

## **ПОСТРОЕНИЕ СПЛОШНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ПОЛЯ СИСТЕМЫ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПОДХОДА**

### **Введение**

Вопросам создания метеорологических радиолокационных сетей в литературе уделяется достаточное внимание [1 – 6]. Но анализ источников показывает, что при их создании не рассматриваются вопросы построения радиолокационного поля. Созданию единого радиолокационного поля уделяется внимание при проведении военной деятельности [7]. Но единство поля в этом случае понимается как интеграция радиолокационных ресурсов разных ведомств, их совместное использование с целью уменьшения необходимого для создания радиолокационного поля количества радиолокационных станций, т.е. с целью экономии. Создание системы гидрометеорологического мониторинга как большой системы подразумевает построение потребного радиолокационного поля [8]. Под этим нужно понимать следующее: во-первых, сформированное радиолокационное поле должно быть сплошным или беспровальным, т.е. полностью и без провалов покрывать пространство наблюдений; во-вторых, сформированное радиолокационное поле должно быть устойчивым, т.е. при выходе из строя или подавлении помехами некоторой части радиолокаторов целостность поля не должна нарушаться или может уменьшиться на некоторую допустимую величину; в-третьих, сформированное радиолокационное поле должно быть многочастотным для обеспечения возможности реализации двухчастотного метода индикации града [9].

Статья посвящена созданию сплошного (беспровального) радиолокационного поля системы гидрометеорологического мониторинга, что, в случае реализации, позволит получить всю возможную радиолокационную информацию из пространства наблюдений. Объектом исследования является процесс радиолокационного гидрометеорологического мониторинга, а предметом исследования – радиолокационное поле, образуемое системой радиолокационного гидрометеорологического мониторинга.

Актуальность решения этой задачи сомнений не вызывает, поскольку наличие правильно построенной радиолокационной системы гидрометеорологического мониторинга и правильное использование полученной с ее помощью информации значительно повышает качество прогнозирования состояния атмосферы оперативными подразделениями службы погоды [10].

### **Цель и метод исследования**

Цель исследования – обоснование необходимости применения геометрического подхода к построению радиолокационного поля системы гидрометеорологического мониторинга – достигается на основе применения метода сравнительного анализа и количественной оценки параметров моделей различных вариантов построения радиолокационного поля.

### **Описание исследования и анализ его результатов**

Пространство наблюдений является той частью воздушного пространства, в которой существуют атмосферные объекты, явления и процессы, подлежащие радиолокационному мониторингу. Геометрически пространство наблюдений можно представить в виде цилиндрического объема, образующая которого проходит по границам исследуемой территории, а сверху и снизу этот объем ограничен плоскими основаниями, построенными на минимальной и максимальной потребной высоте (рис. 1). Минимальная потребная высота для радиолокационного поля системы гидрометеорологического мониторинга должна составлять около 0,5 км, а максимальная – до 20-25 километров [11].



Рис. 1

Построение сплошного радиолокационного поля предусматривает полное и наиболее точное покрытие им пространства наблюдений. Осуществляется это покрытие при помощи распределения зондирующего излучения в пространстве наблюдений и приеме из него сигналов, отраженных от метеорологических объектов и явлений. Зондирующее излучение в пространстве распределяется с помощью антенных систем. Понятно, что при большом пространстве наблюдений распределить в нем зондирующее излучение одной антенной не удастся. Нужна система антенн, т.е. множество радиолокационных станций, которые будут осуществлять обзор при помощи антенн. В этом случае одна радиолокационная станция образует зону обзора или зону наблюдения (на рис. 2, *а* – трехмерное изображение зоны обзора, на рис. 2, *б* – вертикальная проекция горизонтального сечения зоны обзора на определенной высоте). А множество радиолокационных станций образуют радиолокационное поле (рис. 3, *а* – трехмерное изображение радиолокационного поля, рис. 3, *б* – вертикальная проекция горизонтального сечения радиолокационного поля на определенной высоте). Возникает вопрос: каким образом расположить метеорологические радиолокационные станции для создания радиолокационного поля?

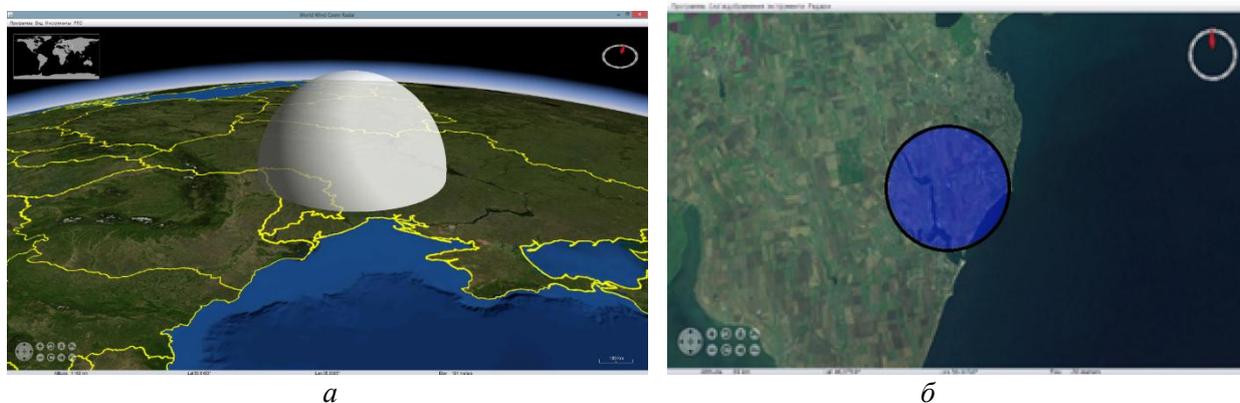


Рис. 2

Моделирование показывает, что желание оснастить радиолокатором каждую гидрометеорологическую станцию (рис. 4, *а*) приведет к получению ничем не оправданной сложности и энергетической избыточности системы мониторинга. Система будет иметь очень неравномерное распределение зондирующего излучения, а при сборе и отождествлении радиолокационной информации возникнут существенные трудности. Это хорошо иллюстрирует рис. 4, *б*. Зоны наблюдения многократно перекрываются, очень неравномерное распределение энергии в пространстве, что и будет вызвать упомянутые избыточность и сложность обработки информации.

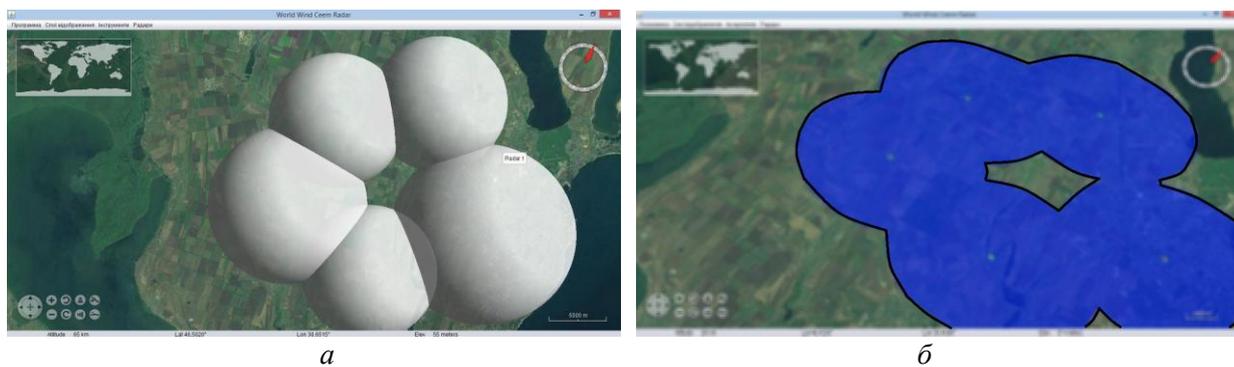


Рис. 3

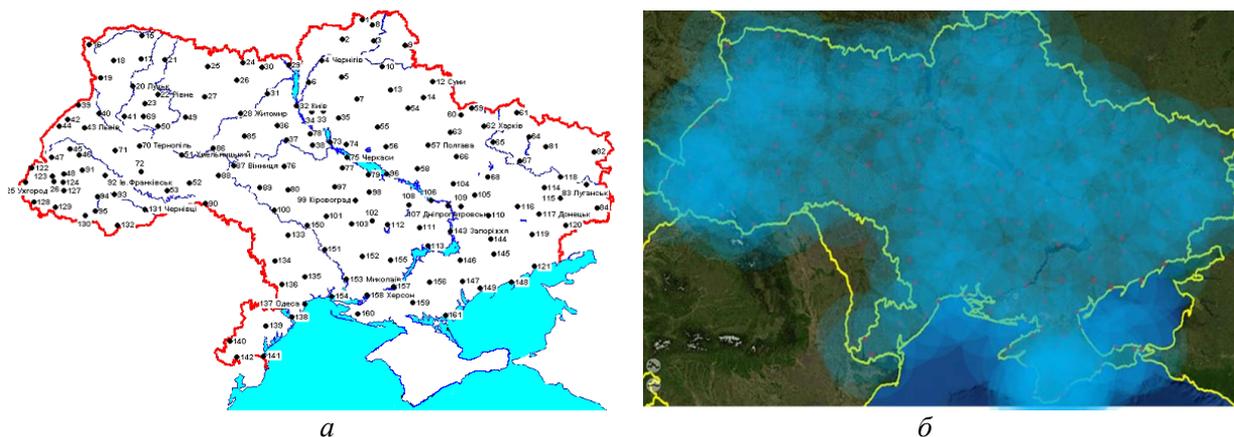


Рис. 4

Приведенный вариант построения радиолокационного поля можно выполнить с прореживанием радиолокаторов, но моделирование показывает, что недостатки от этого не исчезнут. При значительном прореживании и при сохранении позиций радиолокаторов привязанными к существующей сети гидрометеорологических станций увеличится минимальная высота радиолокационного поля. И избежать этого недостатка в существующей системе построения радиолокационной сети не удастся.

Предлагается применить для построения радиолокационного поля системы гидрометеорологического мониторинга геометрический подход. Он заключается в том, что радиолокаторы предполагается разместить в вершинах связанных простейших геометрических фигур – треугольников, квадратов, пятиугольников, шестиугольников и т.д. (рис. 5). Из геометрии известно, что сеть из пятиугольников и семиугольников нельзя без искажений выложить на плоскости [12]. Поэтому эти варианты размещения радиолокаторов рассматривать не будем, но в оценке параметров радиолокационного поля используем.

Реализация геометрического подхода при моделировании приводит к следующим результатам. Расположение радиолокаторов в вершинах треугольников обеспечивает полное перекрытие пространства наблюдений в горизонтальной плоскости и, при некотором сближении радиолокаторов, в вертикальной плоскости (рис. 6). При этом отсутствует существенная избыточность (сегменты более темного тона) по перекрытию в горизонтальной плоскости, свойственная предыдущему описанному случаю, но энергетическая избыточность в вертикальной плоскости будет существенной, и тем существенней, чем больше будет дальность действия радиолокатора, поскольку потребная высота верхней границы радиолокационного поля составляет всего 20-25 км.

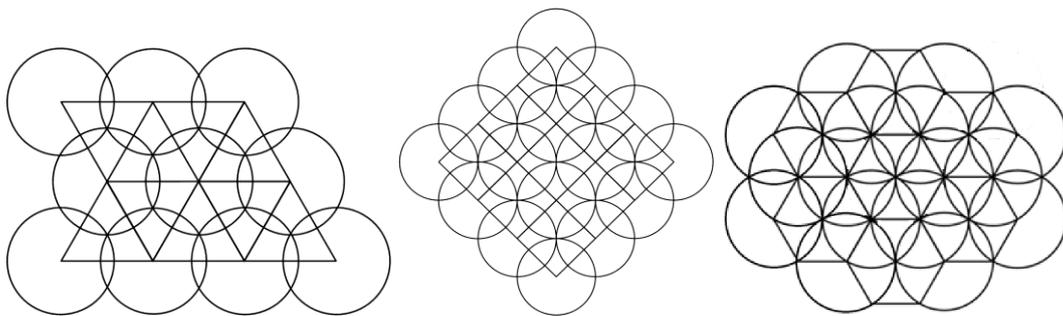


Рис. 5

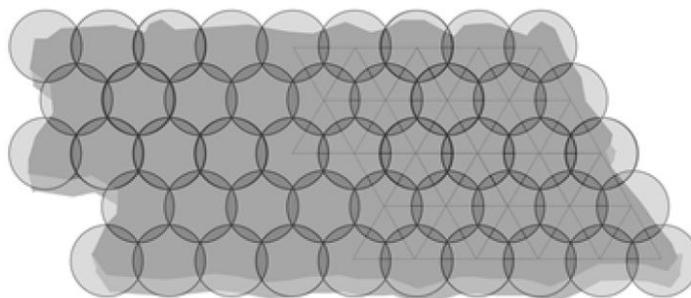


Рис. 6

Расположение радиолокаторов в вершинах квадратов также обеспечивает полное перекрытие пространства наблюдений в горизонтальной плоскости и, при некотором сближении радиолокаторов, в вертикальной плоскости (рис. 7). Однако при таком расположении видно явно большее перекрытие зон обзора радиолокаторов по сравнению с расположением в вершинах треугольников (более темные сегменты), что ухудшает энергетическую экономичность этого варианта построения радиолокационного поля.

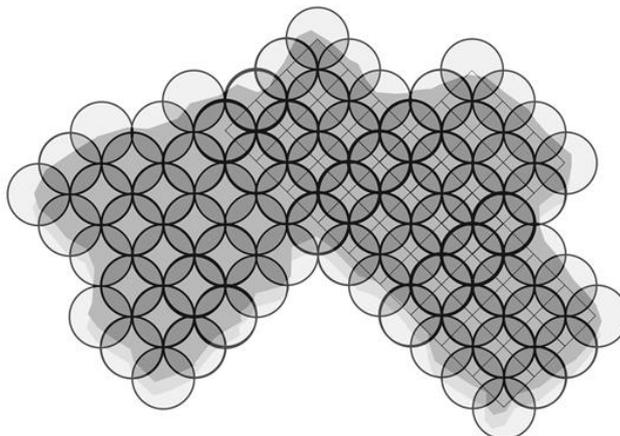


Рис. 7

Расположение радиолокаторов в вершинах шестиугольников также обеспечивает полное перекрытие пространства наблюдений в горизонтальной плоскости и, при некотором сближении радиолокаторов, в вертикальной плоскости (рис. 8). Но при подобном расположении явно видно еще большее, в середине практически полное, перекрытие зон обзора радиолокаторов по сравнению с предыдущими случаями (область серого тона), что еще больше ухудшает энергетическую экономичность этого варианта построения радиолокационного поля.

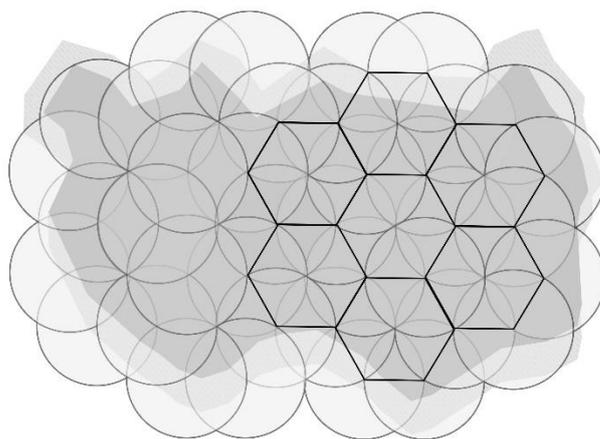


Рис. 8

При построении радиолокационного поля должна быть обеспечена его беспровальность начиная с минимальной требуемой высоты (0,5 км) до максимальной (20–25 км). Это достигается уменьшением сторон многоугольника до тех пор, пока в центре фигуры не произойдет касание зон обзора радиолокаторов, находящихся в вершинах многоугольника, как это видно на предыдущих рисунках. Тогда при дальности действия радиолокатора  $R$  сторона равностороннего треугольника должна быть равна  $2R\cos 30^\circ$  или  $1,732 R$ . Для других многоугольников данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Дальность действия радиолокатора	Расстояние между радиолокаторами ( $D=2R\cos X^\circ$ ) для формирования беспровального радиолокационного поля при расположении радиолокаторов в вершинах						
	на концах отрезка прямой линии	равностороннего треугольника	квадрата	правильного пятиугольника	правильного шестиугольника	правильного семиугольника	правильного восьмиугольника
	$X^\circ=0^\circ$	$X^\circ=30^\circ$	$X^\circ=45^\circ$	$X^\circ=54^\circ$	$X^\circ=60^\circ$	$X^\circ=64,3^\circ$	$X^\circ=67,5^\circ$
$R$	$D=2 \cdot R$	$D=1,732 \cdot R$	$D=1,414 \cdot R$	$D=1,176 \cdot R$	$D=1 \cdot R$	$D=0,87 \cdot R$	$D=0,76 \cdot R$

В результате анализа полученных данных можно прийти к выводу о том, что для построения радиолокационного поля нецелесообразно выбирать многоугольник с числом вершин (порядок многоугольника) больше шести, поскольку, в противном случае, начинают взаимно накладываться зоны обзора не только смежных радиолокаторов, но и далеко отстоящих друг от друга. А это – явная энергетическая избыточность и усложнение обработки из-за необходимости отождествления данных. Таким образом, при построении радиолокационного поля целесообразными остаются три варианта размещения радиолокаторов: в вершинах треугольников, квадратов и шестиугольников; пятиугольники отпадают по указанной ранее причине.

Для построения радиолокационного поля по приведенным выше вариантам качественной оценки недостаточно, нужна количественная оценка качества поля. Поэтому для количественной оценки энергетических характеристик поля представляет интерес выяснение коэффициента перекрытия радиолокационного поля и его энергетической экономичности в зависимости от варианта размещения радиолокаторов. Коэффициентом перекрытия  $K_p$  вполне логично назвать отношение суммарного объема зон наблюдения, обслуживаемого более чем одной радиолокационной станцией, к общему объему зон наблюдения, т.е.

$$K_{\Pi} = \frac{\sum_1^n V_{\text{совм}}}{\sum_1^n V_{\text{ЗН}}}, \quad (1)$$

где  $V_{\text{совм}}$  – объем области пространства, обслуживаемого двумя соседними радиолокаторами;  $V_{\text{ЗН}}$  – объем зоны наблюдения одного радиолокатора,  $n$  – порядок многоугольника.

При такой трактовке при полном совмещении позиций радиолокаторов  $K_{\Pi}=1$ , а если зоны наблюдения не пересекаются, то  $K_{\Pi}=0$ , что является вполне естественным.

Проверка практического применения этого коэффициента выявила ненужную сложность его расчета. Гораздо удобнее проводить расчеты, если использовать показатель перекрытия вертикальных проекций горизонтальных сечений зон наблюдения радиолокаторов на минимальной беспровальной высоте. В этом случае в (1) объемы заменяются на соответствующие площади вертикальных проекций этих объемов на горизонтальную плоскость, но смысл понятия перекрытия от этого не изменяется. Логично назвать такой показатель коэффициентом перекрытия в горизонтальной плоскости  $K_{\Pi\Gamma}$ , т.е.

$$K_{\Pi\Gamma} = \frac{\sum_1^n S_{\text{совм}}}{\sum_1^n S_{\text{ЗН}}}, \quad (2)$$

где  $S_{\text{совм}}$  – площадь проекции области пространства, обслуживаемого двумя соседними радиолокаторами,  $S_{\text{ЗН}}$  – площадь проекции зоны наблюдения одного радиолокатора,  $n$  – порядок многоугольника.

Для расчета  $K_{\Pi\Gamma}$  были применены известные из геометрии формулы для расчета площади круга  $S_{\text{кр}}=\pi R^2$  и площади сегмента  $S_{\text{сегм}} = \frac{R^2}{2} \left( \pi \frac{\alpha^\circ}{180^\circ} - \sin \alpha^\circ \right)$  [12]. Здесь  $R$  – дальность действия радиолокатора,  $\alpha$  – центральный угол, который опирается на сегмент, образующийся при пересечении двух зон обзора радиолокаторов. Расчеты для  $\alpha$  дали результаты, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Расположение радиолокаторов в вершинах			
равностороннего треугольника	квадрата	правильного пятиугольника	правильного шестиугольника
$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 108^\circ$	$\alpha = 120^\circ$

Дальнейшие расчеты позволили графически представить зависимость  $K_{\Pi\Gamma}$  от порядка многоугольника (рис. 9).

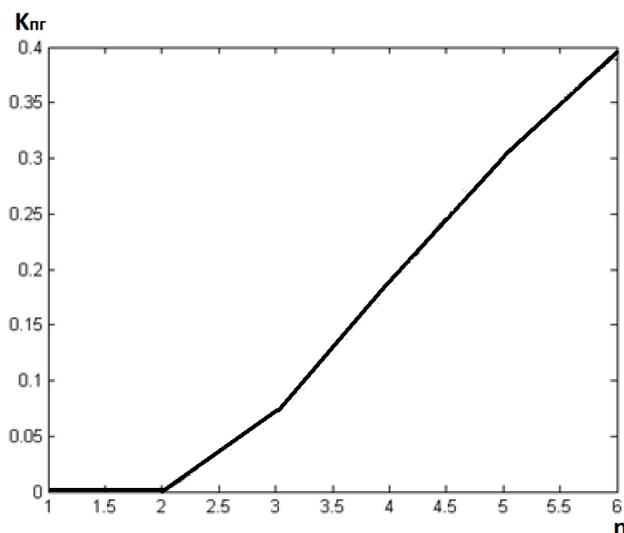


Рис. 9

Ход коэффициента перекрытия отражает то, что увеличение порядка многоугольника, в вершинах которых устанавливаются радиолокаторы, ведет к увеличению доли радиолокационного поля, обслуживаемой двумя, а то и тремя радиолокаторами, тем самым увеличивая непроизводительные затраты зондирующего излучения. Это обязательно надо учитывать при построении радиолокационного поля.

Как было отмечено выше, представляет интерес выяснение вопроса экономности распределения энергии зондирующего излучения внутри радиолокационного поля при взаимном наложении зон наблюдения радиолокаторов. Можно степень экономности характеризовать коэффициентом экономности  $K_э$ . Этот коэффициент должен быть равен единице при отсутствии взаимного наложения зон наблюдения и нулю при полном наложении. Поскольку экономность связана с взаимным перекрытием зон наблюдения, то решением является введение коэффициента  $K_э=1-K_{пр}$ . Ход этого коэффициента в зависимости от порядка многоугольника приведен на рис. 10.

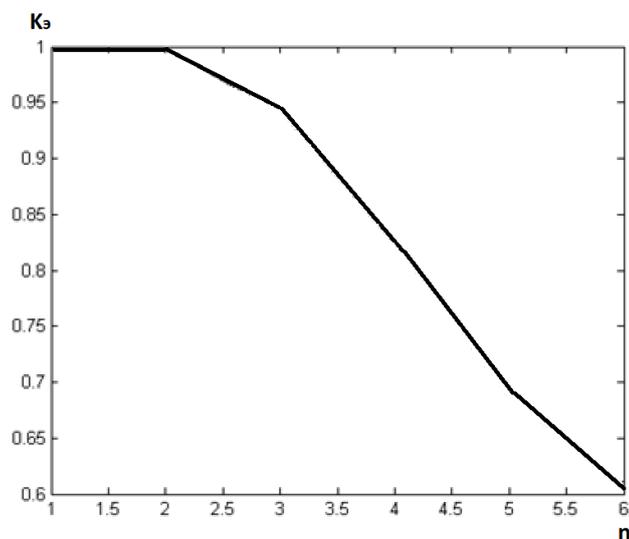


Рис. 10

Анализ графика на рис. 10 показывает, что отдельно стоящие радиолокаторы будут использовать энергию зондирующего излучения в наибольшей степени экономно (без учета вертикального распределения энергии). А при расположении их в вершинах шестиугольников только 60 % радиолокационного поля будет обслуживаться экономно, в остальной его части объекты, явления и процессы будут наблюдаться двумя радиолокаторами и более.

### Выводы

Исследование показало, что применение геометрического подхода к построению радиолокационного поля метеорологической радиолокационной системы мониторинга позволяет достаточно просто получить результат. Наиболее рациональным является размещение радиолокаторов в вершинах треугольников, квадратов и шестиугольников. Выбор варианта размещения позволит удовлетворить различные требования к метеорологической радиолокационной системе мониторинга: от наиболее экономного варианта расходования энергии зондирующего излучения до наиболее устойчивого варианта построения системы.

**Список литературы:** 1. *European Commission*, EUR 18567, „COST 75 – Advanced weather radar systems – International seminar”, ed. C.G. Collier, Luxemburg, Office for official publications of the European Communities. – 1999. – 858 p. 2. *Технический проект „Общесистемные решения по сбору, анализу, контролю и предоставлению радиолокационной информации от ДМРЛ-С”*. – Режим доступа: <http://www.aviamettelecom.ru/TP-DMRL-2014.pdf>. – Дата доступа: 15.09.2016. – Технический проект. 3. *Golden J.H.* The prospects and promise of

NEXRAD: 1990's and beyond / J.H. Golden // COST 73. – 1989. – P. 17–36. 4. *Принципы построения автоматизированных систем метеорологического обеспечения авиации*; под ред. Г.Г. Щукина. – Л. : Гидрометеиздат, 1991. – 373 с. 5. *Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети*; под ред. Г.Б. Брылева. – С.-Пб. : Гидрометеиздат, 2002. – 330 с. 6. *Радиолокационные метеорологические наблюдения. В 2-х т. Т.2*; под ред. А.С. Солонина. – С.-Пб. : Наука, 2010. – 518 с. 7. *Петрушенко, М.М., Карлов, В.Д.* Створення єдиного поля радіолокаційного контролю повітряного простору держави // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – 2010. – № 1 (3). – С. 111–116. 8. *Perelygin, B.V.* Reasonable deployment of radar field for environmental monitoring system // *Telecommunications and radio engineering*. – 2016. – Vol. 75. № 9. – P. 823–833. Doi: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i9.70. 9. *Абшаев, М.Т., Бурцев, И.И., Ваксенбург, С.И., Шевела, Г.Ф.* Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты. – Л. : Гидрометеиздат, 1980. – 231 с. 10. *Грачова, Н.Л., Кузнєцова, В.В., Романенко, Л.Н., Самарина, Л.П.* Дослідження радіолокаційних характеристик небезпечних явищ погоди на території України // *Наукові праці УкрНДГМІ*. – 2015. – Вип. 267. – С. 38–45. 11. *Перельгин, Б.В., Боровская, Г.А., Лужбин, А.М.* Анализ требований потребителей к характеристикам информации, получаемой от метеорологической радиолокационной системы мониторинга // *Радиотехника*. – 2016. № 187. – С. 58–65. 12. *Корн, Г., Корн, Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М. : Наука, 1984. – 832 с.

*Одесский государственный  
экологический университет*

*Поступила в редколлегию 11.11.2017*