

## КУМУЛЯТИВНЫЙ ЭФФЕКТ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АКВАТОРИИ ЯПОНСКОГО МОРЯ, ОБУСЛОВЛЕННЫЙ МНОГОЛЕТНИМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ ЯПОНСКИХ АЭС, И ВОЗМОЖНОСТЬ ЕГО ИОНОСФЕРНОГО МОНИТОРИНГА

К.А. Боярчук  
(ОАО НИИЭМ)  
В.П. Ким, В.В. Хегай  
(ИЗМИРАН)  
А.В. Карелин  
(ФГУП ЦНИИмаш)

*В результате повседневной эксплуатации сети японских АЭС происходит непрерывная утечка в атмосферу радиоактивных частиц, приводящая к крупномасштабному радиоактивному загрязнению тропосферы над всей акваторией Японского моря. Структурно это загрязнение может иметь вид отдельных полос, вытянутых вдоль направления преобладающих ветров (в основном летних муссонов, дующих в сторону азиатского континента). На основе модельных расчётов показано, что такие полосы радиоактивного загрязнения тропосферы могут способствовать возникновению специфических изменений электронной концентрации в E-области ионосферы. Эти изменения электронной концентрации можно регистрировать с помощью стандартных радиофизических методов наблюдения ионосферы, и тем самым осуществлять реальный дистанционный мониторинг общей картины степени радиоактивного загрязнения тропосферы, обусловленного функционированием АЭС, причём практически одновременно и на больших площадях, что имеет особое значение.*

**Ключевые слова:** радиоактивное загрязнение, кумулятивный эффект, грозовая активность, ионосферные неоднородности, радиофизический мониторинг.

Несмотря на потенциальные риски, которые несёт в себе атомная энергетика, количество атомных электростанций (АЭС) в мире в ближайшем будущем значительно возрастёт, особенно на азиатском континенте, что связано с огромной потребностью в электроэнергии бурно развивающейся экономики и Китая, и Индии. Эксплуатация АЭС неизбежно связана с непрерывной утечкой радиоактивных частиц и газов в атмосферу. Современные технологии позволяют минимизировать степень этой утечки, но при достаточно большом количестве АЭС с течением времени их радиоактивные выделения могут привести в определенному накоплению долгоживущих радиоактивных частиц в обширных областях атмосферы, уровень и последствия которого для биосферы до сих пор детально не изучены.

В связи с этим особую актуальность приобретает разработка новых эффективных методов мониторинга радиоактивного загрязнения окружающей среды, в число которых, в частности, входят радиофизические методы.

Проблема радиоактивного загрязнения в связи с резким расширением строительства АЭС непрерывно обсуждается как в средствах массовой информации, так и в научной печати. Однако в основном внимание исследователей направлено на изучение аварийных ситуаций, сопровождающихся

одномоментным выбросом в окружающую среду значительного количества (сотни килограмм и более) радиоактивных веществ [1]. Наиболее впечатляющими среди таких аварий являются крупная авария на американской АЭС в Три-Майл-Айленд в марте 1979 г., катастрофические аварии на Чернобыльской АЭС в апреле 1986 г. и на японской АЭС Фукусима-1 в марте 2011 г. Здесь необходимо отметить следующее. Хотя, например, 100 кг урана-238 менее радиоактивны, чем один нанограмм молибдена-99, однако экологический ущерб от локализованного выброса в атмосферу 100 кг урана-238 намного больше, чем от выброса микрочастицы радиоактивного молибдена-99, поскольку в первом случае радиоактивное загрязнение охватит большие площади, а во втором случае радиация воздействует, хотя и очень сильно, только на небольшую окрестность вокруг радиоактивной микрочастицы.

К настоящему времени не существует эффективных методов наблюдения за распространением радиоактивных выделений от АЭС, образующихся в процессе их повседневной эксплуатации на значительных (200 км и более) расстояниях. В штатном режиме службы контроля радиационного фона обычно измеряют интенсивность радиации вблизи опытных атомных реакторов и АЭС, и на удалении до нескольких десятков километров. По-существу, по умолчанию предполагается, что совпадение средних уровней радиации вблизи АЭС и на задан-

ном удалении от неё говорит о полном благополучии в смысле радиационной безопасности. Такой подход, однако, может оказаться чрезмерно оптимистичным, так как перенос и последующее рассеяние радиоактивных выделений будет определяться, в основном, метеорологическими факторами, и картина распределения радиоактивного загрязнения может оказаться достаточно сложной. В случае, когда мы имеем дело с плотной сетью АЭС, возникает естественный вопрос относительно воздействия их фоновых радиоактивных выделений на прилегающие территории, и хотя ежедневное суммарное количество выделяемых АЭС радиоактивных веществ может быть незначительной добавкой, немного увеличивающей среднюю величину естественного уровня радиации, рассеяние этих радиоактивных выделений на больших площадях в течении длительного (годы и десятки лет) времени, в принципе, может привести к существенному кумулятивному эффекту в окружающей среде, особенно если рассеяние радиоактивных веществ будет происходить в должной степени регулярно на достаточно ограниченной площади.

Для того, чтобы ясно осознать необходимость мониторинга выбросов АЭС, работающих в штатном режиме, достаточно отметить, что к 1984 г. в 26 странах работало 345 ядерных реакторов, вырабатывающих электроэнергию, при этом в США работало 85 энергоблоков, в СССР – 46, во Франции – 41, Великобритании – 37, Японии – 31 [2]. В 1997 г. насчитывалось уже 436 промышленных АЭС, из которых 109 находилось в США [3]. Таким образом, обсуждаемая проблема становится всё более актуальной для всех промышленно развитых стран.

С практической точки зрения, одним из наиболее удобных регионов для изучения этого феномена является акватория Японского моря. Здесь мы имеем и плотную сеть японских АЭС, и весьма активную метеорологическую систему ветров, которые играют важнейшую роль не только в процессах обмена массы, тепла и влаги на этой акватории, но и в перераспределении радиоактивных загрязнений.

Цель настоящей работы – показать принципиальную возможность дистанционного мониторинга кумулятивного эффекта радиоактивного загрязнения тропосферы над акваторией Японского моря, обусловленного функционированием японских АЭС, посредством ионосферных наблюдений.

### **Распределение радиоактивных загрязнений в тропосфере над акваторией Японского моря**

В результате эксплуатации ядерных реакторов АЭС радиоактивные эманации попадают в припо-

верхностный слой атмосферы и посредством турбулентного вертикального переноса выносятся в более высокие слои атмосферы [4]. При этом в целом наблюдается падение концентрации радионуклидов с высотой в 5 – 10 раз на уровнях 2 – 3 км по сравнению с её приповерхностными значениями. Большое влияние на радиоактивные примеси оказывает облачность и процессы конденсации. При развитии конвекции толщина слоя атмосферы, в котором концентрация радиоактивных продуктов возрастает или практически постоянна с высотой, увеличивается до 2 – 3 км, а в облаках наблюдается повышенная радиоактивность  $(2 - 7)10^{-10}$  кюри на грамм воды, что примерно на порядок больше радиоактивности осадков. После рассеивания облачности слои с повышенной радиоактивностью длительное время (порядка суток) сохраняются [4], хотя крупные капли осадков уносят из облака часть радиоактивности. В обычных условиях радиоактивность облачной и дождевой воды обусловлена, в основном, радионуклидами естественного происхождения – дочерними продуктами распада урана и тория.

Радиоактивные выбросы нормально работающей АЭС представлены радиоактивными газами (прежде всего криптоном и ксеноном) и аэрозолями. Особое место принадлежит изотопам йода, которые обладают высокой химической активностью и могут быть как газообразными, так и в виде аэрозолей в зависимости от окружающих условий. Количество попадающих в окружающую среду аэрозолей зависит от многих факторов: типа реактора, его мощности, эффективности систем газо- и водочистки, продолжительности эксплуатации и т. п. В составе выбрасываемых АЭС аэрозолей идентифицируют несколько десятков радионуклидов, в том числе долгоживущие изотопы кобальта-60, стронция-90 и цезия-137 [5].

Количественно оценить поступление в атмосферу радиоактивных частиц от работающих АЭС и проследить их последующий перенос весьма непростая задача. Можно попробовать подойти к этой проблеме иначе, с тем чтобы получить сначала ответ на вопрос проявляется ли каким-то образом регулярное воздействие выбросов нормально работающих АЭС над акваторией Японского моря. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Ветры соответствующего направления, в основном летние муссоны, дующие из года в год в течение сезона с юго-востока (с японских островов на континент), переносят в горизонтальном направлении радиоактивные эманации японских АЭС по-прежнему над всей акваторией Японского моря. При этом харак-

тер распределения осадков будет задавать картину загрязнения морской поверхности, а постоянно действующим источником дополнительных радионуклидов в атмосфере на этот период устойчивых ветров будет вся сеть АЭС, т. е. в целом в указанной области тропосферы в течение этого времени число радиоактивных частиц будет повышенным по сравнению с их количеством в случае отсутствия АЭС.

Вследствие динамики атмосферы, общая картина радиоактивного загрязнения может включать в себя пролонгированные вдоль направления преобладающих ветров структуры, представляющие собой квазилинейные полосы, локализованные в интервале высот от 1 до 3 км. Длина полосы может достигать 200 км, а ширина – 10 – 30 км. Время жизни такой полосы может составлять несколько суток и более, судя по формирующимся радиоактивным следам, наблюдаемым на земной поверхности при радиоактивных выпадениях после аварий на АЭС [1]. Естественно, в случаях сильной утечки радиации во время эксплуатации АЭС такая картина может быть выражена очень ярко.

Как известно [6, 7], возникающие в приповерхностном слое атмосферы (а особенно эффективно – над морем) конвективные ячейки имеют горизонтальные размеры от 2 до 10 км. Нижняя граница ячейки находится на высоте 2 – 4 км, а верхняя граница расположена обычно на высотах 6 – 8 км, но может достигать и 15 – 17 км. Внутри ячейки, в частности, происходит вертикальный перенос воздуха от её нижней границы к верхней. Именно на основе конвективных ячеек происходит при определенных условиях формирование грозовых облаков. Фактически, возникновение конвективной ячейки является первой фазой образования грозового облака [7]. Размеры конвективных ячеек, интенсивность динамических процессов внутри них и плотность их пространственного распределения зависит от сезона, погодных условий и общего динамического состояния атмосферы в конкретном регионе. Для умеренноактивных погодных условий в полосе радиоактивного загрязнения может содержаться 7 – 10 конвективных ячеек. В результате вертикального переноса радиоактивные микрочастицы и аэрозоли поднимаются до верхней границы ячейки, т. е. до высот 6 – 8 км. В итоге образуются облака с повышенным содержанием радиоактивных частиц, внутри которых под воздействием высокоэнергичных частиц, возникающих в актах радиоактивного распада, происходит резкое усиление ионизации воздуха, что создает благоприятные условия для электризации облаков и трансформации их в грозовые [8].

Согласно [9 – 12], начальная вертикальная составляющая электрического поля в условиях повышен-

ной влажности и скорости ионизации намного выше фоновой и может достигать нескольких кВ/м, а результирующая концентрация зарядов одного знака в результате коронного разряда на каплях воды в облаке – десятков и сотен нКл/м<sup>3</sup>. Таким образом, при километровых поперечных размерах облаков характерная величина заряда одного знака в грозовом облаке будет составлять не менее нескольких десятков кулон. Следовательно, есть основания полагать, что в полосе радиоактивного загрязнения тропосферы с большей долей вероятности могут образовываться грозовые облака, однозначно связанные с локализацией этих радиоактивных эманаций. Конечно грозовая активность в том или ином географическом регионе является результатом действия многих факторов. Тем не менее, можно определенно сказать, что повышение степени ионизации воздуха в областях, прилегающих к АЭС, вследствие систематического обогащения его радиоактивными примесями будет способствовать образованию грозовых облаков и, следовательно, повышать частоту и интенсивность гроз в таких областях по сравнению с теми, в которых такой фактор отсутствует.

Количественная оценка грозовой активности на основе прямых наблюдений (особенно над акваториями океанов и морей) – задача сложная и дорогостоящая. Один из возможных способов её решения состоит в оценке грозовой активности по её проявлению на ионосферных уровнях, так как грозовое облако является мощным источником электростатического поля, которое может, как показывают расчёты [13 – 15], при определенных условиях эффективно проникать вплоть до высот ионосферы. Так, согласно [13], величина напряжённости электростатического поля от гигантского грозового облака может достигать в среднеширотной ионосфере в ночных условиях 6 мВ/м. Под влиянием этого поля происходит сильное возмущение электронной концентрации в *E*-области ионосферы, а именно над грозовым облаком на высотах 120 – 140 км в ионосферной плазме образуется полость, где концентрация заряженных частиц почти на порядок величины ниже, чем их фоновая концентрация.

В связи с последним интересно исследовать в какой мере электростатические поля грозовых облаков, которые возникают в полосе радиоактивного загрязнения тропосферы, могут проявляться в ионосфере, имея ввиду возможность дистанционного обнаружения связанных с такими радиоактивными облаками специфических вариаций ионосферы радиофизическими методами над всей акваторией Японского моря. С этой целью необходимо выполнить модельные расчёты распределения

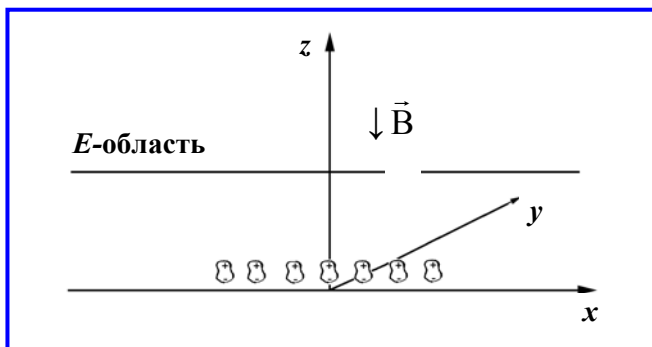
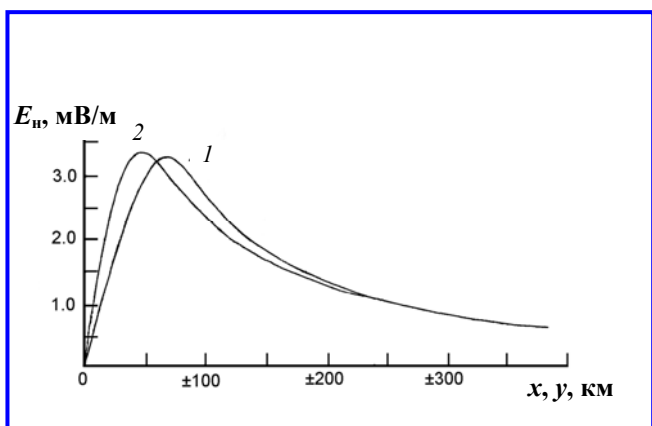


Рис. 1. Общая геометрия задачи



а



б

Рис. 2. Электрическое поле грозовых облаков: а – изолинии потенциала электрического поля грозовых облаков, связанных с полосой радиоактивного загрязнения в тропосфере, в ночной среднеширотной ионосфере; б – напряжённость горизонтального электрического поля как функция расстояния от оси  $z$  вдоль оси  $x$  – 1 и оси  $y$  – 2

электростатического поля этих грозовых облаков на ионосферных высотах и его влияния на электронную концентрацию ионосферной плазмы в среднеширотной  $E$ -области ионосферы.

### Расчёт электростатического поля на высотах $E$ -области ночной среднеширотной ионосферы, связанного с полосой радиоактивного загрязнения в тропосфере

В своих модельных расчётах мы приняли, что вдоль полосы расположено семь облаков на расстоянии 15 км друг от друга. Электрическая структура каждого облака моделируется двумя равными по величине объёмными зарядами  $Q$  в 25 Кл каждый, но противоположного знака. Центр положительного заряда расположен на высоте  $h^+ = 9$  км, а центр отрицательного – на высоте  $h^- = 3$  км. Общая геометрия задачи приведена на рис. 1. Геомагнитные силовые линии полагаются вертикальными.

Электрическое поле такой линии облаков, связанных с полосой радиоактивного загрязнения в тропосфере, на ионосферных уровнях представляет собой векторную сумму напряжённостей электрических полей от каждого грозового облака. Распределение в ионосфере напряжённости электростатического поля от одного облака вычислим, следуя [13].

На рис. 2, а представлено вычисленное горизонтальное распределение потенциала электрического поля линии облаков, обусловленных полосой радиоактивного загрязнения в тропосфере, на ионосферных высотах, а на рис. 2, б показано распределение напряжённости горизонтального электрического поля в зависимости от расстояния от оси  $z$  вдоль осей  $x$  и  $y$ . Видно, что распределение электрического поля обладает квазиазимутальной симметрией, а максимальное значение напряжённости поля составляет 3,3 мВ/м. Электрическое поле имеет значительную для ионосферы величину вплоть до расстояний порядка 300 км от оси  $z$ .

### Расчёт воздействия электростатического поля линии облаков, связанного с полосой радиоактивного загрязнения, на ночную среднеширотную $E$ -область ионосферы

Для исследования воздействия электростатического поля описанной выше квазилинейной облачной структуры, вытянутой вдоль полосы радиоактивного загрязнения в тропосфере, на ночную среднеширотную  $E$ -область воспользуемся уравнением непрерывности для заряженных компонент ионосферной плазмы, которое включает молекулярные ионы  $\text{NO}^+$ ,  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{O}_2^+$  и электроны. С учётом того, что массы и частоты столкновений ионов

примерно равны, стационарное уравнение непрерывности для суммарной концентрации ионов  $N = N(\text{NO}^+) + N(\text{N}_2^+) + N(\text{O}_2^+) \approx N_e$  имеет вид

$$\text{div}(N\vec{V}) = q - \alpha N^2, \quad (1)$$

где  $\vec{V}$  – вектор скорости дрейфа ионов, обусловленного электростатическим полем;  $q$  – скорость ночного ионообразования;  $\alpha$  – коэффициент диссоциативной рекомбинации. Скорость дрейфа  $\vec{V}$  определяется выражением:

$$\vec{V} = \frac{e_0}{m_i} \left( \frac{v_{in}}{\omega_i^2 + v_{in}^2} \right) \vec{E} + \left( \frac{\omega_i^2}{\omega_i^2 + v_{in}^2} \right) \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}, \quad (2)$$

где  $e_0$  – элементарный заряд;  $m_i$  – масса иона;  $v_{in}$  – частота столкновений ионов с нейтральными частицами;  $\omega_i$  – гирочастота;  $\vec{E}$  – вектор напряжённости электростатического поля;  $\vec{B}$  – вектор геомагнитной индукции.

Выполним численное интегрирование уравнения (1) для различных уровней  $E$ -области, при этом значения  $q$ ,  $\alpha$  и  $v_{in}$  примем такими же, как в [13]. Использование стационарного уравнения непрерывности оправдано тем, что характерное время изменения распределения концентрации заряженных частиц в ночной  $E$ -области под воздействием электрического поля составляет около 15 мин, тогда как время существования линии облаков, связанных с полосой радиоактивного загрязнения в тропосфере, не менее нескольких часов.

Модификация электронной концентрации ночной  $E$ -области в результате воздействия электрического поля проиллюстрирована на рис. 3, *a* – *в*. При расчётах было принято в качестве граничного условия для уравнения (1), что на расстояниях более 600 км от оси  $z$  концентрация заряженных частиц определяется условиями фотохимического баланса. На рис. 3, *a* и *б* показано горизонтальное распределение электронной концентрации на высотах 120 и 140 км соответственно. На рис. 3, *в* представлен высотный профиль электронной концентрации над линией облаков вдоль оси  $z$  вместе с профилем невозмущённой электронной концентрации. Видно, что в верхней части  $E$ -области происходит сильное уменьшение электронной концентрации над линией облаков (вдоль полосы радиоактивного загрязнения в тропосфере). Эффект максимален вблизи оси  $z$ , где уменьшение электронной концентрации достигает фактора 3,5 относительно невозмущённого уровня. Область возмущения вытянута вдоль линии облаков. Размер этой области вдоль оси  $x$

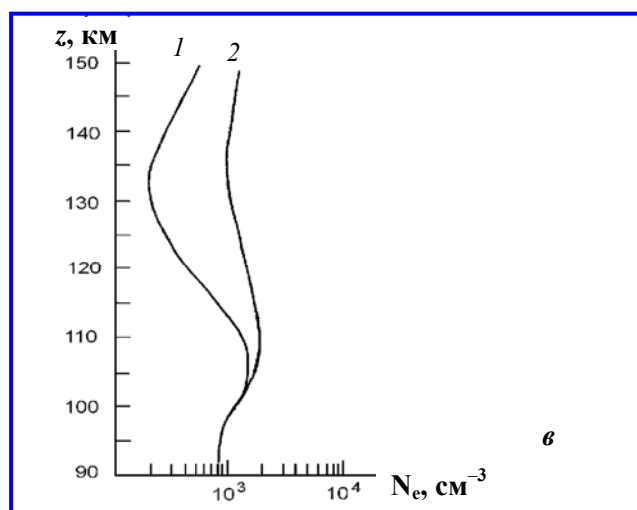
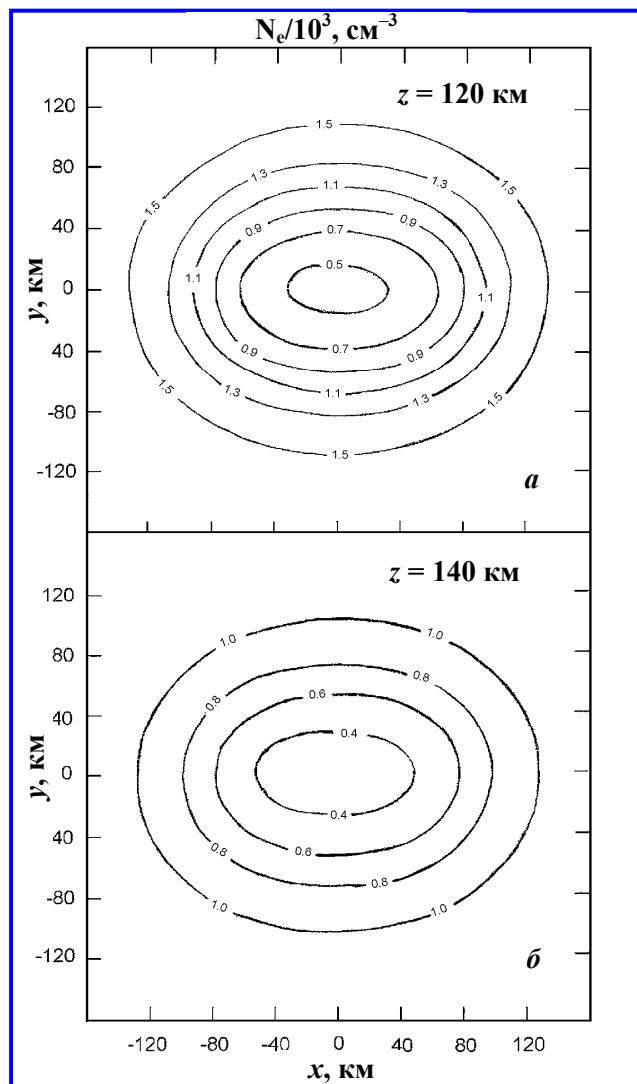


Рис. 3. Изолинии электронной концентрации в ночной среднеширотной  $E$ -области над полосой радиоактивного загрязнения в тропосфере на высотах *a* – 120 км; *б* – 140 км; *в* – высотные профили электронной концентрации вдоль оси  $z$  для возмущённых – 1 и невозмущённых – 2 условий

составляет порядка 270 км, а вдоль оси  $y$  – около 200 км.

### Выводы

Таким образом, в силу регулярного радиоактивного прессинга на экосистему акватории Японского моря в результате функционирования развитой сети японских АЭС и присущей этому региону системы ветров может происходить накопление радиоактивных веществ в тропосфере над данным регионом в летние месяцы. Этот кумулятивный эффект в значительной мере определяется горизонтальным переносом радиоактивных эманаций АЭС летними муссонами, дующими с японских островов на континент в сторону Корейского полуострова, с последующим образованием вдоль направления дующих ветров полос радиоактивного загрязнения в тропосфере. В таких полосах с повышенным содержанием радионуклидов создаются благоприятные условия для формирования грозовых облаков, электрические поля которых могут воздействовать на вышележащую ионосферу.

Проведены расчёты распределения в ионосфере электростатического поля линии грозовых облаков, связанных с полосой радиоактивного загрязнения в тропосфере, а также эффекты воздействия этого поля на ночную среднеширотную  $E$ -область. Получено, что величина электрического поля на ионосферных высотах может достигать 3 мВ/м. Под воздействием поля электронная концентрация в верхней части  $E$ -области над тропосферной полосой радиоактивного загрязнения уменьшается вплоть до 3,5 раз относительно невозмущённого уровня. Средний горизонтальный размер возмущённой области составляет около 250 км, т. е. вдоль полосы радиоактивного загрязнения в тропосфере образуется крупномасштабная зона пониженного содержания электронной концентрации на высотах  $E$ -области ионосферы по сравнению с нормальным фоном – полость в распределении электронной концентрации. Такие специфические неоднородности на высотах ионосферы могут быть легко зарегистрированы посредством дистанционного радиофизического мониторинга ионосферы и, таким образом, можно отслеживать локализацию и распространение радиоактивных эманаций АЭС над всей акваторией Японского моря, что весьма затруднительно сделать различными обычно используемыми «точечными» методами радиоактивного контроля в силу крупномасштабности и неоднородности картины радиоактивного загрязнения в тропосфере.

Проведение такого мониторинга над акваторией Японского моря представляется актуальным и необходимым для оценки и контроля кумулятивного эффекта в экосистеме Японского моря, обуслов-

ленного систематическим и длительным воздействием сети японских АЭС на всю экосистему. Экспериментальные и теоретические исследования, связанные с этой проблемой будут, по-видимому, становиться всё более актуальными по мере интенсификации эксплуатации АЭС и развития ядерных промышленных технологий в рассмотренном регионе.

*Работа выполнена при частичной поддержке программы фундаментальных исследований РАН «Электродинамика атмосферы, радиофизические методы исследований атмосферных процессов».*

### Литература

1. Израэль Ю. А. Радиоактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий / Ю. А. Израэль. – СПб. : Прогресс-погода, 1996. – 356 с.
2. Радиация. Дозы, эффекты, риск: пер. с англ. – М. : Мир, 1988. – 79 с.
3. McCombie C. Nuclear waste management worldwide / C. McCombie // Physics today. – 1997. – Vol. 50. – № 6. – P. 56–62.
4. Матвеев Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы / Л. Т. Матвеев – Л. : Гидрометеиздат, 1965. – 876 с.
5. Четкин Ю. В. Очистка радиоактивных газообразных отходов АЭС / Ю. В. Четкин, Е. К. Яшкин, В. М. Ещеркин. – М. : Энергоиздат, 1986. – 52 с.
6. Вайсберг Дж. С. Метеорология. Погода на Земле / Дж. С. Вайсберг. – Л. : Гидрометеиздат, 1980. – 248 с.
7. Хргиан А. Х. Физика атмосферы. Том 2 / А. Х. Хргиан. – Л. : Гидрометеиздат, 1976. – 320 с.
8. Boyarchuk K. A. Impact of radioactive contamination on electric characteristics of the atmosphere. New remote monitoring technique / K. A. Boyarchuk, A. M. Lomonosov, S. A. Pulnits, V. V. Hegai // BRAS Physics/Supplement Physics of Vibrations. – 1997. – Vol. 61. – № 4. – P. 260–266.
9. Боярчук К. А. Нейтральный кластер и его влияние на электромагнитные эффекты в атмосфере / К. А. Боярчук, А. В. Карелин, Р. В. Широков // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 41. – № 4. – С. 537–549.
10. Боярчук К. А. Базовая модель кинетики ионизированной атмосферы / К. А. Боярчук, А. В. Карелин, Р. В. Широков. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2006. – 204 с.
11. Боярчук К. А. Влияние мощности ионизирующего излучения на электрические эффекты в атмосфере / К. А. Боярчук, А. В. Карелин, Р. В. Широков // Известия вузов. Радиофизика. – 2007. – Т. 1. – № 1. – с. 9–19.
12. Карелин А. В. Механизм генерации электричества в грозовых облаках и тропических ураганах / А. В. Карелин // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 118. – № 5. – С. 45–49.
13. Hegai V. V. The formation of a cavity in the night-time midlatitude ionospheric E-region above a thundercloud / V. V. Hegai, V. P. Kim, P. V. Illich-Svitych // Planet. Space Sci. – 1990. – Vol. 38. – № 6. – P. 703–707.
14. Park C. G. Penetration of thundercloud electric fields into the ionosphere and magnetosphere. 1. Middle and subauroral latitudes / C. G. Park, M. Dejnacarina // J. Geophys. Res. – 1973. – Vol. 78. – № 28. – P. 6623–6633.

15. Velinov P. I. Modelling the penetration of thundercloud electric fields into the ionosphere / P. I. Velinov, P. T. Tonev // J. Atmos. Terr. Phys. – 1995. – Vol. 78. – № 6. – P. 687 – 694.

*Поступила в редакцию 20.03.2012*

**Кирилл Александрович Боярчук**, д-р физ.-мат. наук, генеральный директор,  
т. (495) 994-51-10, e-mail: kaboyar@mail.ru.

**Виталий Павлович Ким**, канд. физ.-мат. наук, ведущий научн. сотрудник, т. (496) 751-97-80.  
**Валерий Варламович Хегай**, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, т. (496) 751-97-80.

**Александр Витальевич Карелин**, д-р физ.-мат. наук, начальник отдела,  
т. (495) 513-54-01, e-mail: avkarelin@mail.ru.