

## ПОЗИЦИОННЫЕ СПОСОБЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ В НИЖНИХ СЛОЯХ АТМОСФЕРЫ

*Исследованы позиционные способы создания пространственно-распределенной концентрации энергии СВЧ излучения с помощью произвольно позиционированных источников для искусственного образования осадков в нижних слоях атмосферы. Показано, что для заданной конфигурации позиционирования излучателей концентрация энергии может осуществляться различными способами: энергетическим, частотным, фазовым, угловым и поляризационным. Наибольшей эффективностью обладают угловой и фазовый способ. Рассмотрены особенности реализации и эффективность указанных способов концентрации энергии.*

*Ключевые слова: СВЧ излучение, позиционированные источники излучения, пространственно-распределенная концентрация энергии.*

B.B. POSPELOV

National Institute of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine

O.N. SHINKORUK

Khmelnitsky National University

## POSITION THE SPATIAL-DISTRIBUTION OF THE CONCENTRATION OF MICROWAVE RADIATION IN THE LOWER ATMOSPHERE

*Abstract – explored ways to create a position spatially distributed energy density of microwave radiation using randomly positioned sources for artificial precipitation formation in the lower atmosphere. It is shown that for a given configuration of positioning emitters concentration of energy can be done in different ways: energy, frequency, phase, angle and polarization. Have the greatest efficiency and the phase angle method. The features of the implementation and effectiveness of these methods, the concentration of energy.*

*Keywords: microwave radiation, radiation sources are positioned spatially-distributed energy concentration.*

**Постановка проблемы.** Концентрация СВЧ излучения в различных слоях атмосферы в настоящее время представляет интерес для широкого круга научных и прикладных задач. Одной из важных научных и прикладных задач является использование СВЧ излучения для искусственной инициации осадков с целью тушения ландшафтных пожаров. Учитывая значительную площадь ландшафтных пожаров, а также и то, что они протекают на открытой местности, для их эффективного тушения требуется доставка в зону пожара большого количества различных огнетушащих средств. Создание и доставку необходимого количества огнетушащего средства можно осуществить путём искусственного инициирования осадков в нижних слоях атмосферы путем воздействия СВЧ излучения. При этом возникает проблема создания пространственно-распределенной концентрации высокой плотности энергии СВЧ излучения, способного инициировать искусственное образование осадков, в нижних слоях атмосферы. Такая пространственно-распределенная концентрация может быть создана с помощью нескольких менее мощных пространственно позиционированных СВЧ излучателей. В связи с этим актуальной становится проблема создания пространственно-распределенной концентрации высокой плотности энергии СВЧ излучения в нижних слоях атмосферы с помощью нескольких произвольно позиционированных излучателей.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Искусственное воздействие на нижние слои атмосферы для инициации осадков в основном осуществляется за счёт введения активных центров конденсации [1]. Среди таких центров наибольшей активностью обладают электрически заряженные ядра в виде твёрдых и жидких частиц с определенной концентрацией заряда на своей поверхности, а также и ионы [2-4]. Вопросам создания заряженных ядер и их доставки в район пожара посвящены работы [5, 6]. Однако создание заряженных ядер в нижних слоях атмосферы на высотах от 1 км до 5 км целесообразней производить за счет искусственной ионизации имеющихся на этих высотах облачных образований путем воздействия на них СВЧ излучения [7]. Для этого требуется в нижних слоях атмосферы создавать достаточно высокий уровень излучения. Например, в [11] исследуются возможные варианты фокусировки СВЧ излучения для беспроводной передачи энергии на космические объекты. Основное внимание уделяется решению проблемы фокусировки СВЧ излучения в заданной точке пространства с помощью многопозиционных систем линейной пространственной структуры при значительном числе излучателей. При этом создание пространственно-распределенной концентрации плотности энергии СВЧ излучения в нижних слоях атмосферы малым числом произвольно позиционированных излучателей с целью искусственной инициации осадков там не рассматривается.

**Постановка задачи и её решение.** Целью работы является исследование позиционных способов создания пространственно-распределенной концентрации СВЧ излучения с помощью малого числа произвольно позиционированных источников для искусственного образования осадков в нижних слоях атмосферы.

В случае образования в активной зоне облачности требуемой концентрации ионов, как центров коагуляции, происходит интенсификация процессов образования капель и выпадение осадков. Обеспечение требуемой ионной концентрации в возмущенных нижних слоях атмосферы возможно лишь при определенных параметрах внешнего возбуждающего СВЧ излучения. В работах [8, 9] экспериментально определено критическое значение амплитуды напряженности, при которой имеет место процесс искусственного образования капель. Например, для СВЧ излучения на частоте 2,45 ГГц критическое

значение напряженности составляет порядка  $0,1 \text{ кВм}^{-1}$ . В работе [10] теоретически обоснована возможность создания такой напряженности и для частоты  $10 \text{ ГГц}$ . Для создания критической напряженности поля в нижних слоях атмосферы на высотах  $1\text{--}5 \text{ км}$  необходимы достаточно мощные одиночные источники СВЧ излучения. Обеспечить такую напряженность возможно путем пространственно-распределенной концентрации энергии СВЧ излучения создаваемого несколькими излучателями меньшей мощности.

Пусть используется  $N$  источников СВЧ излучения, координаты которых в прямоугольной системе координат определяются векторами  $\vec{R}_n$ , где  $n=1,2,\dots,N$ . В зоне планируемой искусственной ионизации нижних слоев атмосферы выделим соответствующие произвольные точки наблюдения поля, координаты которых определяются векторами  $\vec{r}_n$ .

Тогда для произвольного момента времени  $t$  напряженность поля в заданных точках  $\vec{r}_n$  от  $N$  источников СВЧ излучения с произвольными характеристиками, будет определяться

$$\vec{E}_{\Sigma}(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_N, t) = \sum_{n=1}^N \vec{e}_n E_n h_1(f_n, \phi_n, t) h_2(f_n, \vec{R}_n, \vec{r}_n) F_n[\theta_n, \phi_n, \vec{r}_n], \quad (1)$$

где  $\vec{e}_n$ ,  $E_n = \sqrt{60 P_n G_n}$ ,  $P_n$ ,  $G_n$  – вектор поляризации, показатель энергетического ресурса, мощность и коэффициент направленного действия  $n$ -го излучателя;  $h_1(f_n, \phi_n, t) = e^{-j(2\pi f_n t + \phi_n)}$  – функции частотно-фазовых параметров излучений, а  $f_n$  и  $\phi_n$  определяют соответствующую частоту и начальную фазу для  $n$ -го излучателя;  $h_2(f_n, \vec{R}_n, \vec{r}_n) = e^{-j2\pi f_n |\vec{r}_n - \vec{R}_n|/c} / |\vec{r}_n - \vec{R}_n|$  – функции пространственного позиционирования излучателей для точек  $\vec{r}_n$ ;  $k$ ,  $c$  – волновое число и скорость света;  $F_n[\theta_n, \phi_n, \vec{r}_n]$  – характеристики направленности излучателей (по напряженности) относительно направлений, определяемых векторами  $\vec{r}_n$  точек наблюдения.

Следуя (1), для заданной конфигурации позиционирования СВЧ излучателей концентрация энергии их излучения может осуществляться различными способами: энергетическим, частотным, фазовым, угловым и поляризационным. Возможны также способы концентрации, основанные на комбинации указанных выше способов. При этом основные характеристики пространственно-распределенной концентрации СВЧ энергии в соответствии с указанными способами будут различными.

Будем полагать, что для реализации позиционных способов концентрации СВЧ энергии в нижних слоях атмосферы используется на порядок меньшее, по сравнению с [11], число излучателей с простейшими видами сигналов и режимами их излучения. Заметим, что для решения рассматриваемой задачи в качестве излучателей могут использоваться существующие радиолокационные станции специального назначения, например, типа 35Д6, отечественного производства. Основные характеристики для подобного типа излучателей выбирались следующими: импульсная мощность –  $350 \text{ кВт}$ ; диапазон частот –  $2900\text{--}3200 \text{ МГц}$ ; ширина диаграммы направленности по азимуту –  $2$  градуса; суммарная ширина диаграммы направленности по углу места –  $30$  градусов; рабочая длина волны –  $0,1 \text{ м}$ .

Рассмотрим первое приближение (без учета затухания, рефракции и рассеяния волн в неоднородной атмосфере) решения задачи пространственно-распределенной концентрации СВЧ энергии, создаваемой малым числом подобных источников. Специфика этого решения задачи связана, прежде всего, с направленностью антенных систем излучателей и возможностью или невозможностью обеспечения когерентного режима излучения для заданной группы позиционированных излучателей. Высокая направленность антенн подобных излучателей в одной или двух плоскостях требует предварительного их наведения в заданную точку или определенную область пространства – соответствующую фокусировку диаграмм направленности антенн излучателей. Другая особенность связана с анализом структуры пространственно-распределенной концентрации СВЧ энергии для различных точек наблюдения области фокусировки антенн и определением границ пространственной области, в которой уровень энергии не ниже условно заданной величины. В рассматриваемом случае в качестве такого условного уровня выбиралась величина, необходимая для обеспечения процесса искусственной ионизации, равная  $100 \text{ мкВт/см}^2$ . При этом определенный интерес вызывает изучение влияния на структуру пространственного распределения концентрации СВЧ энергии когерентного режима излучения, а также пространственного фазирования сигналов излучателей в точках наблюдения, совпадающих и несовпадающих с точкой фокусировки антенн (ТФА).

Рассмотрим особенности способов концентрации СВЧ энергии для различного числа и типа конфигураций пространственного разнесения излучателей типа 35Д6. Для этого будем полагать, что для точек наблюдения выполняется условие:  $\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_N = \vec{r}_1$ , а точка фокусировки антенн определяется вектором  $\vec{r}_F$ . Тогда пространственное распределение концентрации СВЧ энергии

$$\Pi(\vec{r}_1, \vec{r}_F) = \vec{E}_{\Sigma}(\vec{r}_1, \vec{r}_F) \vec{E}_{\Sigma}(\vec{r}_1, \vec{r}_F)^*, \quad (2)$$

где  $\vec{r}_1 = (x, y, z)$ , а  $\vec{r}_F = (xf1, yf1, zf1)$ . Здесь  $x, y, z$  и  $xf1, yf1, zf1$  являются координатами векторов точек наблюдения и фокусирования антенн соответственно. Для двухпозиционного когерентного излучателя с симметричным расположением излучателей вдоль оси  $Ox$  на расстоянии  $50 \text{ м}$  относительно начала координат при фокусировке антенн излучателей в точке оси  $Oz$  на высоте  $1000 \text{ м}$  пространственное

распределение концентрации СВЧ энергии (2) при вариации координат точек наблюдения вдоль соответствующих осей представлено на рис.1, а, б, в.

На рис.1, г для сравнения показано распределение энергии вдоль оси OZ, но в случае смещения точки фокусирования антенн по оси OX на величину 5,5 м. При этом с увеличением смещения по оси OX возрастает частота периодического изменения энергии поля вдоль оси OZ. Так, например, при смещении точки фокусировки антенн по оси OX на величину 0,5 м распределение вдоль соответствующих осей принимает вид, показанный на рис. 2, а,б.

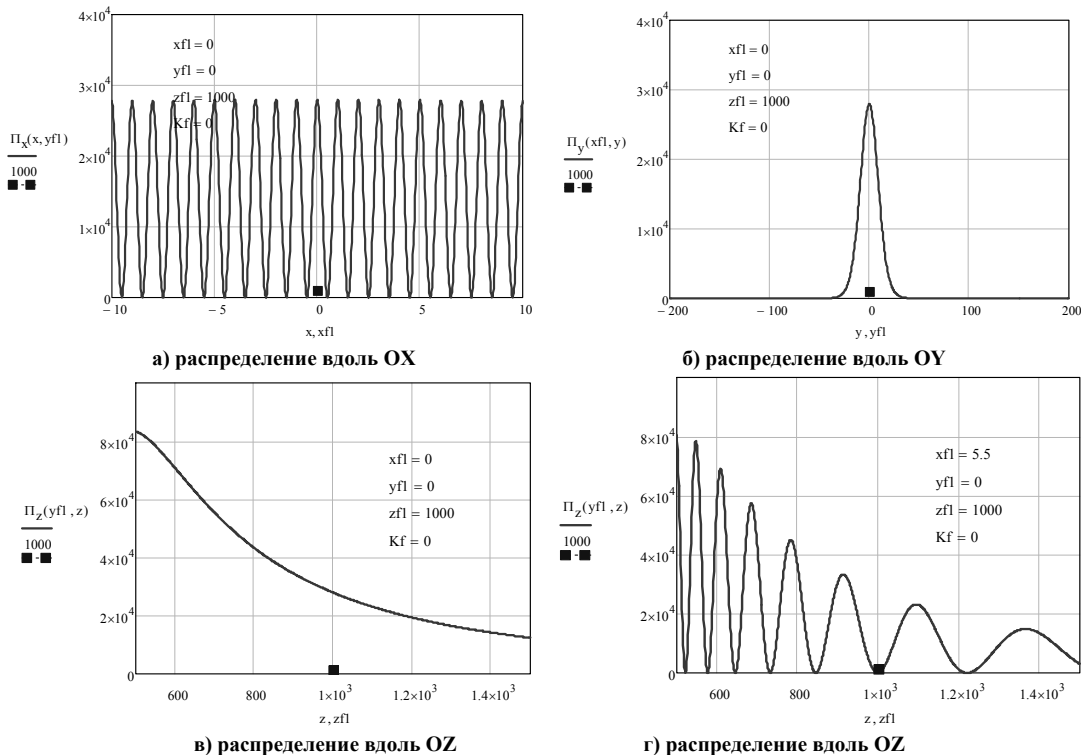


Рис. 1. Распределение СВЧ энергии для двухпозиционного когерентного излучателя

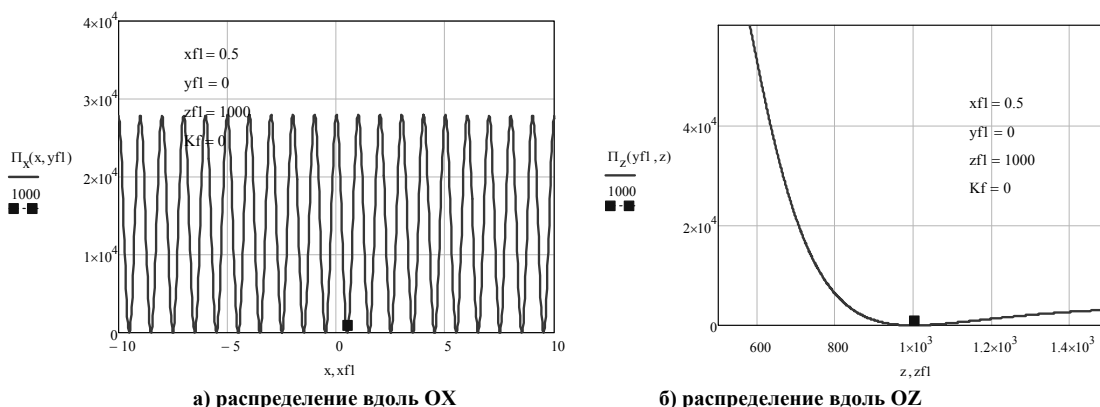


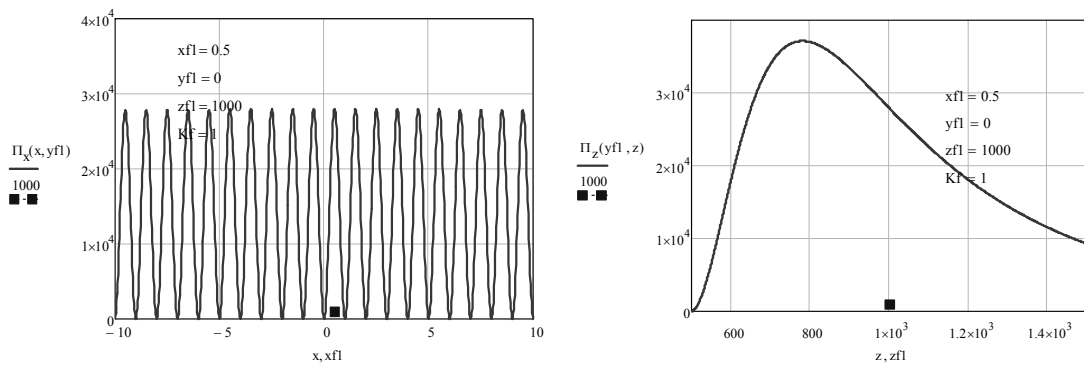
Рис. 2. Распределение СВЧ энергии для двухпозиционного когерентного излучателя при смещении точки фокусировки антенн

В этом случае фазирование сигналов излучателей (рис. 3, а, б) позволяет осуществить концентрацию энергии в заданной точке фокусировки антенн.

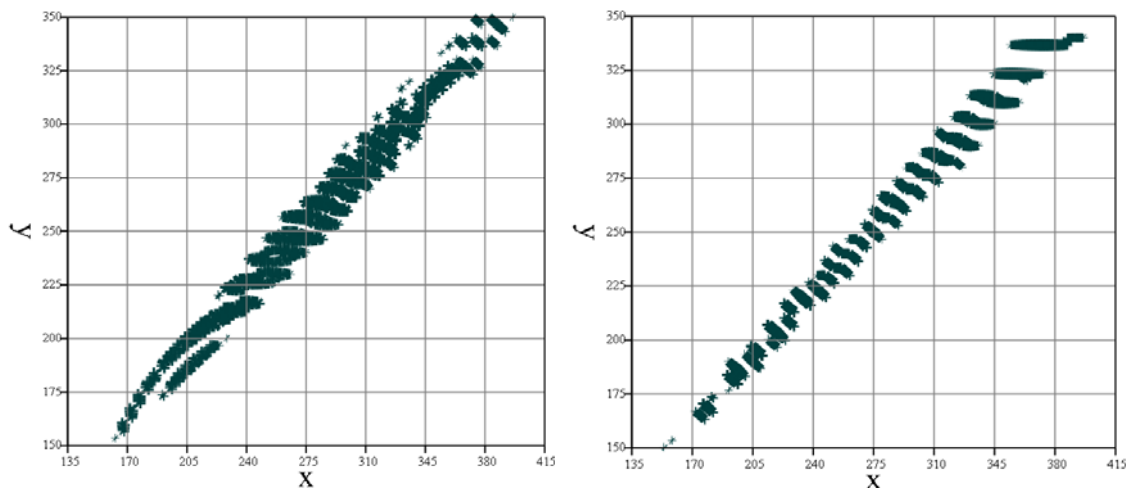
В случае использования некогерентных излучателей характер изменения пространственной концентрации энергии поля сохраняется, изменяется лишь положение экстремумов и их максимальное значение, которое становится случайным. Если используются излучатели с несимметричным позиционированием относительно осей OX и OY, то периодический характер изменения пространственной концентрации энергии поля вдоль осей сохраняется в достаточно широкой области значений координат. При этом с увеличением отклонения от точки фокусировки антенн по осям OX и OY снижается уровень максимальных значений концентрации энергии поля. На рис. 4 представлено горизонтальное сечение области пространственной концентрации энергии поля, превышающей пороговый уровень, равный 100 мкВт/см<sup>2</sup>, создаваемой двухпозиционным некогерентным излучателем с координатами  $x_1 = -50$ ,  $y_1 = -10$ ,  $x_2 = 50$  и  $y_2 = 50$  метров соответственно в точке фокусировки антенн с координатами (260; 240; 1000) метров.

В этом случае общий объем атмосферы, в котором пространственная концентрация энергии поля превышает заданный уровень облучения, составляет примерно 4 000 000 м<sup>3</sup>. При некогерентных излучателях фазирование сигналов практически не оказывает положительного эффекта, а распределение

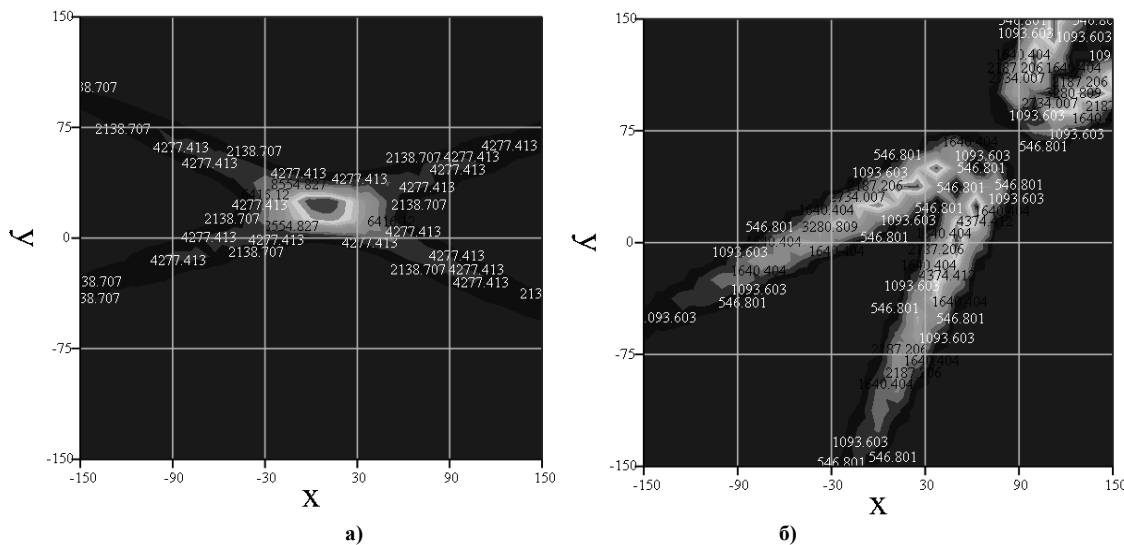
носит случайный характер с практически неизменной максимальной энергией и случайным пространственным положением этих максимумов. Поэтому для задачи пространственно-распределенной концентрации энергии СВЧ излучения можно рекомендовать использование некогерентных двухпозиционных излучателей типа 35Д6 с фокусировкой антенн в заданной области пространства (не совпадающей с областью центральной симметрии двух излучателей). Если критичным является обеспечение концентрации энергии в определенной точке, то нужно использовать когерентный режим излучения с фазированием сигналов в точке фокусировки антенн излучателей. При этом эффективность процесса фазирования сигналов в заданной точке будет зависеть от соотношения фаз сигналов, обусловленных неоднородностью тропосферы.



а) распределение вдоль OX  
 б) распределение вдоль OZ  
**Рис. 3. Распределение СВЧ энергии для двухпозиционного когерентного излучателя при смещении точки фокусировки антенн на 0,5 м**



а) высота 1000 м  
 б) высота 1300 м  
**Рис. 4. Распределение СВЧ энергии двухпозиционного некогерентного излучателя для различных высот**



**Рис. 5. Распределение СВЧ энергии двухпозиционного когерентного излучателя для различных точек фокусирования антенн**

Следует заметить, что в случае использования когерентных излучателей распределение энергии в определенных точках фокусировки антенн может существенно снижаться (точка с координатами (8 м; 20 м;

1000 м) на рис.5, а) и даже быть равной нулю (точка с координатами (80 м; 70 м; 1000 м) на рис.5, б). Происходит это по причине нежелательных фазовых соотношений сигналов в этих точках.

Если сигналы в точке фокусировки антенн (рис.5, б) имеют случайную фазу, то энергия результирующего поля в этой точке существенно отличается от нуля. В этом случае использование некогерентных излучателей оказывается полезным.

Для произвольного четырехпозиционного излучателя, координаты источников которого составляют  $x_1 = -800$ ,  $y_1 = 0$ ,  $x_2 = -500$ ,  $y_2 = -500$ ,  $x_3 = 0$ ,  $y_3 = -800$ ,  $x_4 = -700$  и  $y_4 = 500$  метров соответственно распределение энергии в области пространства в случае когерентных и некогерентных излучателей приведены на рис.6.

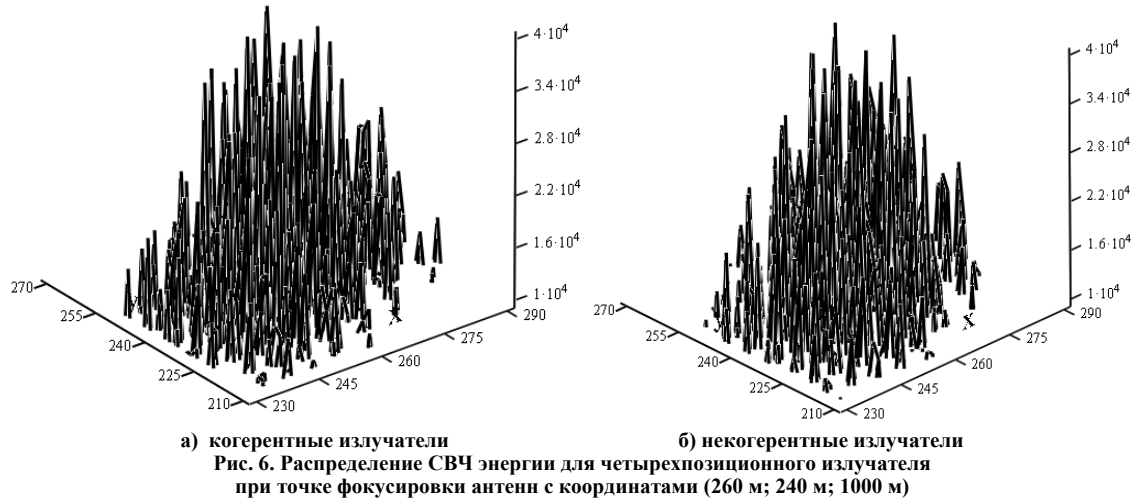


Рис. 6. Распределение СВЧ энергии для четырехпозиционного излучателя при точке фокусировки антенн с координатами (260 м; 240 м; 1000 м)

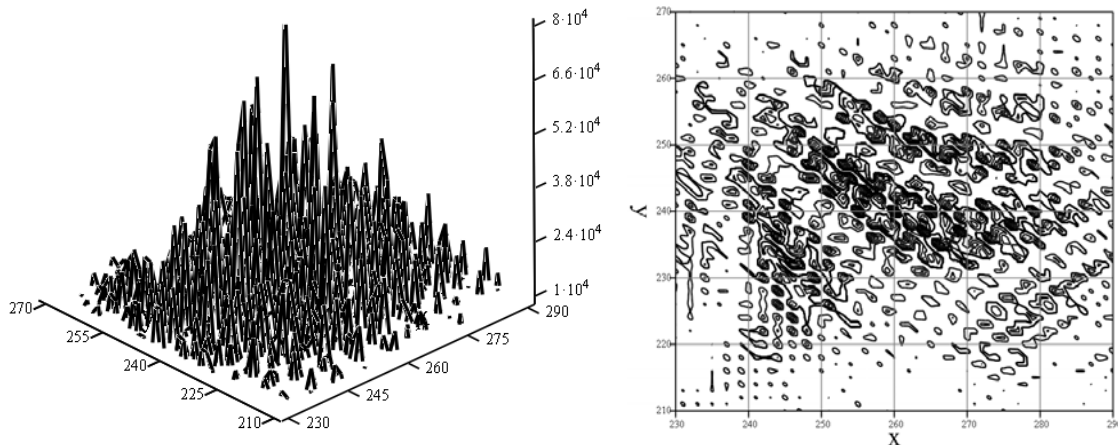


Рис. 7. Распределение СВЧ энергии для пятипозиционного излучателя при точке фокусировки антенн с координатами (260 м; 240 м; 1000 м)

Из анализа данных на рис. 6 следует, что использование некогерентных излучателей несколько снижает максимальное значение энергии и практически не изменяет общий характер пространственной концентрации энергии поля. Объясняется это эффектом усреднения излучений со случайными фазами в наблюдаемых точках пространства. Объем области облучения тропосферы выше порогового уровня  $10000 \text{ В}^2/\text{м}^2$  в рассматриваемом случае составляет около  $13\,600\,000 \text{ м}^3$ . При увеличении числа излучателей зона облучения расширяется с одновременным возрастанием уровня концентрации энергии (рис. 7). Так, например, для пяти излучателей максимальный уровень энергии составляет порядка  $60000\text{--}80000 \text{ В}^2/\text{м}^2$ .

Таким образом, выполнено исследование позиционных способов создания пространственно-распределенной концентрации СВЧ излучения с помощью произвольно позиционированных источников излучения для искусственного образования осадков в нижних слоях атмосферы. Показано, что для заданной конфигурации позиционирования СВЧ излучателей концентрация энергии может осуществляться различными способами: энергетическим, частотным, фазовым, угловым и поляризационным. Наибольшей эффективностью обладают угловой и фазовый способ. В общем случае при реализации многопозиционного излучателя необходимо обеспечивать соответствующую угловую фокусировку диаграмм направленности антенн излучателей и компенсацию фазовых различий излучаемых сигналов в точке фокусировки антенн, обусловленных заданной конфигурацией излучателя. В этом случае в меньшей степени будут сказываться случайные фазовые различия сигналов, обуславливаемые режимами излучения и неоднородностью среды их распространения. Применение в составе многопозиционного излучателя 3–5 и более излучателей позволяет использовать некогерентный режим излучения, что существенно упрощает его практическую реализацию. При этом с ростом числа излучателей в меньшей степени сказывается влияние некогерентного режима их излучения на пространственное распределение концентрации СВЧ энергии. Объясняется это эффектом

усреднения фазовых рассогласований сигналов в области фокусировки антенн. Этот эффект сопровождается незначительными потерями в максимальном уровне локальной концентрации энергии и расширении области пространства, в которой уровень энергии превышает заданный. В частном случае процесс фазирования излучаемых сигналов может быть исключен, но при этом конфигурация многопозиционного излучателя должна быть такой, чтобы точка фокусировки антенн располагалась вдоль его оси центральной симметрии. В общем случае при реализации многопозиционных излучателей целесообразно использовать излучатели с максимально широкими характеристиками направленности антенн в обеих плоскостях и высоким энергетическим потенциалом. В наибольшей степени указанным требованиям удовлетворяют большинство из существующих радиолокационных станций специального назначения соответствующего диапазона волн.

### Литература

1. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы / Л.Г. Качурин. – Л. : Гидрометеоздат, 1990. – 463 с.
2. Ивлев Л.С. Физика атмосферных аэрозольных систем / Л.С. Ивлев, Ю.А. Довгалюк. – СПб : НИИХ СПбГУ, 1999. – 194 с.
3. Куни Ф.М. К теории зародышеобразования на заряженных ядрах. 2. Термодинамические параметры равновесного зародыша / Ф.М. Куни, А.К. Щекин, А.И. Русанов // Коллоидный журнал. – 1982. – Т. 44. № 6. – С. 1062–1068.
4. Палей А.А. Исследование процессов конденсации паров на электрически заряженных аэрозольных частицах [Электронный ресурс] / А.А. Палей, В.Б. Лапшин, Н.В. Жохова, В.В. Москаленко // Исследовано в России : электронный научный журнал. – Режим доступа : <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/027.pdf>.
5. Пат. № 2 112 357, Россия, А01G15/00, E01H13/00. Способ воздействия на атмосферные образования / Лапшин В.Б.(RU); Палей А.А.(RU); Попова И.С.(RU); Танака Масаия (JP); Ямомото Кацужи (JP) ; патентообладатель Товарищество с ограниченной ответственностью "Простор Плюс" (RU); Фирма тяжелой промышленности "Ишикавадзима Харима" (JP). – № 95109596/13 ; заявл. 07.06.1995 ; опубл. 10.06.1998.
6. Пат. № 2 098 942, Россия, А01G15/00, E01H13/00. Способ воздействия на атмосферные образования / Пестов Дмитрий Александрович ; патентообладатель Пестов Дмитрий Александрович. – № 97108438/13 ; заявл. 04.06.1997 ; опубл. 20.12.1997.
7. Борисов Н.Д. Искусственная ионизированная область в атмосфере / Н.Д. Борисов, А.В. Гуревич, Г.М. Милих. – М. : ИЗМИРАН, 1986. – 348 с.
8. Кустов М.В. Исследование процессов искусственной стимуляции осадков при частичной ионизации атмосферы электромагнитным излучением / М.В. Кустов, Б.Б. Поспелов // Проблемы надзвичайних ситуацій. – Х. : НУЦЗУ, 2013. – Вып. 17. – С. 72–81.
9. Поспелов Б.Б. Исследование процесса нуклеации водяного пара под воздействием электромагнитного излучения / Б.Б. Поспелов, М.В. Кустов // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – Гомель : ГИИ МЧС РБ, 2013. – Т.8, № 2. – С. 45–50.
10. Кустов М.В. Параметры импульсного сверхвысокочастотного излучения для интенсификации осадкообразования в зоне чрезвычайных ситуаций / М.В. Кустов, Б.Б. Поспелов // Проблемы надзвичайних ситуацій. – Х. : НУЦЗУ, 2013. – Вып. 18. – С. 95–105.
11. Гомозов А.В. Фокусировка электромагнитного излучения и ее применение в радиоэлектронных средствах СВЧ / А.В. Гомозов, В.И. Гомозов, Г.В. Ермаков, С.В. Титов ; под ред. В.И. Гомозова. – Харьков : КП «Городская типография», 2011. – 330 с.

### References

1. Kachurin L.G. Fizicheskie osnovy vozdejstvija na atmosferynye processy / L.G. Kachurin // L.: Gidrometeozdat, 1990. – 463 s.
2. Ivlev L.S. Fizika atmosferynyh ajerozol'nyh sistem / L.S. Ivlev, Ju.A. Dovgaljuk. – SPb.: NIИХ SPbGU, 1999. — 194s.
3. Kuni F.M. K teorii zarodysheobrazovaniya na zarjzhenykh jadrakh. 2. Termodinamicheskie parametry ravnovesnogo zarodysha / F.M. Kuni, A.K.Shhekin, A.I.Rusanov // Kolloidnyj zhurn, 1982. - T.44. №.6. - S.1062-1068.
4. Palej A.A. Issledovanie processov kondensacii parov na jelektricheski zarjzhenykh ajerozol'nyh chasticah / A.A. Palej, V.B. Lapshin, N.V. Zhohova, V.V. Moskalenko // Jelektronnyj nauchnyj zhurnal «Issledovano v Rossii» - <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/027.pdf>.
5. Pat. № 2 112 357, Rossija, A01G15/00, E01H13/00 Sposob vozdejstvija na atmosferynye obrazovaniya / Lapshin V.B.(RU); Palej A.A.(RU); Popova I.S.(RU); Tanaka Masaija (JP); Jamomoto Kacuzhi (JP); patentoobladatel' Tovarishhestvo s ogranichennoj otvetstvennost'ju "Prostor Pljus" (RU); Firma tjazheloj promyshlennosti "Ishikavadzima Harima" (JP). – № 95109596/13; zajavl. 07.06.1995; opubl. 10.06.1998.
6. Pat. № 2 098 942, Rossija, A01G15/00, E01H13/00 Sposob vozdejstvija na atmosferynye obrazovaniya / Pestov Dmitriij Aleksandrovich; patentoobladatel' Pestov Dmitriij Aleksandrovich. – № 97108438/13; zajavl. 04.06.1997; opubl. 20.12.1997.
7. Borisov N.D. Iskusstvennaja ionizirovannaja oblast' v atmosfere / N.D. Borisov, A.V. Gurevich, G.M. Milih. – M.: IZMIRAN, 1986. – 348 s.
8. Kustov M.V. Issledovanie processov iskusstvennoj stimuljacii osadkov pri chastichnoj ionizacii atmosfery jelektromagnitnym izlucheniem / M.V. Kustov, B.B. Pospelov // Problemi nadzvichajnih situacij. – H.: NUCZU, 2013. – Vyp. 17. – S. 72-81
9. Pospelov B.B. Issledovanie processa nukleacii vodjanogo para pod vozdejstviem jelektromagnitnogo izluchenija / B.B. Pospelov, M.V. Kustov // Chrezvychajnye situacii: obrazovanie i nauka. – Gomel': GII MChS RB, 2013. – T.8, № 2. – S. 45-50.
10. Kustov M.V. Parametry impul'snogo sverhvisokochastotnogo izluchenija dlja intensifikacii osadkoobrazovaniya v zone chrezvychajnyh situacij / M.V. Kustov, B.B. Pospelov // Problemi nadzvichajnih situacij. – H.: NUCZU, 2013. – Vyp. 18. – S. 95-105
11. Gomozov A.V. Fokusirovka jelektromagnitnogo izluchenija i ee primenenie v radiojelektronnyh sredstvakh SVCh / A.V. Gomozov, V.I. Gomozov, G.V. Ermakov, S.V. Titov // pod red. V.I. Gomozova. – Har'kov: KP «Gorodskaja tipografija», 2011. - 330 s.