method of trace gas components, ionospheric response, neutral cluster, latent heat. Based on the molecular kinetic theory of condensation, the process of the atmosphere's reaction to radioactive contamination is described. It is proposed to create a specialized space system for operational surveillance of a territory on the basis of an orbital constellation of small spacecraft equipped with complexes of special target equipment. The insufficiency of information on the lower layers of the atmosphere, important for monitoring radioactive contamination, obtained from currently operating atmospheric probes is noted, and a description of a promising microwave radiometric complex is proposed.

Keywords: orbital constellation, remote sensing, spacecraft, radioactive contamination, microwave sounder, condensation, ionization.

References

1. Nikipelov B. V. Explosion in the Southern Urals / B. V. Nikipelov, Ye. G. Drozhko // Priroda (Nature) science journal. – 1990. – No. 5. – P. 48–49.
2. Bykhovsky A. V. Hot aerosol particles at the technical use of atomic energy / A. V. Bykhovsky, O. M. Zarayev. – Moscow : Atomizdat, 1974. – 253 p.
3. Izrael Yu. A. Radioactive fallout after nuclear explosions and accidents / Yu. A. Izrael. – Saint-Petersburg : Progress-pogoda, 1996. – 355 p.
4. Smirnov V. V. Ionization in the troposphere / V.V. Smirnov. – Saint-Petersburg : Gidrometeoizdat, 1992. – 312 p.
5. Pöllänen R. Transport of Radioactive particles from the Chernobyl Accident / R. Pöllänen, I. Valkama, H. Toivonen // Atmospheric Environment. – 1997. – Vol. 31. – No. 21. – P. 3575–3590.
6. Izrael Yu. A. Radioactive contamination of natural environments in the accident zone at Chernobyl NPP / Yu. A. Izrael, V. N. Petrov, S. I. Avdyushin [et al.] // Russian Meteorology and Hydrology. – 1987. – No. 2. – P. 5–18.
7. Boyarchuk K.A. Basic model of ionized atmosphere kinetics / K. A. Boyarchuk, A. V. Karelin, R. V. Shirokov. – Moscow: FGUE 'NPP VNIIEEM', 2006. – 204 p.
8. Yefremenko V. V. Some results of a simulated experiment on three-channel processing of multispectral images / V. V. Yefremenko, A. V. Moshkov, A. A. Semyonov [et al.] // Proceedings of the All-Russian Scientific Conference 'Physical Problems of Ecology. Physical Ecology'. – Moscow, 1998. – V. 1. – P. 28.
9. Boyarchuk K. A. Ionosphere response on the radioactive pollution in troposphere. The new remote sensing method / K. A. Boyarchuk, A. M. Lomonosov, S. A. Pulnits [et. al.] // BRAS, Physics / Supplement Physics of Vibrations. – 1997. – Vol. 61. – No. 4. – P. 260–266.
10. Green H. Aerosols – dust, smoke and fog : Translated from English / H. Green, V. Leyn. – Leningrad : Khimiya (Chemistry). Leningrad branch, 1969. – 426 p. : with figures.
11. Zeldovich Ya. B. On the theory of formation of a new phase of cavitation / Ya. B. Zeldovich // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 1942. – V. 12. – Issues 11 – 12. – P. 524–538.
12. Shankar P. N. A kinetic theory of steady condensation / P. N. Shankar // J. Fluid Mech. – 1970. – Vol. 40. – No. 5. – P. 411–422.
13. Chernyak V. G. Kinetic theory of evaporation and condensation growth of spherical particles / V. G. Chernyak, A. Ye. Margilevsky // High Temperature. – 1980. – V. 18. – No. 5. – P. 1032–1039.
14. Ivchenko I. N. Study of condensation growth and evaporation of water droplets in the air / I. N. Ivchenko // Proceedings of the USSR Academy of Sciences. – 1984. – V. 274. – No. 3. – P. 572–575.
15. Ivchenko I. N. Generalization of the theory of evaporation of spherical droplets in diffusion mode / I. N. Ivchenko, V. A. Nikishin // Proceedings of the USSR Academy of Sciences. – 1984. – V. 277. – No. 5. – P. 1111–1114.
16. Rusanov A. I. On the theory of nucleation on charged nuclei / A. I. Rusanov, F. M. Kuni // Colloid Journal. – 1982. – V. 54. – No. 5. – P. 934–941.
17. Gordiets B. F. Kinetics of isothermal processes of homogeneous condensation / B. F. Gordiets, L. A. Shelepin, Yu.S. Shmotkin // Lebedev Physical Institute proceedings : Kinetics of low-temperature plasma and gas lasers. – 1984. – V. 145. – P. 189–219.
18. Matveyev L. T. Atmospheric physics : Textbook for university students studying in the discipline of 'Hydrometeorology' and in the specialty 'Meteorology' / L. T. Matveyev. – 3rd edition, revised and updated. – Saint-Petersburg : Gidrometeoizdat, 2000. – 777, [1] p. : with figures.
19. Semyonchenko B. A. Physical meteorology : Textbook for university students studying in the discipline of 'Hydrometeorology' and in the specialties 'Hydrology', 'Meteorology' and 'Oceanology' / B. A. Semyonchenko. – Moscow : Aspect Press, 2002. – 414, [1] p. : with figures.
20. Khagai V. V. Molecular kinetic theory of condensation in the atmosphere and its application / V. V. Khagai, A. V. Karelin // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – 2021. – V. 185. – No. 6. – P. 11–19.

21. Fermi E. Thermodynamics / E. Fermi. – Izhevsk : ‘Udmurt University’ publishing house, 1998. – 163 p.
22. Zatssepina G. N. Physical properties and structure of water / G. N. Zatssepina. – 3rd edition, revised. – Moscow : MSU Publishing House, 1998. – 183 p. : with figures.
23. Promising approach to development of a space system for monitoring of disasters / A. V. Karelin, V. P. Savorsky, M. T. Smirnov [et al.] // Cosmonautics and rocket engineering. – 2017. – No. 2 (95). – P. 111–116.

*Aleksandr Vitalyevich Karelin, Doctor of Physics and Mathematics (D. Sc.), Chief Researcher,
tel.: +7 (495) 513-54-01, e-mail: avkarelin@mail.ru.*

*Kirill Alekseyevich Molodtsov, Engineer, tel.: +7 (495) 513-40-88, e-mail: kir-molodzov@yandex.ru.
(JC «TSNIIMASH»).*

*Valery 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 of RAS).*