

## СПОСОБ СОЗДАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРЫ

### Введение

В ряде стран созданы и функционируют радиолокационные сети мониторинга атмосферы или метеорологические радиолокационные сети [1 – 4]. Все они создавались разными способами и на основе известных требований, задаваемых заказчиками. Во всех случаях заказчики были разные, и их было много, поэтому все существующие сети обладают разными свойствами. Анализ показывает, что ни одна из этих сетей, несмотря на заявления о применении системного подхода, не построена на основе системного подхода к созданию больших систем, поэтому в них не удалось реализовать существенные возможности, которые предоставляет радиолокационный метод мониторинга атмосферы и, по этой причине, качество мониторинга существенно ниже потенциально возможного.

### Актуальность

Существует настоятельная необходимость разработать способ создания радиолокационной сети мониторинга атмосферы, позволяющий в наибольшей мере реализовать возможности радиолокационного метода мониторинга атмосферы и повысить качество мониторинга.

### Цель исследования

Цель исследования – разработка способа создания радиолокационной сети, позволяющего в наибольшей мере реализовать возможности радиолокационного метода мониторинга атмосферы и повысить качество мониторинга.

### Анализ существующих способов создания радиолокационных сетей

Способ создания радиолокационной сети для мониторинга атмосферы NEXRAD (США) заключается в том, что метеорологические радиолокаторы WSR-88D расставлены на поверхности Земли таким образом, при котором высота нижней границы сплошного радиолокационного поля, которое образует радиолокационная сеть, составляет 10000 футов или около 3 км [1]. При таком условии расстояние между радиолокаторами может достигать 440 км, что легко можно увидеть из рис. 1, на котором отображено расположение метеорологических радиолокаторов WSR-88D сети NEXRAD на континентальной части США в сочетании с горизонтальными сечениями их зон наблюдения на высоте 3 км. Импульсная излучаемая мощность WSR-88D составляет 250 кВт, что обеспечивает, по утверждению разработчиков, дальность в режиме измерения отражаемости 450 км и в режиме измерения скорости 250 км. Для обеспечения беспровальности радиолокационного поля при дальностях между радиолокаторами 440 км, как было указано выше, был разработан метеорологический радиолокатор DWSR-10001C EEC USA с импульсной излучаемой мощностью 1 МВт и дальностями действия в режиме измерения отражаемости более 600 км и в режиме измерения скорости 450 км. Таким образом, на высотах менее 3 км радиолокационное поле является очаговым и не покрывает пространство наблюдения.

Способ создания радиолокационной сети для мониторинга атмосферы MAPC (РФ) заключается в том, что метеорологические радиолокаторы ДМРЛ-С расставлены на поверхности Земли так, что расстояние между радиолокаторами равняется 300 км [2]. По мнению создателей сети, подобная дальность действия обусловлена тем, что наиболее опасные явления возникают летом, когда для надежного обнаружения летних кучевых облаков требуется невысокая плотность радиолокационных станций, а сплошное перекрытие зон наблюдения метеорологических радиолокаторов предусматривается только для основных промышленных

и сельскохозяйственных районов и авиационных трасс с интенсивной грозовой деятельностью. Остальная территория прикрывается дискретно. Наглядно построение сети МАРС приведено на рис. 2, на котором отображено расположение метеорологических радиолокаторов ДМРЛ-С на 140 позициях по итогам выполнения двух федеральных целевых программ „Геофизика” и „ОрВД”. Радиолокатор ДМРЛ-С излучает модулированный сложным образом сигнал импульсной мощностью более 15 кВт и обладает дальностью действия в режиме измерения отражаемости 250 км. Таким образом, по самому замыслу создателей сети по экономическим соображениям радиолокационное поле является очаговым и не покрывает пространство наблюдения даже при перекрытии зон наблюдения отдельных радиолокаторов.

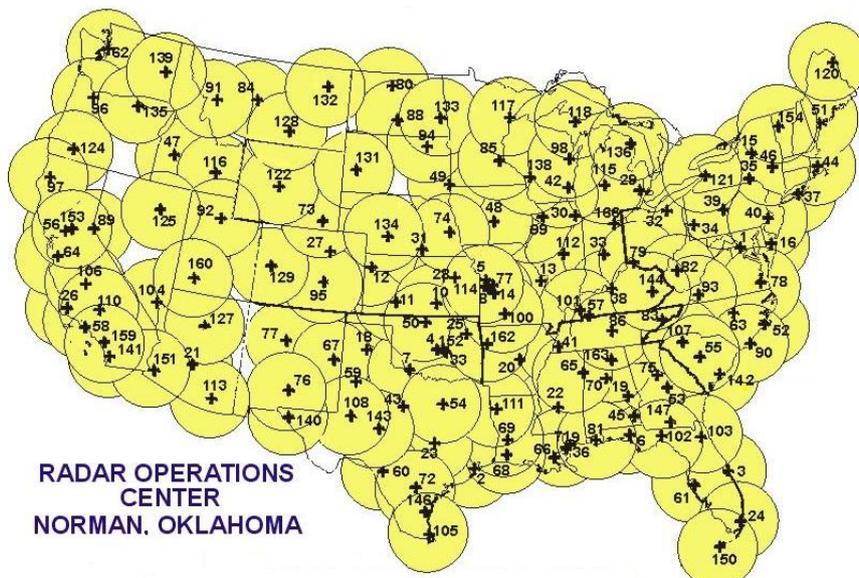


Рис. 1

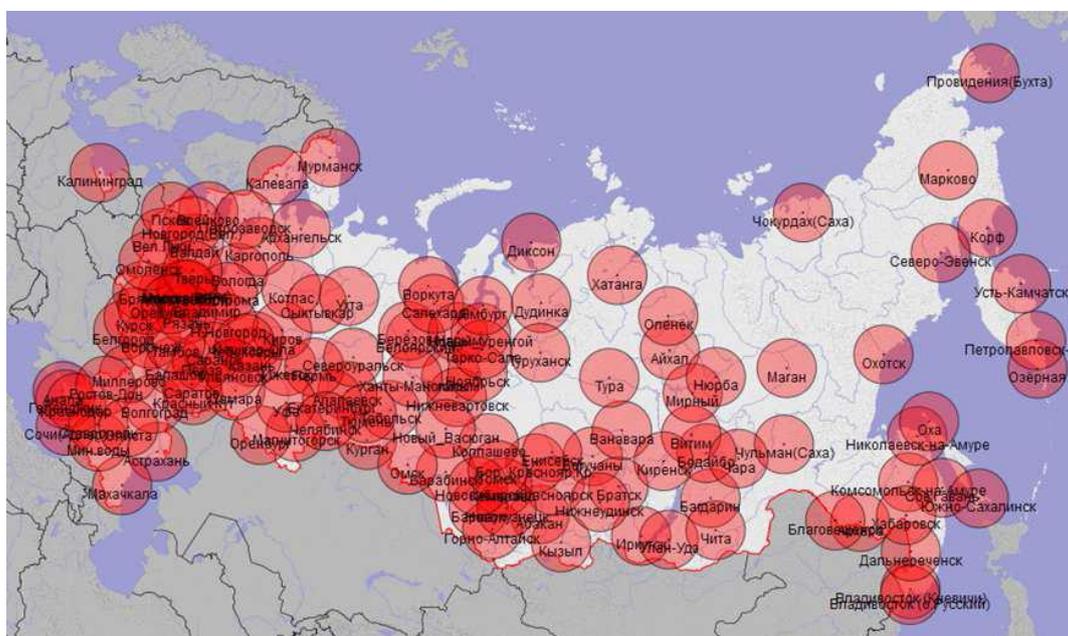


Рис. 2

Способ создания международной радиолокационной сети для мониторинга атмосферы (Западная Европа) обеспечивает нижнюю границу радиолокационного поля 1,5 км [3]. Эта сеть создана из 229 различных радиолокаторов на основе объединения сетей отдельных

стран, составляющих Евросоюз (рис. 3, *а*), поэтому она оказалась очень разнородной, как по задачам, так и по составу, поскольку в каждой из стран сеть строилась на основе разного понимания приоритетов [5]. Это привело к тому, что общая сеть не сформировалась как единая большая система, а смогла сформироваться только на информационном уровне как программа OPERA – Operational Program for the Exchange of Weather Radar Information (на рис. 3, *б* отмечены радиолокаторы, вошедшие в программу OPERA). Однако в проекте COST-75, посвященном совершенствованию европейской радиолокационной метеорологической сети, отмечалось, что создавать сеть нужно способом расстановки радиолокаторов на местности таким образом, чтобы они образовывали на местности треугольную сетку с длиной стороны равной 300 км [3, 4]. В дальнейшем создатели придерживались этого требования, насколько это было возможно. Таким образом, на высотах менее 1,5 км радиолокационное поле является разрывным, особенно в горных районах, и не покрывает пространство наблюдения.

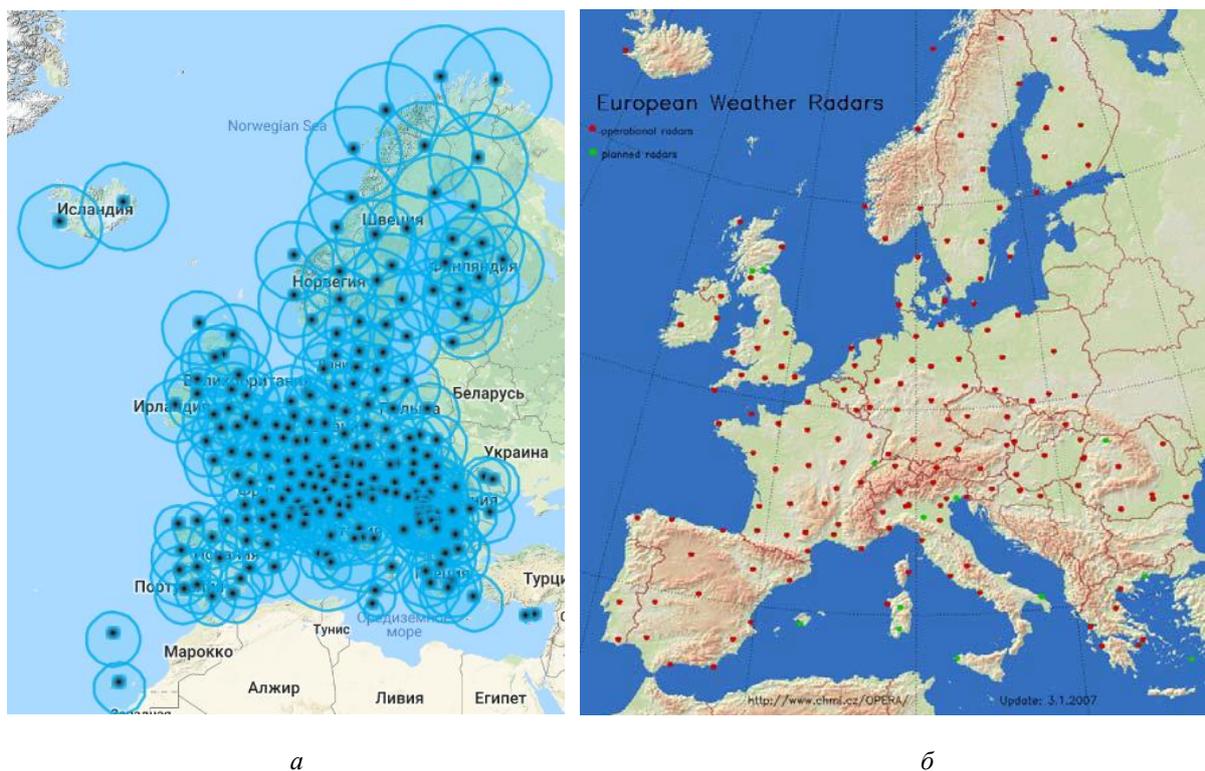


Рис. 3

Способ создания радиолокационной сети для мониторинга атмосферы OWASAN (Япония) (рис. 4, *а*) заключается в том, что метеорологические радиолокаторы с дальностью действия 200 км расставлены на поверхности Земли таким образом, чтобы измерять характеристики осадков [4]. На приоритете измерения осадков построена и радиолокационная сеть в Великобритании (рис. 4, *б*) [4, 5].

Из дальнейшего рассмотрения две последние метеорологические радиолокационные сети можно исключить, поскольку островной статус Японии и Великобритании придает их сетям определенную специфику, которую нет необходимости учитывать для внутриконтинентальных регионов.

### Описание исследования и анализ его результатов

Все, кроме двух последних, способы построения метеорологических радиолокационных сетей были подвергнуты геометрическому и системному анализу [6, 7].

Результатом геометрического анализа стал вывод о том, что указанные способы создания радиолокационных сетей мониторинга атмосферы объединяет идея, положенная в их ос-

нование, – радиолокаторы с разной или с одинаковой дальностью действия размещены на поверхности Земли таким образом, что их совокупность образует на местности геометрическую фигуру в виде треугольной сетки со стороной, длина которой изменяется от 250 – 300 км до 450 км (рис. 5, а). Назовем эти способы обобщенно первым способом построения сети.

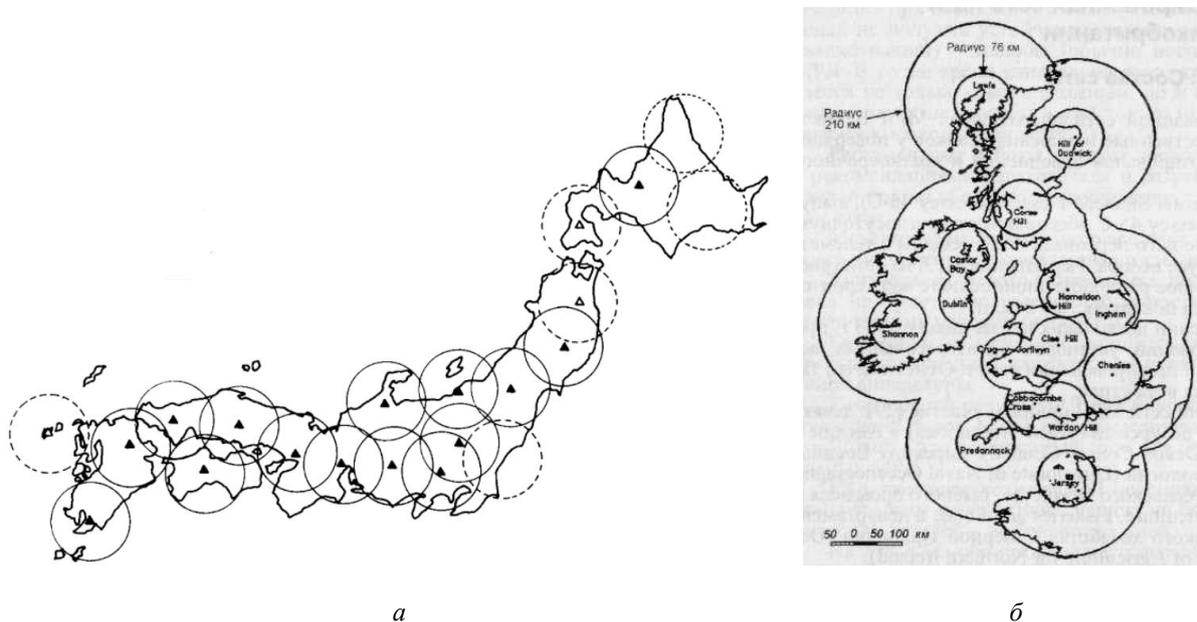


Рис. 4

Результатом системного анализа стал вывод о том, что именно из-за расположения радиолокаторов на основе первого способа не полностью реализуются существенные возможности, которые предоставляет радиолокационный метод мониторинга атмосферы и, по этой причине, качество мониторинга снижается по сравнению с потенциально возможным.

В основу предлагаемого способа создания радиолокационной сети для мониторинга атмосферы положено размещение радиолокаторов с дальностью действия до 100 км таким образом, при котором их совокупность образует на местности геометрическую фигуру в виде шестиугольной сетки, при этом расстояние между соседними радиолокаторами равняется дальности действия радиолокаторов (рис. 5, б). Назовем его вторым способом построения сети.

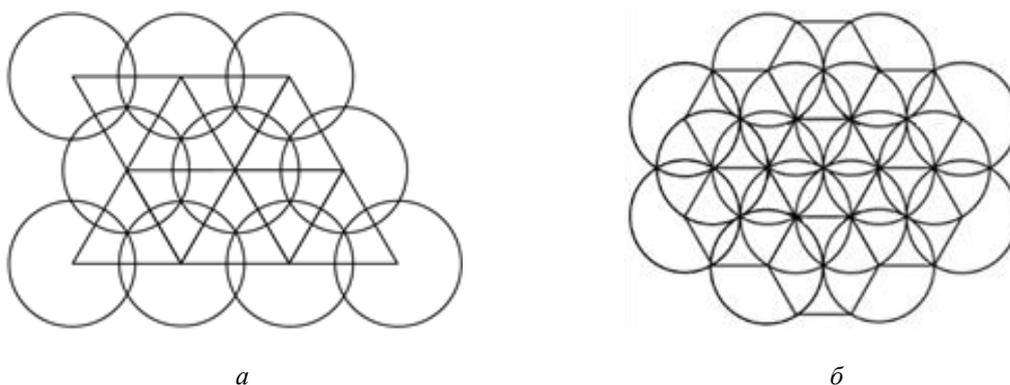


Рис. 5

Для выявления преимуществ второго способа проведем сравнительный анализ обоих способов построения метеорологических радиолокационных сетей.

Увеличенные расстояния между радиолокаторами при первом способе (рис. 6, а) приводят к повышению высоты нижней границы сплошного радиолокационного поля, что препятствует обнаружению и идентификации гидрометеорологических объектов, процессов и явле-

ний, включая опасные, внутри пространства наблюдения. При втором способе построения за счет уменьшения расстояния между радиолокаторами и, следовательно, уменьшения непроглядываемых (мертвых) зон извлекается информация из большей части пространства наблюдений. Из рис. 6, б легко понять, что уменьшение мертвой зоны будет происходить при сближении радиолокаторов и, вследствие этого, будет уменьшаться высота нижней границы образуемого радиолокационного поля, что и обеспечит извлечение информации из большей части пространства наблюдений.

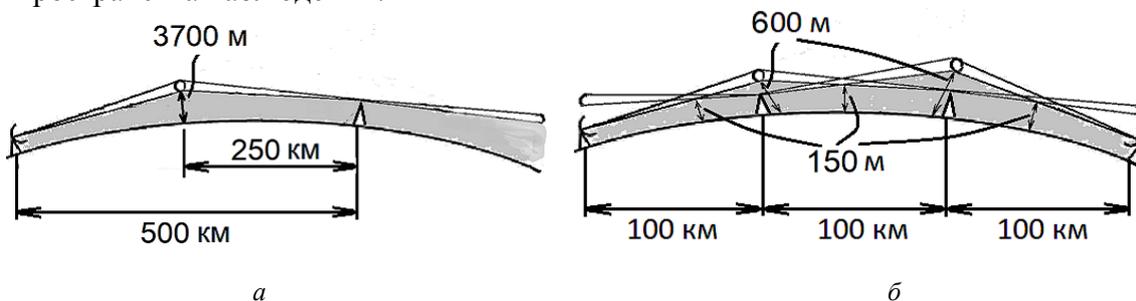


Рис. 6

Численные значения на рис. 6 легко рассчитываются на основе известных соображений [8]. Полагая, что указанные на рис. 6 дальности реализуются при угле места антенной системы  $\varepsilon = 0^\circ$  (т.е. на уровне радиогоризонта), можем воспользоваться известным уравнением радиогоризонта:

$$D_{\Gamma} = 4,11 \cdot (\sqrt{H_3} + \sqrt{h_a}), \quad (1)$$

где  $D_{\Gamma}$  – горизонтальная дальность в километрах;  $H_3$  – поправка высоты на кривизну Земли в метрах, или высота нижней границы сплошного радиолокационного поля;  $h_a$  – высота электрического центра антенны в метрах.

Подставив в (1) указанные значения дальностей и положив  $h_a = 0$ , получим значение высоты нижней границы сплошного радиолокационного поля для радиолокаторов, расположенных непосредственно на поверхности Земли:

$$H_3 = \frac{D_{\Gamma}^2}{16,9}. \quad (2)$$

Изменяя высоту электрического центра радиолокатора  $h_a$  в разумных пределах, можно подобрать требуемую высоту нижней границы сплошного радиолокационного поля.

За счет увеличенных расстояний между радиолокаторами при первом способе построения также увеличиваются размеры участков в районах затенения препятствиями (за счет появления углов закрытия) [9], что порождает непроглядываемые зоны, в которых не обнаруживаются объекты, процессы и явления. На рис. 7 несложно увидеть уменьшение мертвой зоны за счет более близкого расположения радиолокаторов друг к другу по второму способу. Вследствие этого уменьшается объем зоны затенения препятствием, т.е. если радиолокатор 2 отодвинуть вправо, тем самым увеличив расстояние до радиолокатора 1, то объем мертвой зоны возрастет (затененный участок на рис. 7), поскольку линия радиогоризонта радиолокатора 2 будет удаляться от препятствия.

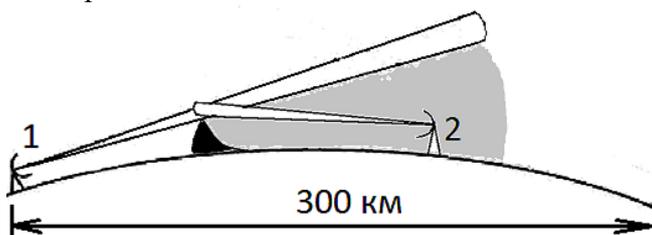


Рис. 7

На увеличенных дальностях при первом способе построения сети за счет расширения диаграммы направленности антенны увеличиваются линейные размеры импульсного объема, что ухудшает линейную разрешающую способность внутри сети [9]. При применении второго способа за счет меньшего пространственного расширения луча диаграммы направленности антенны радиолокатора при меньшей его дальности действия достигается более высокая пространственная разрешающая способность внутри радиолокационной сети (рис. 8). Ширина диаграммы направленности антенны на рис. 8 полагается равной 1 градусу.

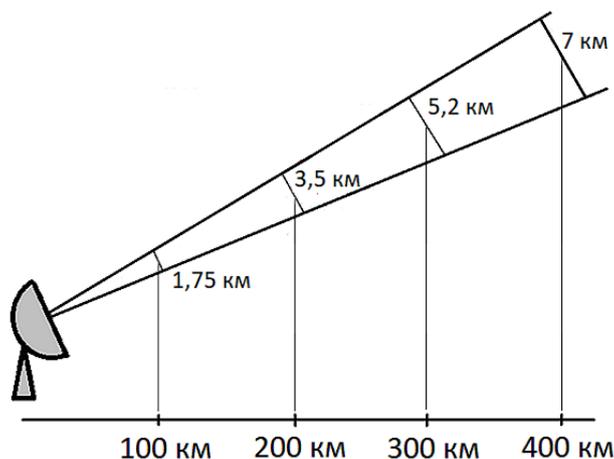


Рис. 8

Увеличенные расстояния между радиолокаторами при первом способе построения сети снижают устойчивость функционирования сети, поскольку при выходе из строя одного радиолокатора произойдет существенная потеря информации из-за того, что пространство вокруг вышедшего из строя радиолокатора обслуживаться не будет. При втором способе за счет более плотного перекрытия зон наблюдения радиолокаторов повышается устойчивость радиолокационной сети при выходе из строя части радиолокаторов [10]. На рис. 9 проиллюстрировано сокращение радиолокационного поля радиолокационной сети для мониторинга атмосферы при уменьшении количества радиолокаторов, например с 16 до 8 для первого (верхняя строка рисунков) и второго (нижняя строка рисунков) способов построения сети. Слева направо в каждой вертикальной паре рисунков уменьшается число радиолокаторов на две штуки в каждом из способов.

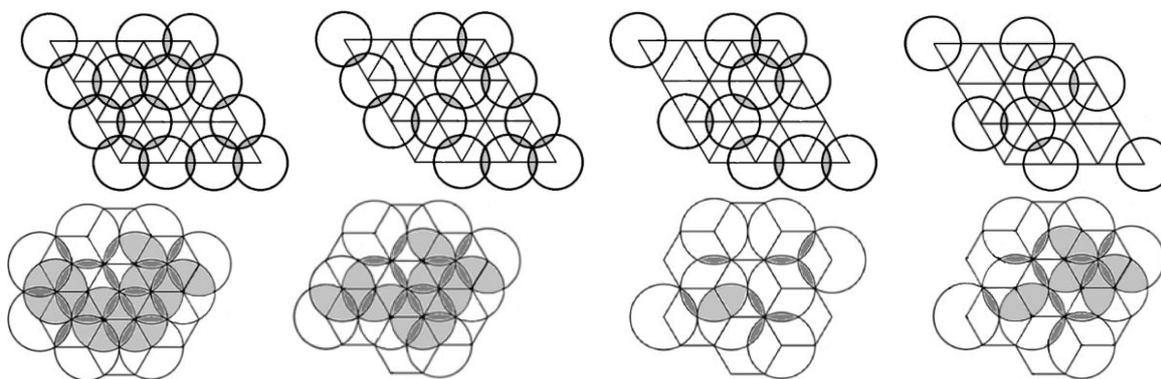


Рис. 9

В итоге по обоим правым рисункам каждого из способов хорошо видно, что радиолокационное поле при втором способе построения сети, по сравнению с первым способом, сокращается в существенно меньшей степени даже при выходе из строя половины радиолокаторов сети.

Увеличенные расстояния между радиолокаторами при первом способе построения сети и построение сети на треугольной сетке на основе касания зон наблюдения или небольшого их наложения до получения требуемой высоты верхней границы радиолокационного поля  $H_{ВГ}$  приводит к необходимости осуществления сканирования полностью во всей зоне наблюдения радиолокатора (рис. 10). Процедура сканирования может оказаться длительной, что приведет к пропуску опасного процесса или явления. Ускорение процедуры сканирования, как это проводится в существующих сетях, приводит к потере информации или снижению ее качества. [11].

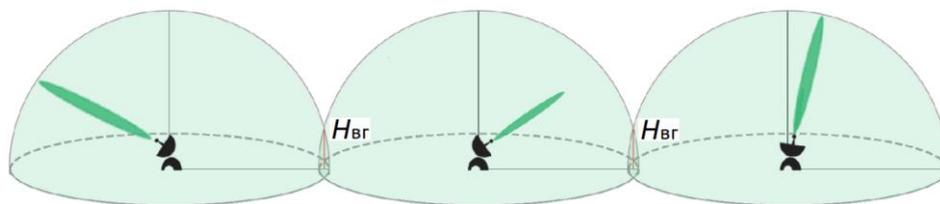


Рис. 10

При построении сети по второму способу отсутствует необходимость осуществлять каждым из радиолокаторов обзор пространства под большими углами места (рис. 11). Радиолокационная сеть экономно тратит энергию зондирующего излучения, при этом выдерживаются временные параметры сканирования, потому что не нужно повышать до  $90^\circ$  угол места диаграммы направленности антенны радиолокатора выше  $26,6^\circ$  по причине достижения требуемой высоты верхней границы радиолокационного поля  $H_{ВГ}$  в точке пересечения  $O$  диаграмм направленности соседних радиолокаторов. А высота нижней границы радиолокационного поля  $H_{НГ}$  будет обеспечена автоматически при опускании диаграмм направленности антенн радиолокаторов до  $\varepsilon = 0^\circ$  [12]. Рис. 12 иллюстрируют структуру зоны наблюдения нескольких радиолокаторов при ограниченном сканировании пространства, при этом образуемое радиолокационное поле полностью покрывает пространство наблюдения.

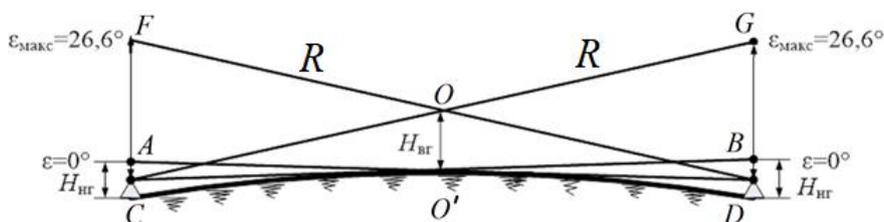


Рис. 11

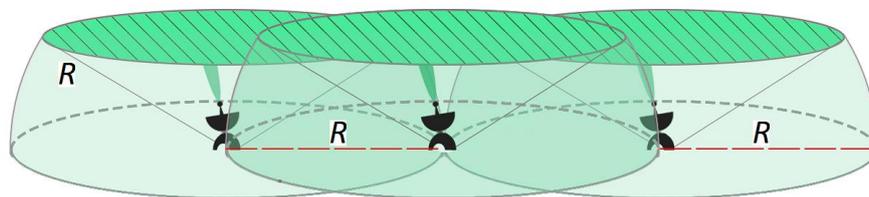


Рис. 12

При построении сети по второму способу дальность действия радиолокаторов уменьшена. Значит, в пространство излучается меньшее количество энергии. А за счет уменьшения энергии зондирующего излучения, и, как следствие, уменьшения мощности излучения, снижается опасность воздействия на людей электромагнитного излучения каждого из радиолокаторов и радиолокационной сети в целом, что для второго способа является фактом.

При построении сети по второму способу, с уменьшением дальности действия радиолокаторов уменьшаются размеры зоны наблюдения каждого из радиолокаторов. Откуда следует, что темп выдачи данных мониторинга каждым из радиолокаторов и сетью в целом может быть либо увеличен, либо могут быть снижены требования к системе передачи данных.

## Выводы

Следует отметить, что применение второго способа при создании радиолокационной сети мониторинга атмосферы приводит к системному подходу и позволяет получить системный эффект в виде экономного расходования энергии зондирующего излучения, оптимального покрытия радиолокационным полем пространства наблюдений без ухудшения при этом показателей качества информации. При подобном создании сети практически исчезает понятие радиогоризонта, уменьшается влияние крупномасштабного рельефа местности и снижается воздействие осадков на возможности мониторинга. Уменьшение потребной дальности действия метеорологической радиолокационной станции улучшает пространственную разрешающую способность внутри сети и позволяет понизить импульсную мощность зондирующего излучения, что уменьшит опасность сети для человека. Второй способ создания радиолокационной сети мониторинга атмосферы в значительной мере позволяет не только приблизить качество мониторинга к потенциально возможному, но и ослабить ограничения, присущие радиолокационному методу получения метеорологической информации.

## Заключение

Создание радиолокационной сети для мониторинга атмосферы на основе предложенного способа позволит более полно реализовать возможности радиолокационного метода мониторинга атмосферы, ослабить ограничения, присущие радиолокационному методу получения метеорологической информации и существенно приблизить качество мониторинга к потенциально возможному.

## Список литературы:

1. Golden J.H. The prospects and promise of NEXRAD: 1990's and beyond. // COST 73. 1989. P. 17–36.
2. Технический проект „Общесистемные решения по сбору, анализу, контролю и предоставлению радиолокационной информации от ДМРЛ-С”. Режим доступа: <http://www.aviamettelecom.ru/docs/lib2/TP-DMRL-2014.pdf>.
3. 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.
4. Базлова Т.А., Бочарников Н.В., Брылев Г.Б. [и др.] Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети ; под ред. Г.Б. Брылева. С.-Петербург : Гидрометиздат, 2002. 332 с.
5. 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.
6. Перельгин Б.В., Лужбин А.М. Построение сплошного радиолокационного поля системы гидрометеорологического мониторинга на основе геометрического подхода // Радиотехника. 2017. № 191. С. 173–180.
7. Perelygin B.V. Implementation of systematic approach in the creation of radar systems of meteorological monitoring // Telecommunications and radio engineering. 2018. Vol. 77. № 3. P. 199–209. Doi: 10.1615/TelecomRadEng.v77.i3.20
8. Мищенко Ю.А. Зоны обнаружения. Москва : Воениздат, 1963. 96 с.
9. Абшаев М.Т., Абшаев А.М. Возможности и ограничения радиолокационных метеорологических измерений // Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля природной среды. Труды II Всерос. конф. Т. I. С.-Петербург, 24–26 апреля 2012 г. С.-Петербург : ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. С. 276–288.
10. Перельгин Б.В. Обеспечение устойчивости радиолокационного поля при построении системы гидрометеорологического мониторинга // Радиотехника. 2018. № 192. С. 21–27.
11. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. 2-я ред. Режим доступа: <http://www.meteorad.ru/static/VMU-DMRL-180503.pdf>
12. Перельгин Б.В. Рациональное распределение энергии зондирующего излучения в пространстве наблюдения системы гидрометеорологического мониторинга // Радиотехника. 2018. № 194. С. 12–18.