

МЕТЕОРОЛОГИЯ

К.Л. Восканян, А.Д. Кузнецов, О.С. Сероухова, А.С. Солонин

К ВОПРОСУ О МЕТОДИКЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ

K.L. Voskanyan, A.D. Kuznetsov, O.S. Seroukhova, A.S. Solonin

ON THE TECHNIQUES OF RADAR MEASUREMENT OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION INTENSITY

В работе анализируется методика дистанционного измерения интенсивности атмосферных осадков радиолокационными методами и пути повышения точности таких измерений.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, метеорологическая радиолокация, атмосферные осадки.

The paper discusses the techniques of remote measurement of atmospheric precipitation intensity using radar methods, as well as ways to improve accuracy of these measurements.

Key words: remote sensing, meteorological radar methods, atmospheric precipitation.

Одним из путей повышения качества гидрометеорологического обслуживания является совершенствование материально-технического оснащения наблюдательной сети страны. Последнее позволяет улучшить анализ состояния системы «подстилающая поверхность–атмосфера», необходимого, в частности, для выявления опасных и особо опасных явлений погоды и их прогнозирования. Одним из направлений совершенствования средств контроля за атмосферными процессами является использование дистанционных методов зондирования атмосферы, к которым относится метеорологическая радиолокация. В системе метеорологической службы радиолокация является основным средством получения информации об облачности и осадках в трехмерном пространстве. Опасные явления, связанные с конвективной облачностью развиваются чрезвычайно быстро, поэтому конечная практическая цель радиолокационных наблюдений не только обнаружить и оценить стадию развития его, но и обеспечить передачу информации потребителю за самое короткое время для принятия своевременных мер защиты, важно также своевременно оповестить население о чрезвычайной ситуации. Методы радиолокации используются для штормового оповещения в сложных погодных условиях населения, коммунальных служб, авиации, органов МЧС и др. [1–4].

Эффективность работы современных метеорологических радиолокаторов определяется как их техническими характеристиками, так и тем математическим обеспечением, которое используется для обработки, анализа и представления в удобной форме потребителю результатов радиолокационных наблюдений [1, 5–8]. Из радиолокационного сигнала сантиметрового диапазона, отраженного от облаков и осадков, можно извлечь большое количество метеорологической информации. Мощность отраженных от метеообразований сигналов на фиксированной дальности пропорциональна отражаемости метеообразований Z . Величина Z реагирует на рост размеров отражающих частиц гидрометеоров и их концентрацию, которые, в свою очередь, растут по мере увеличения степени опасности явления (ливни, грозы, град) [9–12].

До настоящего времени в нашей стране в основном использовались весьма разреженная сеть метеорадиолокаторов, состоящая из отечественных некогерентных радиолокаторов МРЛ-2 и МРЛ-5 (рис. 1) [13, 14].

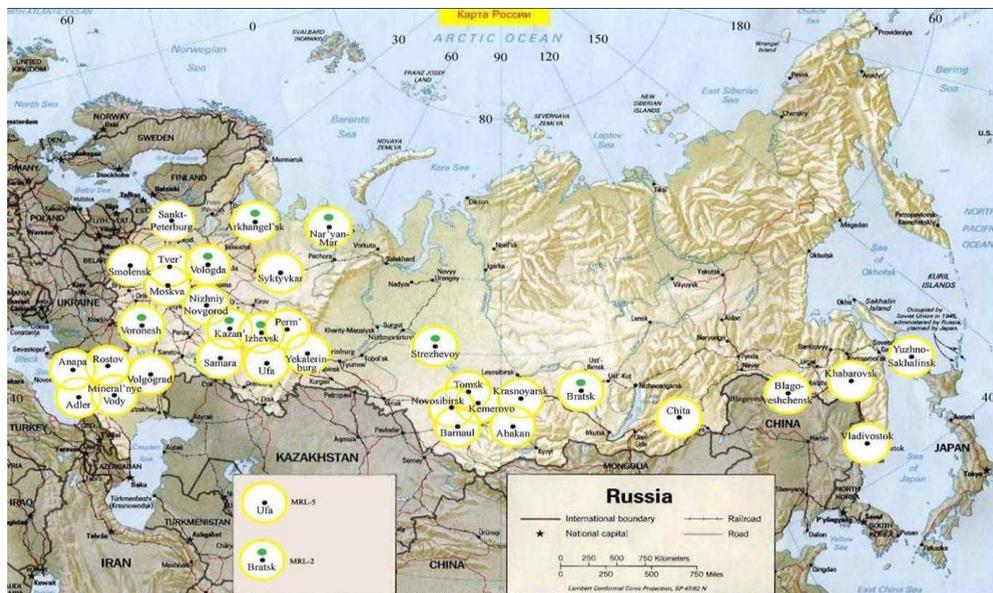


Рис. 1. Карта современной сети метеорологических радиолокационных станций на территории России

Эффективность использования в оперативной практике метеорологической радиолокации значительно повышается применением доплеровских радиолокаторов (ДМРЛ). Когерентными метеорадарами дополнительно (по сравнению с некогерентными радаром) идентифицируются следующие явления погоды: зоны сильного ветра, мезоциклоны (торнадо), фронты порывистости, области сдвига ветра, зоны повышенной турбулентности, микрошквалы. Средняя скорость межимпульсного изменения фазы отраженных от метеообразований сигналов пропорциональна доплеровской частоте сигнала и через нее – средней ради-

альной скорости метеообразований v_p . Ширина энергетического спектра отраженный пропорциональна дисперсии скоростей метеообразования σ_v [3, 5, 7, 15, 16].

Летом 2006 года в истории отечественных метеорологических радиолокационных наблюдений произошло важное событие: в аэропорту Пулково г. Санкт-Петербурга был смонтирован и введен в эксплуатацию первый в нашей стране доплеровский метеорологический радиолокатор. Им стал автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс (АМРК) «Метеор-МетеоЯчейка», который представляет собой серийно выпускаемый в Германии ДМРЛ «Метеор 500С», работающий с программным обеспечением рабочей станции метеоролога АМРК «МетеоЯчейка», серийно выпускаемый Институтом радарной метеорологии [5].

В настоящее время близки к массовому внедрению в оперативную работу многопараметрические (поляризационные) радиолокаторы [5, 15, 17]. Их применение позволяет существенно расширить число радиолокационных параметров по сравнению с использованием только радиолокационной отражаемости Z . Такими дополнительными параметрами являются:

- дифференциальная отражаемость – отношение мощностей отраженного сигнала в горизонтальной и вертикальной поляризации Z_{DR} ;
- дифференциальный фазовый сдвиг между ортогональными поляризациями Φ_{DR} ;
- линейное деполяризационное отношение L_{DR} ;
- модуль коэффициента кросскорреляции и др.

Использование этих дополнительных поляризационных параметров совместно с радиолокационной отражаемостью Z позволяет:

- определять микрофизическую структуру метеообъекта (форму, фазовое состояние частиц гидрометеоров, их преимущественную ориентацию в пространстве), выделяя сухой град или снег, мокрый град, слабый, средний или сильный дождь, ливень;
- идентифицировать скопления насекомых, местники;
- существенно повысить точность определения интенсивности осадков (оценки показывают, что при точности измерения ZDR 0,1 дБ точность измерения интенсивности осадков увеличивается примерно в 3 раза) [5].

Важным шагом на пути повышения информативности радиометеорологических наблюдений является создание автоматизации сети МРЛ с выдачей композитных («сшитых», «состыкованных», «мозаичных») карт радиолокационного зондирования на больших территориях [1, 18]. Оперативное создание таких композитных карт существенно повышает ценность радиолокационной информации как для анализа, так и для текущего прогноза атмосферных процессов [5, 18, 20].

Технические возможности существующих автоматизированных комплексов позволяют создавать единые сети, в том числе и с зарубежными странами, существенно возрастает при объединении данных нескольких радиолокаторов и

построении “шитых” (композитных) карт. В этом случае появляется возможность оперативного слежения за развитием процессов синоптического масштаба (атмосферные фронты, линии шквалов, зоны осадков) с периодом обновления информации порядка 10–180 мин и использования радиолокационной метеоинформации при подготовке сверхкраткосрочных прогнозов и штормовых предупреждений об опасных явлениях погоды, связанных с кучево-дождевой облачностью (Cb) и полями осадков [5]. На рис. 2 представлена карта размещения перспективной сети доплеровских метеорадиолокаторов на территории России, где плотность их расположения уже вполне позволяет создать композитную карту для значительной территории нашей страны.

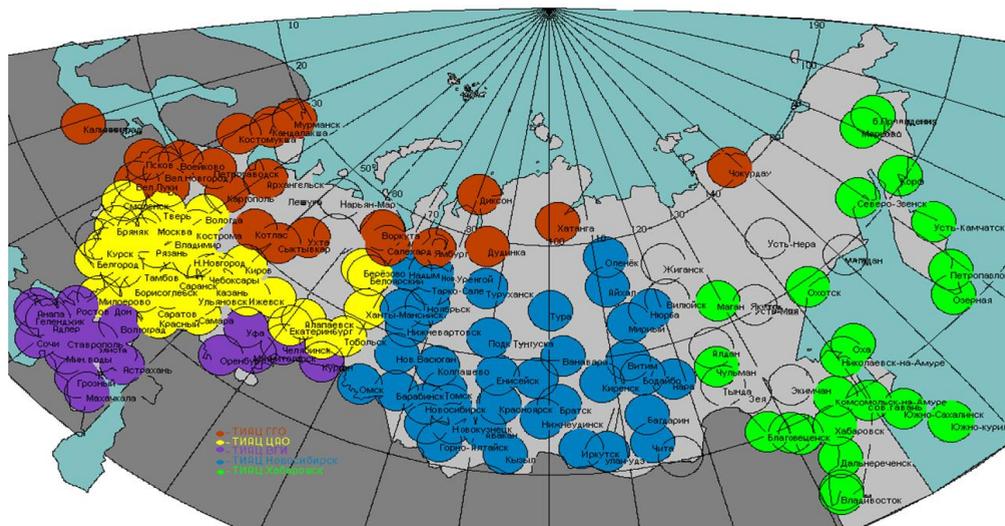


Рис. 2. Карта размещения перспективной сети доплеровских метеорадиолокаторов на территории России

Для сравнения с рис. 2 на рис. 3 представлена карта распределения ДМРЛ WSR-88D на территории США. Данная сеть была создана в относительно короткий срок (1991–1997). В её состав входят 138 радаров в 48 штатах континентальной части США, а также 13 радаров на Аляске, в Пуэрто-Рико и на Гавайских островах. Система обеспечивает передачу базовых данных и продуктов наблюдения всех радаров в национальные центры метеослужбы в Вашингтон, Канзас-Сити и Майами для составления каждые 30 мин стыкованной карты с радиолокационной информацией по территории США [2, 8].

Метеорологическая информация, извлеченная из отраженного радиолокационного сигнала от метеообъектов, только тогда заслуживает внимания и уважения синоптиков и специалистов по чрезвычайным ситуациям в оперативном режиме их работы, когда полностью соблюдаются процедуры обеспечения ее качества. Явления погоды и формы облачности определяются по заданным алгоритмам распознавания. Алгоритмы настраиваются отдельно для каждого

пункта установки по результатам сопоставления радиолокационной и наземной информации. Основная настройка алгоритмов выполняется в течение первого года эксплуатации. В процессе дальнейшей эксплуатации МРЛ оценивает качество распознавания и выполняют при необходимости корректировку алгоритмов. Контроль оправдываемости распознавания опасных явлений погоды выполняется путем сопоставления радиолокационной и наземной информации. Следовательно, для успешного функционирования радиометеорологической сети необходимо совершенствовать и наземные метеорологические станции и посты. В противном случае, без адекватного контроля качества распознавания явлений по данным МРЛ, усилия по созданию сети МРЛ могут быть сведены на нет. Рассмотрим важность такого совместного использования радиометеорологических и наземных данных на примере измерения интенсивности осадков радиометеорологическим методом [5].

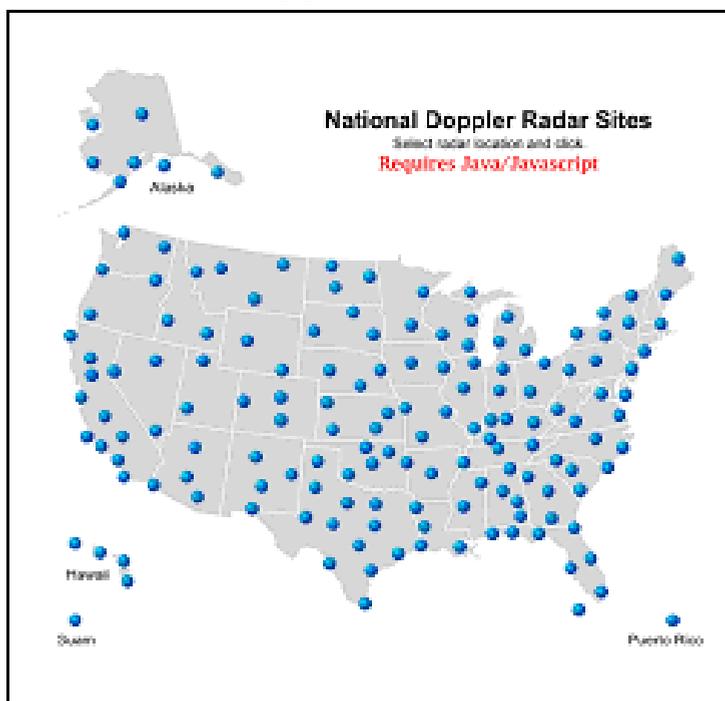


Рис. 3. Карта размещения метеорадиолокаторов сети NEXRAD территории США

Атмосферные осадки является одной из важнейших метеорологических величин. В детальной оперативной информации об осадках, их интенсивности, общем количестве и пространственном распределении заинтересованы многие отрасли. Отсутствие этих данных могут приводить к катастрофическим последствиям, свидетелями которых в последнее время мы стали. Прогноз осадков занимает одно из важных мест при прогнозировании погоды, как по своему практическому значению, так и по сложности их составления. В то же время полу-

чение информации об осадках является очень сложной задачей, прежде всего в силу их высокой пространственно-временной изменчивости [9, 20–23].

Традиционные методы измерения количества осадков, основанные на организации наземной осадкомерной сети, существуют уже более века и точность измерений количества выпавших осадков этими методами и в настоящее время все еще остается достаточно высоким (при толщине слоя осадков в 25 мм ошибка составляет 5 %, при слабых осадках, менее 3 мм, – 12 %, а в среднем оценивается в 9–10 %) [20–22]. В то же время отдельный осадкомер не является в полной мере репрезентативным даже на небольшой территории в силу того, что площадь сечения для накопления осадков на несколько порядков меньше, чем расстояние между приборами. Таким образом, чтобы не пропустить через "сито" сети ни одного случая с осадками, особенно летом в условиях конвекции, необходима очень большая плотность сети. Так, при достаточно большом количестве осадков (около 10 мм) и плотности сети 250 км²/осадкомер ошибка составляет около 8 %, а при густоте 1035 км²/осадкомер – уже 20 %. Для надежного обнаружения (более 90 %) интенсивных осадков, более 13 мм, необходима плотность сети 570 км²/осадкомер, а при слабых осадках, 0.25–1.3 мм, сеть должна уже иметь разрешение 65 км²/осадкомер. Только для обнаружения осадков конвективного типа на площади 600 км² в условиях континентального климата требуется плотность осадкомерной сети 1 прибор на 10 км², т.е. осадкомеры должны стоять примерно через каждые 3 км (подобная плотность измерений может быть достигнута лишь на специально оборудованных научно-исследовательских полигонах, но никак не повсеместно) [19].

В связи с отмеченными недостатками в функционировании осадкомерной наземной сети вполне понятно то большое внимание, которое уделяется разработке альтернативных методов измерений. Одним из таких методов оперативного получения информации о зонах осадков и их интенсивности в настоящее время можно считать радиолокационный метод измерений. Радиолокационный метод позволяет с успехом избежать ряд перечисленных недостатков, что, прежде всего, связано с возможностью получения и обработки информации об осадках по большой территории (порядка 100 000 км²) за короткий промежуток времени (дискретность по времени радиолокационных наблюдений в настоящее время составляет 10–15 мин). При этом радиолокационная информация наиболее достоверна в пределах "эффективного радиуса обнаружения" МРЛ, где с высокой степенью вероятности (90–100 %) обнаруживаются зоны осадков, грозы, град. Летом "эффективный радиус" обнаружения этих явлений погоды составляет 150–200 км, зимой – 50–90 км [1, 3, 5, 7, 8, 22].

Эффективность работы современных метеорологических радиолокаторов во многом определяется не только их техническими характеристиками, но и тем математическим обеспечением, которое используется для обработки, анализа и представления в удобной форме потребителю результатов радиолокационных наблюдений, а также достоверностью полученных данных [5].

Для практических целей радиолокационной метеорологии наиболее важной характеристикой осадков является их интенсивность I . Для установления связи между радиолокационной отражаемостью и интенсивностью осадков часто используют упрощенную модель структуры осадков. В наиболее простом случае, когда осадки стационарны и состоят из капель одинаковых размеров при постоянной концентрации, а вертикальные движения воздуха отсутствуют, используется линейная связь между радиолокационной отражаемостью Z и интенсивностью осадков I , которая имеет следующий вид [5, 10, 7, 8]:

$$Z = \alpha I^b. \quad (1)$$

В результате модельных расчётов с использованием распределения частиц осадков по размерам Маршаллом и Пальмером были получены следующие значения коэффициентов в формуле (1): для жидких осадков $\alpha = 200$, $b = 1,6$; для снега $\alpha = 1780$, $b = 221$ [5, 10, 21].

Однако характеристики осадков (интенсивность осадков, спектр размеров дождевых капель, скорость воздушных потоков и т. д.) изменяются во времени и в пространстве в достаточно больших пределах, следствием чего является и изменение эмпирических параметров α и b в соотношении (1). Об этом свидетельствуют многочисленные экспериментальные данные непосредственных одновременных измерений интенсивности осадков и спектров капель. После обработки большого количества экспериментального материала по разным типам осадков оказалось, что вариации α и b настолько велики даже в одной и той же местности, что трудно было указать, какие из этих значений коэффициентов необходимо использовать для каждого конкретного случая. Различие в величине коэффициентов для формулы (1), полученных различными авторами на основе определения эмпирических связей между интенсивностью осадков I и радиолокационной отражаемостью Z путем сопоставления радиолокационных и осадкомерных измерений, показывает большой разброс параметров α и b , связанный с сезонной и региональной изменчивостью микрофизических и других характеристик атмосферных осадков. Вследствие этого одной и той же может соответствовать различная радиолокационная отражаемость Z . Величина коэффициента α может варьировать в пределах от 3,44 до 630, а величина b изменяться от 1,16 до 2,87 [23].

Отмеченная неоднозначность перехода от радиолокационной отражаемости к величине интенсивности осадков делает актуальным при развертывании отечественной радиолокационной сети создание реперных наземных осадкомерных постов, предназначенных для верификации радиолокационной информации как об интенсивности атмосферных осадков, так и об их интегральных характеристиках.

Литература

1. Горбатенко В.П., Слуцкий В.И., Бычкова Л.Н. Метеорологический радиолокатор МРЛ-5: производство наблюдений. Диагноз и прогноз опасных явлений погоды. – Томск: Томский ун-т, 2010. – 120 с.

2. *Serafin R. J., Wilson J. W.* Operational weather radar in the U.S.: progress and opportunity. – COST 75, 1998, p. 35-61
3. *Щукин Г.Г., В.Д. Степаненко, Снегуров А.В.* Перспективные направления радиолокационных наблюдений за атмосферой // Труды ГГО, 2010, вып. 561, с. 223-241.
4. *Колосков Б.П., В.П. Корнеев, В.В. Петров, Б.Г. Данелян, Г.П. Берюлев, Г.Г. Щукин.* Оценка результатов работ по метеозащите крупных городов // Метеорология и гидрология, 2011, № 2, с. 69–73.
5. Автоматизированные метеорологические радиолокационные комплексы «Метеочейка» / Под ред. Н.В. Бочарникова, А.С. Солонина. – СПб.: Гидрометеиздат, 2007. – 236 с.
6. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети / Коллективная монография ИРАМ. – СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – 332 с.
7. Радиолокационные метеорологические наблюдения. Том I: Научно-методические основы / Под ред. А.С. Солонина. – СПб.: Наука, 2010. – 311 с.
8. Радиолокационные метеорологические наблюдения. Т. II: Вопросы практического применения радиолокационной метеорологической информации / Под ред. А.С. Солонина. – СПб.: Наука, 2010. – 517 с.
9. *Шуляцкий А. Б.* Радиолокационное измерение интенсивности и некоторых других характеристик осадков. – М.: Гидрометеиздат, 1960. – 132 с.
10. *Степаненко В. Д.* Радиолокация в метеорологии (радиометеорология). 2-е изд. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 343 с.
11. *Довиак Р., Зрнич Д.* Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 512 с.
12. *Калинин Н.А.* Исследование атмосферы с помощью импульсных метеорологических радиолокаторов. – Пермь, 2000, с. 103.
13. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5: Руководящий документ Б2.04.320-91. – СПб.: Гидрометеиздат, 1993. – 310 с.
14. *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 / Под ред. О. В. Лапина. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 230 с.
15. *Вовшин Б.М., Вылегжанин И.С., Жуков В.Ю., Пушков А.А., Щукин Г.Г.* Теория и практика поляризационных измерений в метеорологической радиолокации // Труды V Всеросс. науч. конф. «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред», Муром, 26–28.06.2012, с. 49-54.
16. *Мельничук Ю.В., Губарчук В.Н., Павлюков Ю.Б., Серебряник Н.И.* О перспективе создания системы радиолокационного мониторинга опасных явлений погоды на юге западной Сибири // Актуальные вопросы геологии и географии Сибири. Мат-лы науч. конф., Томск, 1998, т. 4. с. 127-130.
17. *Стасенко В.Н., Мельничук Ю.В., Абшаев М.Т., Шаповалов А.В., Вовшин Б.М., Вылегжанин И.С., Ефремов В.С., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г.* Когерентный метеорологический радиолокатор с поляризационной селекцией сигнала для оснащения сети Росгидромета // Труды XXVII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред», вып. 6. Т. 2. – СПб., 2012, с. 212-220.
18. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети / Под ред. Г.Б. Брылева. – СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – 331 с.
19. *Кузнецов А.Д.* Текущее прогнозирование на основе цифровой обработки изображений. – СПб.: РГГМИ, 1997. – 167 с.
20. *Корольков А. М.* Восстановление поля осадков по радиолокационным и наземным данным: Автореф. ... канд. геогр. наук. – М.: изд. ООО "Макс Пресс", 2001. – 23 с.
21. *Шуляцкий А.Б.* Радиолокационное измерение интенсивности и некоторых других характеристик осадков. – М.: Гидрометеиздат, 1960. – 132 с.
22. *Боровиков А.М. и др.* Радиолокационные измерения осадков. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 142 с.
23. *Заболоцкая Т.Н., Мучник В.М.* О связи между радиолокационной отражаемостью и интенсивностью дождя // Труды УкрНИИ. 1967, вып. 67, с. 66-76.