

ПЕРСПЕКТИВЫ МОНИТОРИНГА ИЗ КОСМОСА РАДИОАКТИВНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ И В НИЖНИХ СЛОЯХ АТМОСФЕРЫ

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, 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, а также отсутствия убедительных концепций ядерной и радиационной безопасности [1]. В то же время атомные электростанции 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 тепловой взрыв емкости-хранилища высокоактивных отходов предприятия «Маяк» на Южном Урале вблизи г. Кыштым в конце сентября 1957 г., аварию в Уиндскейле (Великобритания) в октябре 1957 г., аварию на атомной электростанции в Три-Майл-Айленде (США) в 1979 г. и крупнейшую аварию на Чернобыльской АЭС в апреле 1986 г. [2]. Поэтому с ростом удельной доли атомных электростанций в общем производстве электроэнергии все более актуальной становится разработка новых эффективных методов дистанционного обнаружения и контроля радиоактивного загрязнения окружающей среды.

Следует также отметить распространение радиоактивных загрязнений вследствие применения в региональных конфликтах боеприпасов, содержащих обедненный уран. Содержание радиоактивного изотопа в обедненном уране относительно мало, и радиоактивность обедненного урана на 40% ниже, чем у природного. Но из этого вовсе не следует, что обедненный уран не радиоактивен. В районе боевых действий в Ираке по разным оценкам осталось от 300 до 800 т этого материала, во время боснийской войны 1994-1995 гг. ВВС США выпустили примерно 10 тысяч подобных бомб

и еще 31 тысячу - во время противостояния в Косово [3]. В 2000 г. специалисты Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН принимали участие в работе межведомственной группы экспертов, созданной совместным приказом Минатома, Минобороны и Минздрава России для оценки возможных последствий применения силами НАТО в Югославии боеприпасов с обедненным ураном для здоровья людей. Итоги работы комиссии были не утешительные. И хотя не было обнаружено документальных доказательств повышения заболеваемости людей лейкемией вследствие радиационных эффектов, было показано, что основным поражающим фактором является химическая активность урана [4].

Поэтому разработка систем наднационального контроля за распространением радиоактивных загрязнений является одной из приоритетных задач космического мониторинга в 21 веке.

Основная концепция дистанционного зондирования Земли из космоса была заложена в 70 – 80-е гг., когда были запущены первые спутники типа «Landsat», «Ресурс-О» и «Алмаз» и была создана соответствующая аппаратура, работающая в микроволновом диапазоне спектра как в активном, так и в пассивном режимах, а также в оптическом диапазоне спектра — от ультрафиолетового до ближнего инфракрасного [5]. Экономически целесообразно обосновывать методы дистанционного определения радиоактивных загрязнений на этих, уже хорошо развитых методиках и существующем специальном оборудовании.

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.

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. Так, например, при Чернобыльской аварии измерение с самолетов и вертолетов велось, в основном, γ - спектрометрической аппаратурой (с помощью полупроводниковых гамма-спектрометров), а уже в ла-

бораториях для анализа проб, взятых на местности, использовался полный комплекс современных спектрометрических и радиохимических методов, которые позволяют с высокой точностью измерить интенсивности γ -, α - и β - излучателей [2]. Поэтому назвать прямые методы измерения радиоактивных загрязнений дистанционными можно только с большой натяжкой.

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. Так, интенсивность ионообразования в атмосфере прямо связана с уровнем ее радиоактивного загрязнения. Например в период массовых испытаний ядерного оружия в атмосфере к 1963 г. электропроводность атмосферы увеличилась за счет ионообразования на 90% по сравнению с 1959 г., что привело к уменьшению градиента потенциала электрического поля на 36% [6]. После прекращения испытаний ядерного оружия в атмосфере общее загрязнение уменьшилось, но в то же время широкое развитие атомной энергетики постепенно загрязняет атмосферу неизбежно образующимися продуктами нормальных технологических выбросов АЭС и заводов по переработке ядерного топлива [7].

В последнее время появились отдельные работы, подтверждающие перспективность использования косвенных методов для дистанционного обнаружения радиоактивных загрязнений. Стимулом для этих работ послужила информация о многочисленных экспериментах по радиолокации облаков выбросов АЭС во время Чернобыльской аварии [8], по регистрации свечения ионизированного воздуха [9]. Последующие научные исследования показали преждевременность выводов некоторых авторов.

Однако предварительные исследования, проводимые с начала 90-х гг. в научно-исследовательских учреждениях Российской академии наук и Роскосмоса показали, что для разработки методов и систем мониторинга из космоса радиоактивных загрязнений в настоящее время наиболее перспективно использовать следующие эффекты:

- биоиндикацию. Реакция биоты на радиоактивное загрязнение приводит к изменению цветности водоемов или растительных

покровов, что может быть зарегистрировано с помощью традиционной спектральной съемки;

- метод малых газовых составляющих. Быстрые ион-молекулярные реакции ионизированной атмосферы приводят к изменению концентраций основных малых газовых составляющих, регистрация которых возможна, например, с помощью метода газокорреляционной ИК-радиометрии;

- ионосферный отклик. Ионизация атмосферы приводит к изменению основных электрических характеристик в цепи тропосфера-ионосфера. Эти возмущения могут быть зарегистрированы в ионосфере с помощью бортового ионозонда;

- нейтральный кластер. Во влажной атмосфере, подверженной радиоактивному воздействию, при определенных условиях наблюдается радиоизлучение, которое может быть зарегистрировано специальными радиоспектрометрами;

- латентное тепло. Под действием ионизирующего излучения в приземном слое в зоне радиоактивного выброса может происходить резкое падение влажности воздуха.

Биоиндикация 1

Одной из экологических проблем является радиоактивное загрязнение океана, происходящее от источников различных типов. Задача контроля над этими загрязнениями может быть решена при использовании методов дистанционного зондирования. Так, в течение ряда лет в Институте общей физики РАН проводились исследования, которые показали, что одним из путей решения проблемы является дистанционное измерение спектров флуоресценции фитопланктона (фотосинтезирующие одноклеточные и микроскопические одиночные или колониальные водоросли), которые, как известно, очень широко распространены в океане и могут быть использованы как естественный биологический маркер различных загрязнений [10-12].

В проведенных экспериментах были, в частности, исследованы изменения, происходящие в форме спектра флуоресценции фитопланктона под воздействием радиации. Сравнивались флуоресцентные спектры образцов фитопланктона, которые были выращены и поддерживались в течение всего эксперимента в абсолютно одинаковых условиях (температура, освещение и т.д.). Единственным различием между сравниваемыми образцами фитопланктона было различие величины полученной данным образцом радиоактивной дозы облучения [13].

Гамма-облучение образцов проводилось на микротроне тормоз-

ным излучением электронов энергии 30 МэВ или гамма-лучами от радиоактивного источника нейтронов (Ra-Be). После облучения радиацией в образцах фитопланктона излучением азотного лазера возбуждалась флуоресценция. Оптическая система фокусировала флуоресцентное излучение фитопланктона на входную щель полихроматора оптически сопряженного с многоканальным спектроанализатором. Для одновременной записи спектров флуоресценции в относительно широком диапазоне 320-720 нм использовалась дифракционная решетка с относительно малой дисперсией - 150 штрихов/мм.

В качестве примера на рис.1 приведены характерные спектры флуоресценции при одновременном облучении нескольких образцов фитопланктона на микротроне тормозным излучением электронов. Были обнаружены характерные изменения в спектре флуоресценции фитопланктона в диапазонах 450-480 и 650-700 нм при разных дозах облучения. Таким образом, измеряя спектр флуоресценции водоемов, можно надеяться получить информацию о возможно радиоактивном загрязнении. Следует заметить, что характерные изменения в спектре для данного типа загрязнения различимы с химическим загрязнением, температурными или световыми изменениями в окружающей среде [14].

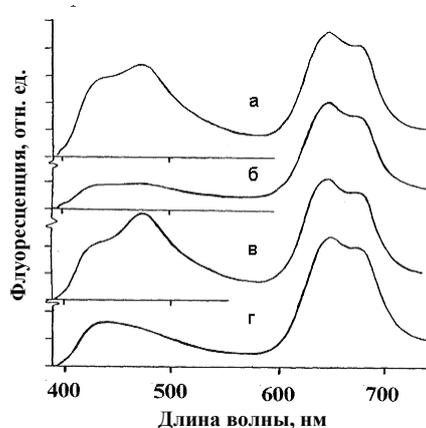


Рис.1. Спектры флуоресценции образцов фитопланктона, находящегося под действием жесткого излучения:

***a* – контрольный образец; *б* – стимулирующий эффект малой дозы в несколько десятков рентген; *в* – стимулирующий эффект средней дозы в несколько сотен рентген; *г* – эффект стагнации фитопланктона при сильной дозе в несколько сотен тысяч рентген**

В качестве источника зондирующего излучения может использоваться Солнце. В частности, классические спектрофотометрические методы исследования поверхности Земли [15], использующие Солнце в качестве источника световой энергии, широко применяются для оценки урожайности, контроля загрязнений, составления метеопрогнозов, исследования биопродуктивности океана и контроля параметров атмосферы. Собственно изменение спектрального состава восходящего от объекта излучения по сравнению с исходным, падающим возникает в результате следующих процессов: спектрально-селективного поглощения излучения в атмосфере и объекте зондирования, спектрально-селективного диффузного отражения, упругого (без изменения частоты) рэлеевского Ми-рассеяния оптического излучения, возбуждения флуоресценции и неупругого (комбинационного) рассеяния. Прежде всего излучение Солнца проходит через атмосферу, частично поглощается и рассеивается (в частности именно рэлеевское рассеяние обуславливает голубой цвет неба) и уже излучение с трансформированным спектром падает на объект зондирования. Далее происходит селективное отражение от поверхности объекта как прямого света источника, так и света, рассеянного в атмосфере и в окружающих объектах. Этот процесс дает второй вклад в сигнал, принимаемый аппаратурой. Наконец часть света, проникающего в объект зондирования, испытывает там селективное поглощение, рассеяние, возбуждает флуоресценцию и комбинационное рассеяние, и все эти процессы также вносят свой вклад в суммарную амплитуду сигнала и определяют результирующую цветность или спектральный состав сигнала.

Таким образом, представляется возможным проведение мониторинга радиоактивного загрязнения поверхности путем картирования спектров флуоресценции в диапазоне длин волн 320-720 нм. Данный эффект есть результат реакции живых организмов на радиоактивное загрязнение, в частности изменение цветности фитопланктона в водоемах и шельфовой зоне океана, который имеет наиболее быструю реакцию на изменение концентрации радиоактивных веществ.

Биоиндикация 2

Состояние процессов жизнедеятельности биоорганизмов на поверхности Земли, например растительного покрова, также как фитопланктона в водоемах, резко зависит от загрязнения окружающей среды и выражается в резких изменениях её характеристик, влияющих на рассеяние света. Растительный покров также чувств-

вителин к изменению радиоактивного фона. Однако его реакция на загрязнение более медленная, чем у фитопланктона и носит накопительный, интегральный характер. Этот эффект вероятно можно использовать для мониторинга радиоактивного загрязнения, вызванного, например, применением слаборадиоактивных боеприпасов на территории бывшей Югославии и Ирака.

В Институте радиотехники и электроники РАН (ИРЭ) группой В.В. Ефременко проводились работы по обработке спектрозональных изображений поверхности Земли, подверженной радиоактивному загрязнению [16]. Известно, что почвы имеют возрастающую спектральную кривую, а растительные сообщества вогнутую с минимумом в красной зоне видимого диапазона, локальным максимумом в зеленой зоне и резким скачком спектральной яркости в ближней ИК-зоне. Это позволяет проводить анализ изображений местности, пораженной радиоактивным загрязнением, на основе выводов о степени угнетенности биомассы в исследуемом районе (рис. 2). Параллельная радиолокационная съемка с помощью радара с синтезированной апертурой с последующей покластерной сравнительной обработкой изображений может расширить информационную емкость результатов зондирования.

Для примера разделения различных природных образований в различных состояниях были исследованы изображения промзоны Чернобыльской АЭС, находящейся слева от пруда-охладителя (рис.3), полученные различными методами. Данный фрагмент исследуемой поверхности включает в себя лесные массивы с различной степенью радиоактивного поражения. На рис. 3,а представлено изображение спектрозонального сканера МСУ-Э (27.04.97), обработанное при помощи метода нормированной разности; на рис. 3,б – снимок радиолокатора с синтезированной апертурой L - диапазона, полученный на вертикальной поляризации (HV) в октябре 1994 г., а также изображение, обработанное по методике совместной попиксельной сравнительной обработки – рис. 3,в. При построении изображений на основе результатов кластеризации элементы разрешения, относящиеся к одному кластеру, представляют одинаковым цветом. Пиксели с высокими значениями видеосигнала (рис.3,а) представлены более светлыми цветами, а элементам разрешения с более низкими значениями соответствуют более темные тона.

По рис. 3,а заметно, что зеленая лесная растительность (светло-желтый цвет) в основном располагается в нижнем правом углу, угнетенная растительность без зелени (розовый и красный) наблюдается к северо-западу. На радиолокационном изображении (рис. 3,б) растительность выделяется светло-желтым цветом. Причем, если сравнивать с оптическим изображением (рис. 3,а), можно заметить,

что растительность занимает большую площадь. Этот факт следует, по-видимому, объяснить тем, что сигнал радиолокатора с синтезированной апертурой в данном диапазоне не способен различать лесные массивы в различных состояниях, в том числе отделить угнетенный лес с редкой зеленью от леса с густым зеленым покровом. Розовым и красным цветами, по-видимому, представлены почвенные покровы или полностью вывалившиеся леса.

По рисунку, соответствующему совместной обработке (рис. 3,в), заметно, что выделяются еще два-три кластера, не представленные на изображениях до совместной обработки. Это, по всей видимости, кластеры угнетенной растительности, которые на изображении (рис. 3,б) идентифицировались как один кластер - лесная растительность, а на изображении (рис. 3,а) характеризовались кластером с переходным состоянием между растительностью и почвой [16].

Увеличение пространственного разрешения средств дистанционного зондирования Земли из космоса, а также создание гиперспектрометров позволяет надеяться на создание полноценных систем мониторинга радиоактивных загрязнений, основанных на вышеперечисленных эффектах и методиках обработки [17].

Метод малых газовых составляющих

Одним из факторов, влияющих на радиационные характеристики атмосферы в оптическом и ИК-диапазонах спектра, является ее газовый состав. Под воздействием продуктов радиоактивного распада воздух превращается в низкотемпературную рекомбинационно-неравновесную плазму, где производится огромное число различных заряженных и нейтральных компонент в концентрациях не типичных для стандартных условий [18]. 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). Измеряемая концентрация этих молекул – «атмосферных маркеров» – отчетливо характеризует дозу поглощенной радиации [19].

Для оперативных расчетов нами была создана кинетическая модель ионизированной атмосферы, которая включает в себя около 4000 реакций, в которых участвуют 145 компонентов. Ранее модель была использована для решения ряда фундаментальных и прикладных задач, связанных с физикой атмосферы, – очистка от вредных выбросов, дистанционное зондирование окружающей среды, предсказание и оценка последствий природных катаклизмов, получение информации о механизмах и скоростях различных процессов, про-

исходящих в газовых смесях близких по своему химическому составу к атмосферному [20-24].

При анализе состава ионизированной атмосферы с целью поиска наиболее подходящих атмосферных маркеров радиоактивных загрязнений следует обращать внимание на те компоненты, которые наиболее устойчивы к вариациям начальных концентраций исходных реагентов, а также нарабатываются в достаточном для дистанционного обнаружения количестве. На рис. 4 а,б представлены характерные кривые зависимости изменения концентраций со временем на промежутке 0-60 с при мощности поглощенной дозы $d = 0,42$ рад/с, $T = 293$ К, влажности 90 %.

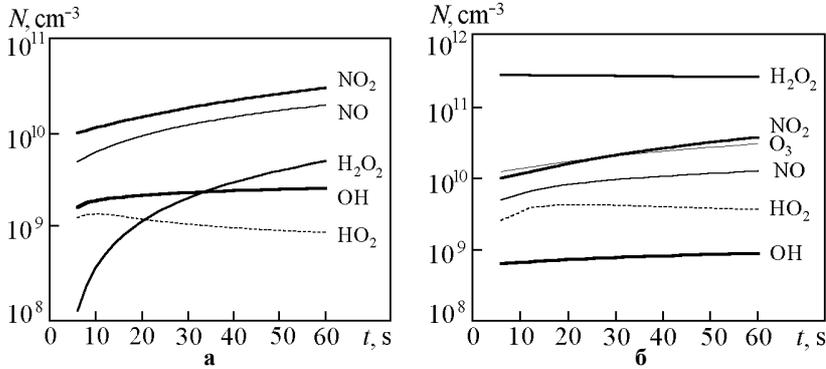


Рис.4. Зависимость концентраций некоторых нейтральных компонент ионизированного воздуха N от длительности радиационного воздействия при начальных концентрациях: а - $[\text{OH}]=[\text{H}_2\text{O}_2]=[\text{HO}_2]=0$; б - $[\text{OH}]=1 \cdot 10^6$ см^{-3} ; $[\text{H}_2\text{O}_2]=2,7 \cdot 10^{11}$ см^{-3} ; $[\text{NO}]=2,7 \cdot 10^9$ см^{-3} ; $[\text{NO}_2]=[\text{N}_2\text{O}]=8 \cdot 10^9$ см^{-3}

Воздух, проходящий по системе специальной вентиляции атомной электростанции, перед тем как выйти наружу находится какое-то время в контакте с ионизирующим излучением, но недоступен для наружного мониторинга. За этот промежуток времени в нем уже успевает накопиться некоторое количество продуктов радиолиза. Поэтому нас должно интересовать состояние среды при характерных временах воздействия порядка 0,5-1 мин. Из рисунка видно, что интересующие нас концентрации при данной скорости ионизации начинают приближаться к стационарным значениям при $t_1 > 20$ с.

В работе [19] был сделан вывод, что наиболее устойчивыми компонентами низкотемпературной плазмы воздуха являются озон O_3 , гидроксил OH , окислы азота NO и NO_2 , которые и должны рассматриваться как наиболее вероятные претенденты на роль ат-

мосферных маркеров радиоактивного загрязнения. При этом измеряемые концентрации указанных молекул будут давать однозначную характеристику мощности поглощенной дозы (или скорости ионизации), а не самой поглощенной дозы.

Содержание O_3 и NO_2 в тропосфере может быть измерено непосредственно, например лидарными методами [21]. Концентрация OH в пограничном слое атмосферы может быть измерена косвенно. Она связана с вариациями содержания метана (CH_4) и окиси углерода (CO) – также биологически опасными техногенными примесями, а эти газы могут детектироваться с необходимой точностью современными методами газокорреляционной ИК-радиометрии.

Например известны эксперименты дистанционного измерения содержания окиси углерода (CO) и метана (CH_4) в пограничном слое атмосферы с аэрокосмических носителей, использующие компактный газокорреляционный радиометр ГКР-С с пространственным сканированием [24]. При визировании в надир и близких направлениях прибор измеряет проходящее через атмосферу и отраженное от земной поверхности солнечное излучение, которое внутри прибора фильтруется кюветами, наполненными CO и CH_4 , с модулируемой длиной оптического пути. При этом выделяется информация о нижних (включая приземный) слоях атмосферы и сводится к минимуму влияние посторонних газов и условий освещения. Точность измерений содержания CO и CH_4 в столбе атмосферы по лучу зрения прибора составляет соответственно до 10 и 1% от их фонового содержания в свободной атмосфере. Важным достоинством предлагаемой аппаратуры является возможность оперативного контроля обширных территорий с больших высот без использования мощных (как в лидарах) искусственных источников облучения атмосферы и, как следствие, малые габариты, вес аппаратуры и ее энергопотребление. Относительно небольшой поток данных на выходе прибора допускает обработку информации в темпе ее приема с визуализацией детальных карт распределения газовых примесей над районами природных аномалий и объектами народно-хозяйственной деятельности. Таким образом, газокорреляционный радиометр «ГКР-С» с пространственным сканированием (габаритные размеры 500 x 300 x 200 мм, вес без источника питания 10 кг, потребляемая мощность 20 Вт) может быть размещен на борту малого КА [25-27].

Пример - схожее оборудование МОРПТТ (Measurement of Pollution in the Troposphere) для измерений CH_4 и CO в тропосфере было установлено на космической платформе EOS-AM1, запущенной в декабре 1999 г. по программе НАСА [28]. Данная аппаратура позволяет измерять яркости уходящего излучения в области длин

волн 2,3, 2,4 и 4,7 мкм. Спектрометр MORITT представляет собой четырехканальный корреляционный спектрометр со сканированием поперек направления движения спутника. Аппаратура разработана Канадским Космическим Агентством и позволяет определять на основе измерений характеристик уходящего инфракрасного излучения вертикальные профили окиси углерода и общее содержание метана в тропосфере. Оба эти соединения образуются в результате сжигания биомассы, в результате хозяйственной деятельности, производятся океанами и существенным образом влияют на перенос излучения в атмосфере.

Другой пример - это усовершенствованная модель спектрометра "SAGE III" (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment) позволяющая измерять характеристики уходящего излучения в диапазоне длин волн 280 – 1550 нм со спектральным разрешением около 1 нм, с пространственным разрешением $2 \times 1^\circ$. Основными научными задачами аппаратуры "SAGE III" на российском метеорологическом спутнике "Метеор-3М" является получение высококачественных данных о ключевых составляющих земной атмосферы и их долгосрочной изменчивости в глобальном масштабе.

Уникальные возможности восстановления вертикальных профилей озона и аэрозоля в верхней тропосфере и стратосфере, восстановления вертикальных профилей температуры, содержания водяного пара и двуокиси азота в стратосфере и нижней мезосфере, определяющие радиационные и химические процессы в атмосфере, позволят получить новые знания об основных климатообразующих факторах. Использование новых газокорреляционных методов позволит выделять из общего профиля информацию о тропосфере, об изменении ее химического и аэрозольного состава. Анализируя эти данные можно с большой вероятностью судить о характере загрязнений в нижних слоях атмосферы.

Ионосферный отклик

Эффект изменчивости характеристик ионосферы (например ионной и электронной концентрации) над районами радиоактивного загрязнения на поверхности Земли и в нижних слоях тропосферы может быть положен в основу метода мониторинга. Измерение данных характеристик со спутников позволит получать информацию о пространственном распространении 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 и на поверхности Земли [29]. Радиоактивное загрязнение приводит к локальной ионизации в тропосфере и, как следствие, к 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 σ_0 , так называемые, проводимость Педерсена σ_1 и проводимость Холла σ_2 . В общем случае, с учетом наклона геомагнитных силовых линий, в декартовой системе координат с осью z , направленной вверх, и вектором геомагнитной индукции \vec{B} , лежащим в плоскости zy , тензор проводимости $\hat{\sigma}$ имеет вид

$$\hat{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \sigma_2 & \sigma_2 \cos I \\ -\sigma_2 \sin I & \sigma_2 \sin^2 I + \sigma_0 \cos^2 I & (\sigma_1 - \sigma_2) \cos I \sin I \\ -\sigma_2 \cos I & (\sigma_1 - \sigma_0) \cos I \sin I & \sigma_1 \cos^2 I + \sigma_0 \sin^2 I \end{bmatrix},$$

где I – угол наклона геомагнитных силовых линий, т.е. угол между вектором \vec{B} и осью y . Так, на уровнях ионосферы проводимость вдоль геомагнитных силовых линий σ_{\parallel} много больше, чем проводимость перпендикулярно им σ_{\perp} , и, следовательно, вектор электрического поля в ионосфере перпендикулярен геомагнитным силовым линиям. На высотах E-области ионосферы при рассмотрении различных эффектов поля наклоном геомагнитных силовых линий (в средних и высоких широтах), как правило, пренебрегают, т.е. работают в приближении вертикальных силовых линий геомагнитного поля ($I = 90^\circ$, рис. 5). В этих условиях мы имеем только горизонтальную компоненту электрического поля. На больших высотах, например в F-области, необходимо учитывать наклон силовых

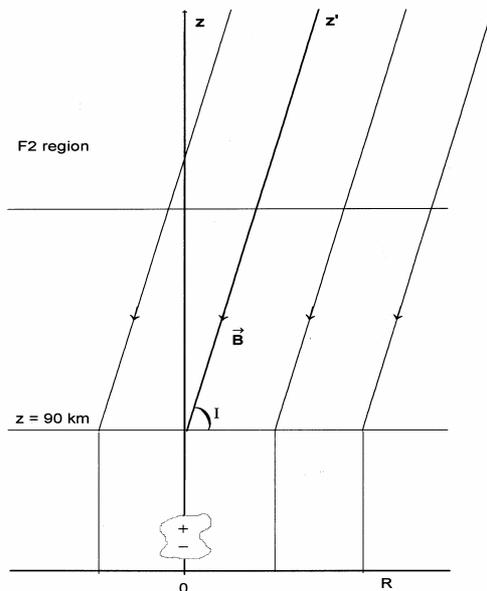


Рис. 5. Модельный ход геомагнитных силовых линий

линий. Модельный ход силовых линий геомагнитного поля представлен на рис. 5 (при расчетах считаем, что до высот 90 км последние идут перпендикулярно земной поверхности, а только выше имеют наклон).

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 грозных облаков сейсмического и вулканического происхождения, а также вызванные радиоактивными загрязнениями, 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 [30].

Как показали тщательные расчеты, проведенные нами в работе [31], величина поля в ионосфере от облака радиоактивного выброса, подобного выбросам, произошедшим на Чернобыльской АЭС в 1986 г. или на АЭС в Три-Майл-Айленде (США) в 1979 г., может быть более 5 мВ/м при зарядке облака 50 Кл, и для среднеширотной ионосферы это весьма существенное поле, так как в ионосфере в обыч-

ных условиях величина поля составляет приблизительно 1 мкВ/м, при 100 В/м в тропосфере у поверхности Земли, т.е. в 10^8 раз меньше.

На рис. 6 показаны изолинии N_e на высотах $z = 250$ и 500 км через 2 ч после “включения” поля. Черным кружком отмечена вертикальная проекция центра источника электрического поля на соответствующий ионосферный уровень. Из рисунков видно, что под воздействием поля горизонтальное распределение ионосферной плазмы в F2-области над зоной локализации поля на базовой плоскости становится существенно неоднородным. Характерный размер возмущенной области превышает 400 км. Максимальное изменение концентрации плазмы относительно невозмущенного уровня составляет около 30% на высоте $z = 250$ км и 20% на высоте $z = 500$ км.

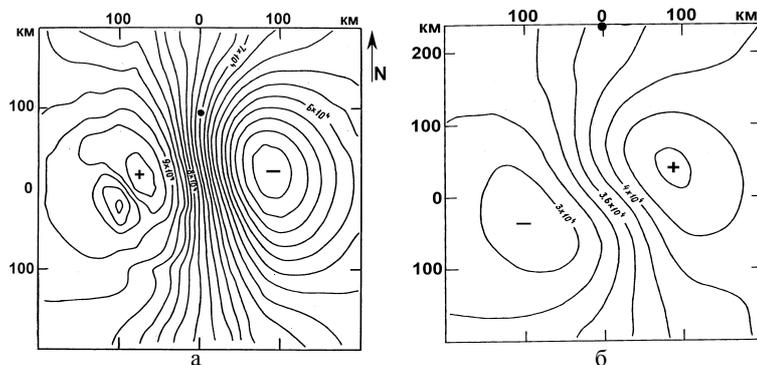


Рис. 6. Расчетные значения изолиний N_e на высотах $z = 250$ (а) и 500 (б) км через 2 часа после “включения” поля у поверхности Земли

На рис. 7 представлено распределение вариаций критической частоты f_0F2 при зондировании слоя F2 ионосферы через несколько часов после аварии на атомной электростанции Три-Майл-Айленд (ТМА) в США в 1979 г., полученное путем зондирования со спутника Интеркосмос-19. Хорошо наблюдается двухполюсная структура распределения электронной концентрации над местом аварии, отмеченной звездочкой. Размеры области реакции ионосферы на радиоактивное загрязнение во время этой аварии (см. рис. 7) во много раз превосходят теоретически рассчитанные для подобного случая (см. рис. 6). Возможно реальные размеры облака выброса были на много больше, чем те, которые закладывали при расчетах. Так, в монографии [2] отмечалось, что по некоторым данным авария в ТМА была крупнее чернойбыльской.

Предварительные теоретические и экспериментальные исследования на примере аварии в Три-Майл-Айленде США, выполненные

с помощью спутника ИНТЕРКОСМОС-19 в ИЗМИРАН [31], показали эффективность данной методики.

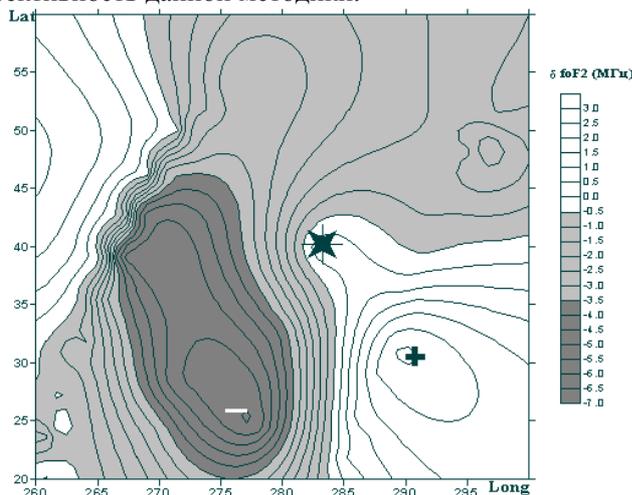


Рис.7. Распределение электронной концентрации в слое F2 ионосферы над атомной электростанцией после аварии (Три-Майл-Айленд, США)

Нейтральный кластер

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 [32, 33].

Процесс ионизации в обычном воздухе заканчивается образованием сложных ионно-молекулярных структур, например типа $\text{H}_3\text{O}^+ \cdot (\text{H}_2\text{O})_m$, $\text{NO}_3^- \cdot \text{HNO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{NO}_3^- \cdot (\text{H}_2\text{O})_n$ и др. В результате ассоциации таких гидратированных ион-радикалов, независимо от количества молекул воды в оболочке, образуется нейтральный кластер, например типа $\text{NO}_3^- \cdot (\text{H}_2\text{O})_n \cdot \text{H}_3\text{O}^+$, устойчивость которого определяется как ионной, так и ковалентной связями [18]. 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 вра-

щательно-вращательного перехода ν (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

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

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 [34]

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

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

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

где 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 :

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

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

Несмотря на некоторую громоздкость, это выражение вполне пригодно для численных расчетов. В нем специально подчеркнута, что вращательная постоянная, а следовательно и $J(r_e)$, зависит существенно 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:

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

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

$$\omega(r_e) = \sqrt{\frac{e^2}{Mr_e^3}}. \quad (6)$$

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

$$E(r_e) = hcB_e J(J+1) = \frac{\mu r_e^2 \omega(r_e)^2}{2},$$

с учетом (5) 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

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

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 $J \leq 6000$.

Интенсивность линий в спектре излучения на вращательно-вращательных переходах нейтральных кластеров с учетом столк-

новительного развала, согласно (6), будет соответствовать приведенной на рис. 8. Здесь приведено также распределение мощности равновесного излучения в радиодиапазоне спектра (кривая 4) для эффективной температуры 7К. 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.

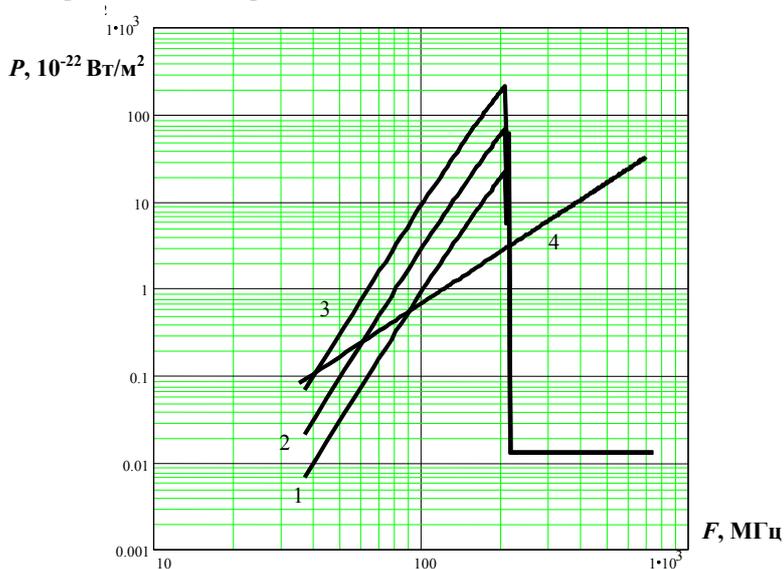


Рис. 8. Спектры излучения нейтральных кластеров с учетом столкновительного развала при концентрации паров воды $[\text{H}_2\text{O}] = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и различных скоростях ионизации $f, \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}$: 1 – 10; 2 – 100; 3 – 1000; 4 – спектр равновесного излучения при $T=7 \text{ К}$

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 см^{-3} максимальная возможная удельная мощность излучения в диапазоне частот 105-142 МГц составит $P_{\text{уд}} = 5 \cdot 10^{-21} \text{ Вт/м}^3$, 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 соста-

вят $P_{уд} = 1,1 \cdot 10^{-20}$ Вт/м³, $P = 3,2 \cdot 10^{-17}$ Вт, $E = 4,1 \cdot 10^{-8}$ В/м. Эти значения получены при суммировании по всем частотам указанных полос. Если полосу уменьшать, то сигнал будет слабеть.

Следует заметить, что приведенные оценки мощности излучения выполнены без учета ширины линии рассматриваемых переходов. Трудности в оценке ширины линии состоят в том, что в ударной теории уширения сечение, которое входит в частоту столкновений, не есть обычное поперечное сечение, которое входит в кинетическую теорию газа (газокинетическое сечение) [35]. Это эффективное сечение, которому соответствуют скачкообразные изменения фазы в результате столкновения на величины, сравнимые с 2π . Для нахождения реальных значений сечения требуется специальный расчет. Они зависят от характера взаимодействия между частицами, в частности от того, обладают ли частицы электрическим зарядом, и от скорости частиц. Предположение ударной теории о малой продолжительности столкновений будет справедливым при большой относительной скорости сталкивающихся частиц, когда продолжительность удара мала, как то мы имеем с классической точки зрения внезапное изменение фазы колебаний, а с квантово-механической точки зрения – сильное взаимодействие в течение очень малого времени. Условия применимости ударной теории практически всегда выполняются для столкновений тяжелых частиц с электронами. Что касается рассматриваемого объекта (нейтрального кластера), то он попадает в переходную область между ударной и статистической теорией уширения, поэтому простая и однозначная оценка ширины линии здесь не подходит. Это вопрос будущего рассмотрения. Здесь мы приводим приблизительную оценку спектра излучения нейтрального кластера и верхнюю оценку мощности излучения в определенных условиях. Кроме того, известно, что если эффективное сечение уширения много меньше эффективного сечения упругих соударений, то имеет место эффект сужения Дике, который отсутствует в оптическом диапазоне, слабо выражен при колебательных переходах и в значительной степени может проявляться на радиочастотных переходах сверхтонкой структуры основных состояний атомов. Таким образом, в отсутствие экспериментальных данных и без более детальных исследований делать выводы о «размазывании» спектра излучения нейтральных кластеров преждевременно.

Латентное тепло

Было замечено, что в ряде случаев перед землетрясениями, когда наблюдались значительные эманации радиоактивного радона из поверхности земли, уровень влажности в этом районе резко падал

[36]. Теоретическое описание с позиции молекулярно-кинетической теории конденсации допускает существенное изменение влажности в приземном слое. Так, зависимость концентрации насыщенных паров воды от температуры T может быть грубо описана с помощью строго получаемой в термодинамике из уравнения Клаузиуса-Клапейрона [37] формулой:

$$n = \frac{A}{T} \cdot \exp\left(-\frac{U}{k_B T}\right), \quad (7)$$

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 [38]

$$U = \frac{2\mu_{H_2O}^4}{3k_B T r^6}, \quad (8)$$

где $\mu_{H_2O} = 1,85 \cdot 10^{-18}$ СГС·см – дипольный момент молекулы воды. Эта же энергия соответствует работе образования зародыша [40] при критическом радиусе $r_{cr} = 4,76$ А и поверхностном натяжении $\gamma = 72,88$ дин/см:

$$W_{cr} = \frac{4}{3} \pi r_{cr}^2 \gamma.$$

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 (7) и (8):

$$H(t) = \frac{\exp\left(-\frac{U(t)}{k_B T}\right)}{\exp\left(-\frac{U_0}{k_B T}\right)} = \exp\left(\frac{U_0 - U(t)}{k_B T}\right) = \exp\left(-\frac{0,032\Delta U \cos^2 t}{(k_B T)^2}\right), \quad (9)$$

где $U(t) = U_0 + \Delta U \cos^2 t$; 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.

Сравнение результатов расчетов по формуле (9) при $\Delta U = 0,019$; $0,022$ и $0,03$ эВ с результатами наблюдений приведено на рис. 9. Видно, что в некоторые дни перед землетрясением, когда наблюдаются значительные эманации радиоактивного радона из почвы, поправка к химическому потенциалу квазиднокомпонентной 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 [38]:

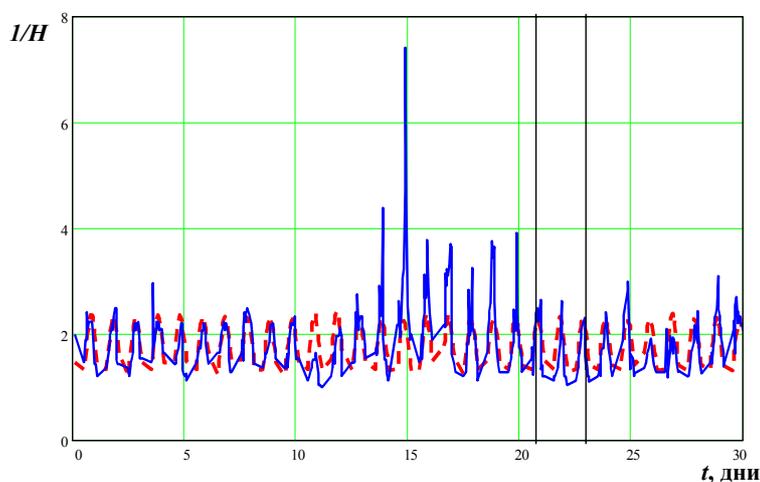


Рис. 9. Временные развертки суточных вариаций влажности атмосферного воздуха при различных поправках химического потенциала ΔU эВ:
 $a - 0,019$; $b - 0,022$; $v - 0,03$;
 ————— — наблюдения, — — — — — расчет по (13)

$$U_{cd} = \frac{q^2 \mu_{H_2O}^2}{3k_B T r^4},$$

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.

Детальные расчеты концентрации паров воды в атмосфере проводились с использованием подробной нестационарной кинетической модели влажного атмосферного воздуха. 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 ионно-молекулярных процессов равны, соответственно, $K_{dd} = 1,34 \cdot 10^{25} \cdot \exp(-0,422/T_g)$ и $K_{cd} = 1,34 \cdot 10^{25} \cdot \exp(-0,654/T_g)$ см⁻³. Константы скоростей трехчастичных реакций ионно-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 $k_{mn} = 9,5 \cdot 10^{-8} \cdot T_g^{7/6} \cdot \exp(-0,654/T_g)$ см³/с. Температура газа T_g измеряется в электрон-вольтах.

Расчеты показывают, 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.

Результаты расчетов влажности атмосферного воздуха в зависимости от длительности воздействия ионизирующего излучения приведены на рис. 10. Начальная концентрация паров воды полагалась равной стопроцентной влажности для заданной температуры воздуха. Видно, что 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 (см. Нейтральный кластер).

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.

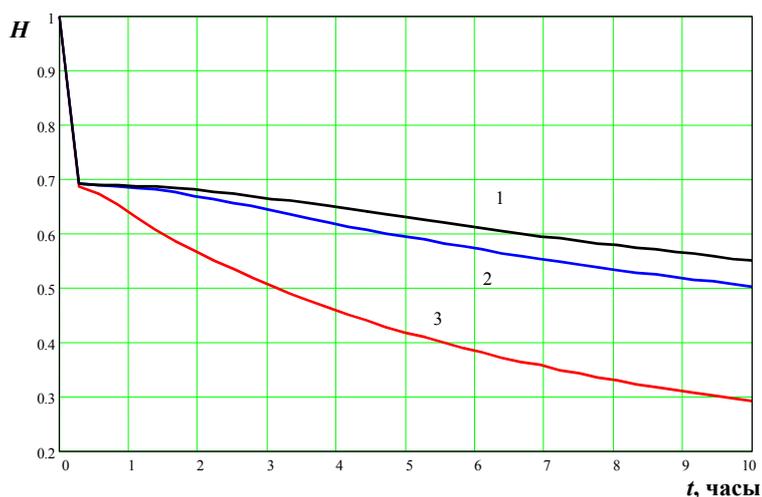


Рис. 10. Зависимости относительной влажности атмосферного воздуха от длительности внешнего воздействия при различных скоростях ионизации f , $\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$: 1 – 4,5; 2 – 9; 3 – 90; температура воздуха 27°C ; начальная концентрация паров воды $[\text{H}_2\text{O}] = 7,7 \cdot 10^{17} \text{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

Профиль возможной системы мониторинга

Как отмечалось во введении, экономически целесообразно строить космическую систему мониторинга радиоактивных загрязнений на уже существующих технических решениях дистанционного зондирования Земли. Так, в рамках Федеральной космической программы РФ с 2001 г. уже создается многоспутниковая космическая система для мониторинга природных и техногенных катастроф «Вулкан» [40]. Первые КА системы, планируемые к запуску в конце 2005 г. (МКА «Компас»), в 2007 г. (КА №1 «Канопус-В») и КА №2 «Канопус-В» в 2009 г. имеют целевую аппаратуру, предназначенную для мониторинга и прогноза катастрофических землетрясений, техногенных и природных чрезвычайных ситуаций. Эти первые аппараты должны послужить основой космической системы.

Исходя из характерных особенностей вышеперечисленных эффектов воздействия радиоактивного излучения на окружающую среду, и учитывая состав целевого оборудования системы «Вулкан», вероятная космическая система мониторинга радиоактивных загрязнений в максимальной конфигурации представлена в таблице:

Состав космической системы* мониторинга природных и техногенных катастроф

КА, орбита	Полезная нагрузка
КА № 1 высота 800–1000 км	Ионозонд для измерения состояния ионосферы
КА № 2 высота 500 – 600 км	Традиционная аппаратура для измерения температуры поверхности Земли и приповерхностного слоя воздуха; аппаратура ДЗЗ в оптическом диапазоне и ИК-диапазонах. Гиперспектрометр.
КА № 3 высота 400 – 450 км	МикроКА типа «Компас» для измерения параметров ионосферы in-situ. Радиоспектрометрические измерения.

* Окончательное количество КА на орбите определяется периодичностью просмотра одних и тех же участков поверхности Земли или требованиями Заказчика.

Заключение

Эффекты проявления реакции окружающей среды на радиоактивное загрязнение, представленные в данной работе, могут быть положены в основу методов дистанционного мониторинга радиоактивных загрязнений на поверхности Земли и в нижних слоях атмосферы. Однако для этого необходимо проведение специальных НИР и ОКР, в процессе которых будут определены перспективы методик в части пороговой чувствительности, оперативности и экономической целесообразности.

В результате работ планируется создать комплексный метод для спутникового мониторинга радиоактивных загрязнений на поверхности Земли, работающий одновременно в оптическом, ИК- и радиодиапазонах, что позволит получать более полную информацию о свойствах загрязнения в реальном времени.

Практическая ценность работ заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы:

- для создания районированных и глобальных систем наднационального контроля за распространением и предупреждением радиоактивных загрязнений в техногенно опасных районах;
- для анализа ионизированных областей атмосферы с целью использования результатов в космофизических и геофизических исследованиях.

Социально-экономическая значимость ожидаемых результатов – это создание системы мониторинга – позволит, в принципе, осуществлять независимый контроль за возможным распространением радиоактивных загрязнений на территории страны, а также на всей

планете, что, в свою очередь, позволит более эффективно осуществлять мероприятия при возникновении чрезвычайной ситуации. Возможно также коммерческое использование системы при предоставлении информации радиационного мониторинга заинтересованным странам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Субботин В.И. Размышления об атомной энергетике. СПб.: ОЭЭП РАН. 1995. 215 с.
2. Израэль Ю.А. Радиоактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий. СПб.: Прогресс-Погода. 1996. 355 с.
3. Данные U.S. Army Environmental Policy Institute.
4. Павловский О.А., Беловодский Л.Ф. Об использовании обедненного урана в Косово. Тр. Школы-семинара «Экология и промышленная безопасность». 23-29 сентября 2001 г., г. Саров Нижегородской обл. ВНИИ ЭФ. 2001.
5. Кондратьев К.Я., Бузников А.А., Покровский О.М. Глобальная экология: Дистанционное зондирование. Итоги науки и техники. Сер. Атмосфера, Океан, Космос. Программа «Разрезы». Т. 14. М.: ВИНТИ. 1992. С. 1-312.
6. Церфас К.Э. О влиянии искусственных радиоактивных выпадений на состояние атмосферного электричества. Метеорология и Гидрология. 1968. №6. С. 55 – 60.
7. Четкин Ю.В., Якшин Е.К. Очистка радиоактивных газообразных отходов АЭС. М.: Энергоатомиздат. 1985. 127 с.
8. Кононов Е.Н. Исследования возможности обнаружения и идентификации облаков выбросов радиационно опасных объектов с помощью радиолокационных средств в целях создания дистанционных средств радиационного контроля радиационно опасных объектов России. Отчет по НИР. Книга I. Исследование возможности обнаружения и идентификации облаков выбросов радиоактивных объектов с применением штатных радиолокационных средств Вов Вооруженных Сил. М.: Консорциум «Рутэкс». 1992. 245 с.
9. Протасевич Е.Т., Григорьев В.П. Использование электромагнитного излучения и плазмы для решения экологических проблем. Томск: ТПУ. 1998. 202с.
10. А. с. N1394902 (СССР), Ципенюк Д.Ю., Власов Д.В. 1991.
11. Ципенюк Д.Ю. Развитие дистанционного лазерного зондирования на основе флуоресцентных и эмиссионных спектров. Материалы кандидатской диссертации. ИОФ АН СССР. М.: 1992. 142с.
12. Бункин Ф.В., Власов Д.В., Герасименко Л.М., Слободянин В.П. Использование спектров флуоресценции фитопланктона как сенсора не флуоресцирующих примесей. Квантовая Электроника. 1984. II. No.6, pp. 1253-1256.
13. Tsipenyuk D.Yu. Laser and radioactivity irradiation as stress sources of the cotton plants and phytoplankton. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol.XXXIII. Part B7. Amsterdam. 2000.

14. Tsipenyuk D.Yu. Using phytoplankton's fluorescence for remote detection of radioactive pollution in the Ocean. Pros. Of the Eleventh Thematic Conference and Workshops on Applied Geologic Remote Sensing. Las Vegas, Nevada. 27 – 29 February. 1996. Vol. II, p.11-459.
15. Дистанционное зондирование в метеорологии, океанографии и гидрологии. М.: Мир. 1984. 532 с.
16. Ефременко В.В., Мошков А.В., Семенов А.А., Чимитдоржиев Т.Н. Некоторые результаты модельного эксперимента по трехканальной обработке многозональных изображений. Труды Всероссийской научной конференции «Физические проблемы экологии. Физическая экология». М.: 1998. Т.1. С. 28.
17. Н.Н.Хренов, А.Н.Дмитриевский, А.Г.Ананенков, В.В. Шеремет, А.А. Пономарев, И.Д.Родионов. Гиперспектральный аэрокосмический мониторинг трасс трубопроводов и территорий месторождений. Наука и техника в газовой промышленности. 2001. №2-3, с. 37-46.
18. Смирнов В.В. Ионизация в тропосфере. СПб.: Гидрометеиздат. 1992. 312с.
19. Boyarchuk K.A., Karelin A.V. Small gas components of the atmosphere as markers of radioactive contamination. Bulletin Russian Academy of Sciences, Physics / Supplement Physics of Vibrations. 1997. Vol. 61. No. 4, pp. 249 – 259.
20. Боярчук К.А., Карелин А.В., Шематович В.И. О возможном механизме образования кислородной атмосферы на ледяных спутниках Юпитера. Астрономический вестник. 2000. Т. 34. № 1. С. 15 - 23.
21. Boyarchuk K.A., Veselovsky I.A., Karelin A.V., Shirokov R.V. Anthropogenous sources of tropospheric ozone variations. Physics of Vibrations. 2001. Vol. 9. No. 2, pp. 90 – 96.
22. Боярчук К.А., Карелин А.В., Широков Р.В. Компьютерное моделирование очистки дымовых газов. Оптика атмосферы и океана. 2002. Т. 15. № 3. С. 281 - 285.
23. Boyarchuk K.A., Karelin A.V., Simakova O.V., Shirokov R.V. Effect of Photosynthesis and Ionizing Radiation on Mars Atmosphere Composition. Physics of Wave Phenomena. 2004. V. 12. N. 3.
24. Виролайнен Я.А., Поляков А.В. Учёт рассеяния излучения в наземных газокорреляционных измерениях общего содержания метана. Исследование Земли из космоса. 2004. №4. С. 3 –9.
25. Бешменев А.С., Дементьев Б.В., Иванов В.В., Шилин Н.В. Метод газокорреляционной ИК-радиометрии для дистанционного мониторинга загрязнения атмосферы с микроспутников. Труды конференции «Земля из космоса. Наиболее эффективные решения». 26-28.11.03. Моск. обл., п. Ватутинки. М: Сканекс. 2003.
26. Иванов В.В. Исследования регионального распределения СН4 в тропосфере методом газокорреляционной ИК-радиометрии. Грант РФФИ № 01-05-65392.
27. Иванов В.В., Решетняк С.А., Шелепин Л.А., Щеглов В.А. Дистанционная идентификация наземных источников загрязнения. КСФ. 2002. №4.

28. Головки В.А., Гусаков В.В. Космический мониторинг малых газовых составляющих и температуры атмосферы по данным датчиков MORITT и SAGE III. <http://geo.mipt.ru/konfer.shtml>.
29. 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.
30. Pulinets S. A., Boyarchuk K. A. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*, Springer Verlag Publ., Berlin. 2004. 360 p. ISBN 3-540-20839-9J.
31. Boyarchuk K.A., Lomonosov A.M., Pulinets S.A., Hegai V.V. Ionosphere response 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.
32. 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.
33. 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.
34. Попова Т.Н., Раводина О.В. *Спектроскопия двухатомных молекул*. Томск: Изд-во ТГУ. 1984.
35. Ельяшевич М.А. *Атомная и молекулярная спектроскопия*. М.: Эдиториал УРСС. 2001.
36. 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. La Londe les Maures. France.
37. Ферми Э. *Термодинамика*. Ижевск: Издательский дом «Удмуртский университет». 1998.
38. Зацепина Г.Н. *Физические свойства и структура воды*. М.: Изд-во МГУ. 1998.
39. Грин Х., Лейн В. *Аэрозоли – пыли, дымы и туманы*. Л.: Химия. 1972.
40. Боярчук К.А. Проект "Вулкан": перспективы развития. Сб. выездного семинара ИКИ "Вопросы миниатюризации в современном космическом приборостроении". Таруса. 2 – 4 июня. 2004. (<http://www.iki.rssi.ru/seminar/tarusa200406/1-04.pdf>).

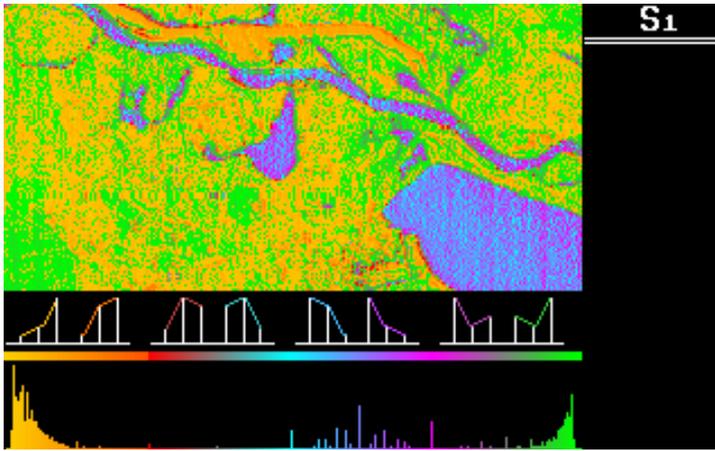


Рис.2. Изображение зоны Чернобыльской АЭС, полученное при помощи методики трехканальной обработки

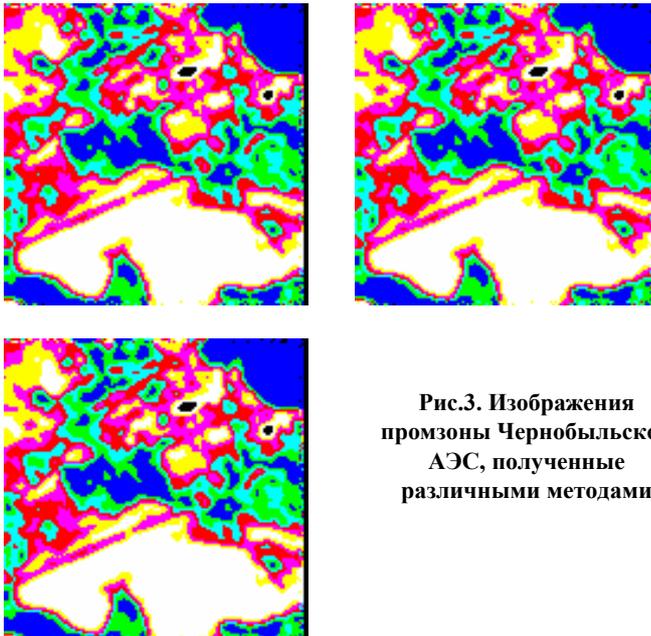


Рис.3. Изображения промзоны Чернобыльской АЭС, полученные различными методами

К статье К.А.Боярчука, А.В. Карелина, Л.А. Макриденко,
«Перспективы мониторинга» стр. 189