

Комплексные методы исследования и раннего предупреждения гроз на основе применения средств активной и пассивной радиолокации

Д.М. Караваев¹, Ю.В. Кулешов¹, А.Н. Ефременко¹, Г.Г. Щукин²

¹ Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
197198, г. Санкт-Петербург, Ждановская улица, 13.

E-mail: yka@mil.ru

² АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт»,
106234, Санкт-Петербург, Кожевенный переулок, 41.

Рассмотрены методические вопросы применения комплексных методов исследования и раннего предупреждения опасных явлений погоды, мощных конвективных облаков, гроз с применением средств активной и пассивной радиолокации. Обобщены результаты экспериментальных исследований водозапаса переохлажденной части конвективных облаков, влагозапаса атмосферы в период образования мощной конвекции, гроз, а также при прохождении атмосферных фронтов в Ленинградской области. Получены новые критерии опасных явлений погоды.

Ключевые слова: пассивная и активная радиолокация, СВЧ-радиометр, влагозапас атмосферы, водозапас облаков, гроза, критерии опасных явлений.

Comprehensive methods of research and early warning of thunderstorms based on the use of active and passive radar

D.M. Karavaev¹, Yu.V. Kuleshov¹, A.N. Efremenko¹, G.G. Shchukin^{1, 2}

¹ Mozhaisky Military Aerospace Academy.

² The State Research navigation-hydrographic institute.

The methodological issues of the application of complex research methods and early warning of dangerous weather phenomena, powerful convective clouds, thunderstorms with using active and passive radar are considered. The results of experimental studies of the cloud liquid water content of the supercooled part of convective clouds, the water vapor of the atmosphere during the formation of powerful convection, thunderstorms, as well as during the passage of atmospheric fronts in the Leningrad region are summarized. New criteria for dangerous weather events have been obtained.

Keywords: passive and active radar, microwave radiometer, atmospheric water vapor, cloud liquid water, thunderstorm, criteria for dangerous weather phenomena.

Введение

Для совершенствования методов исследования и раннего предупреждения связанных с облаками опасных явлений погоды, гроз перспективно применение комплексных радиофизических методов и средств контроля состояния атмосферы [1-3]. Применение методов пассивной и активной радиолокации [4,5] в комплексных исследованиях мощных конвективных облаков, гроз актуально ввиду необходимости изучения эволюции взаимосвязи микрофизических, термодинамических, атмосферно-электрических характеристик облачной атмосферы в задачах раннего предупреждения опасных явлений, верификации численных моделей грозовых облаков. Целью работы ставилось рассмотрение методических вопросов исследования связанных с мощной конвекцией опасных явлений погоды, гроз, обобщение результатов комплексных экспериментов с применением средств активной и пассивной радиолокации для

выявления признаков предгрозового состояния облаков, задач раннего предупреждения опасных явлений.

Комплексные методы исследования гроз

Метод комплексного исследования мощных конвективных облаков, гроз состоит в использовании метеорологических радиолокаторов, СВЧ-радиометров, средств атмосферно-электрических наблюдений и других средств для исследования эволюции опасных явлений с учетом взаимосвязи микрофизических, динамических и электрических процессов в облаках. Одновременное применение различных радиофизических средств позволяет выполнять контроль состояния среды с высоким пространственно-временным разрешением, определять особенности микрофизических характеристик областей мощных конвективных облаков, в которых происходят генерация электрических зарядов, появление молниевых разрядов. Кроме того, такие комплексные наблюдения позволяют рассматривать относительное расположение зон молниевой активности, осадков, турбулентности, повышенного содержания переохлажденной влаги в облаках, особенности фазового состава различных зон облаков.

Методы пассивной радиолокации перспективны для контроля термодинамического состояния атмосферы, в частности позволяют определять содержание жидкокапельной влаги в переохлажденной части конвективных облаков [3,4]. Развитие мощных конвективных облаков, гроз происходит обычно при высокой влажности воздуха в атмосфере. На основании комплексных исследований атмосферы и опасных явлений погоды с применением метеорологических радиолокаторов, СВЧ-радиометров, средств регистрации грозовых разрядов и стандартных средств метеорологических измерений в Ленинградской области подтверждаются выводы о том, что использование информации о влагозапасе атмосферы является важным для раннего предупреждения предгрозового состояния облаков.

В качестве примера на рис. 1 приводятся распределения влагозапаса атмосферы, полученные по данным радиометров в Ленинградской области для летнего и зимнего периодов. На рисунках выделены характерные области (*Л1*, *Л2*, *Л3*, *З1*), которым соответствуют различные условия образования опасных явлений, конвективных облаков. Например, для развития опасных явлений, связанных с мощной конвекцией в теплый период года характерна область *Л3* на рис.1а, для облаков *Cu med*, *Cu cong* характерна область *Л2*. В холодный период года для образования сложных метеорологических условий, связанных с осадками (снегопадами) характерна область *З1* (рис.1б).

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать следующие выводы: применение наземных одиночных радиометров (частота 22.2 и 36.5 ГГц) для определения содержания влагозапаса атмосферы над пунктом зондирования перспективно для выявления благоприятных для развития мощной конвекции условий в атмосфере (в радиусе до 50 км). При этом, как показали комплексные эксперименты с применением средств атмосферно-электрических измерений и активной радиолокации, высокое влагосодержание атмосферы является необходимым, но недостаточным условием развития мощной конвекции, грозовых процессов в атмосфере. При влагозапасах атмосферы, ниже некоторого критического уровня (около 15 кг/м²) развитие внутримассовых мощных конвективных облаков в Ленинградской области не отмечалось.

Для предупреждения предгрозового состояния разработан радиометрический критерий ($Vapor-index=VI$) опасных явлений, связанных с развитием конвективных облаков, гроз:

$$VI(t) = c_0 + c_1 Q(t) + c_2 \Delta Q(t, t - dt), \quad (1)$$

где c_i - коэффициенты регрессии; $Q(t)$ - влагозапас атмосферы, t - время; $\Delta Q(t, t - dt)$ - изменение влагозапаса атмосферы за период dt (составляет от около 6 час). Заблаговременность прогноза гроз может составлять 2...12 ч, оправдываемость - около 76 %.

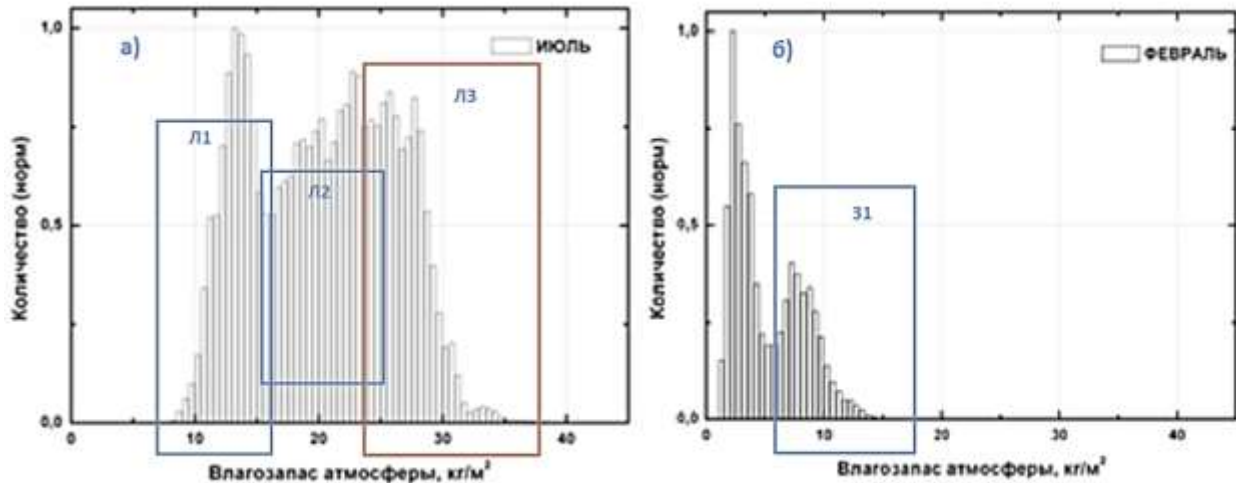


Рис. 1. Распределение влагозапаса атмосферы в Ленинградской области:
а) июль; б) февраль

Метеорологические радиолокаторы позволяют в случае зондирования мощных конвективных облаков наблюдать динамику их развития по измерениям радиолокационной отражаемости, определять верхнюю границу облаков, горизонтальную и вертикальную протяженность облака, градиенты радиолокационной отражаемости, выявлять ячеистую структуру облаков, и оценивать степень их грозоопасности по косвенным признакам [5,6]. Например, радиолокационный критерий гроз Y определяется следующим выражением:

$$Y > Y_{\text{кр. гроза}} = H_{-22} \log Z_{3.\text{мин}}, \quad (2)$$

где $\log Z_{3.\text{мин}}$ - минимальное значение $\log Z_3$ в грозах на высоте выше нулевой изотермы на (2-2,5)км; H_{-22} - высота изотермы минус 22°C. Использование данных современных доплеровских поляризметрических радиолокаторов позволяет получать дополнительную информацию о радиальной скорости гидрометеоров, а также оценивать микрофизическое состояние облаков, формировать дополнительные критерии опасных явлений.

Использование метода пассивно-активной радиолокации дает возможности для определения профилей водности и средней водности конвективных облаков, водозапаса переохлажденной части конвективных облаков, интенсивности осадков [4]. Вопрос об эволюции микрофизического состояния мощного конвективного облака, особенно на стадии формирования электрически активных зон в облаках относится к ключевым. Возможности исследования фазового состава переохлажденной части конвективного облака, разделения мелкокапельной жидкой и твердой фазы, связаны с развитием методов пассивно-активной радиолокации [4,7,8].

Комплексные исследования атмосферы, мощных конвективных облаков, грозовых процессов проводились в Ленинградской области с применением метеорологических радиолокаторов, радиометров, средств регистрации грозовых разрядов и стандартных средств метеорологических измерений в течение многих лет. Эксперименты позволили выявить ряд следующих особенностей:

- пространственно-временное распределение водности мощного конвективного облака по данным пассивной радиолокации не соответствует распределению его отражаемости, максимумы грозовой активности и водности конвективной ячейки не совпадают во времени,

- особенности взаимного расположения зон осадков различной интенсивности и молниевых разрядов в облаках Cb: из общего количества зафиксированных молний 58 % совпали с зонами осадков,

- экспериментальные данные указывают на возможность существования локальных зон высокого содержания переохлажденной влаги в верхней части конвективного облака на высотах 6-9 км с характерными пространственным размером 1-2 км и временем существования менее 5 мин,

- зоны интенсивной электризации содержат в основном ледяные облачные частицы, а формирование электрически активных зон в облаках по всей видимости связано с динамикой водозапаса переохлажденной части конвективного облака на предгрозовой стадии облака.

- обнаружена поляризация собственного радиотеплового излучения от переохлажденной части мощных конвективных облаков,

- вариации влагозапаса атмосферы в окрестности грозового облака могут значительно превышать значения, характерные для невозмущенной атмосферы,

- в области теплых атмосферных фронтов циклонов рост влагозапаса атмосферы обычно предшествовал росту водозапаса облаков.

Выводы

Комплексирование методов пассивной и активной радиолокации является перспективным для совершенствования методов мониторинга и раннего предупреждения опасных явлений погоды, связанных с образованием мощных конвективных облаков и развитием грозовых процессов. Применение методов пассивной и активной радиолокации в задачах раннего предупреждения опасных явлений погоды позволяет:

1) Проводить контроль термодинамического состояния атмосферы в режиме реального времени с высоким временным разрешением по данным одиночных или сетевых радиометров влажностного или температурно-влажностного зондирования атмосферы, выявлять благоприятные условия для развития опасных явлений погоды, уточнять мезомасштабную структуру атмосферных фронтов. Предложен новый радиометрический критерий образования мощных конвективных облаков, гроз на основе комплексного применения средств пассивной и активной радиолокации.

2) Выявлять предгрозовое состояние на основе анализа динамики радиолокационных характеристик облаков, особенностей фазового состояния переохлажденной части конвективных облаков с использованием средств пассивно-активной радиолокации. Выявление зон повышенного содержания жидкокапельной влаги в переохлажденной части конвективного облака на начальной стадии роста облака может свидетельствовать о благоприятных условиях для формирования электрически активных зон в облаках.

Перспективны дальнейшие исследования комплексных радиолокационных критериев опасных явлений погоды, базирующихся на результатах наблюдений опасных явлений наземными средствами многопараметрической пассивно-активной радиолокации, грозопеленгации, измерения напряженности электрического поля, с привлечением спутниковой информации.

Литература

1. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Совершенствование методов раннего предупреждения развития грозových процессов и выявления зон обледенения в облаках на основе комплексного использования методов активной и пассивной радиолокации // Гидрометеорология и экология. 2021. Вып.62. С.7-26.
2. Караваев Д.М., Кулешов Ю.В., Щукин Г.Г. Совершенствование методов комплексного исследования и раннего предупреждения связанных с конвекцией опасных явлений на основе пассивной и активной радиолокации // Доклады Всероссийской открытой конференции по исследованиям атмосферных и склоновых стихийных явлений в условиях современного изменения климата, посвященной 190-летию создания гидрометеорологической службы России и 90-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР, 07-11 октября, Нальчик. ВГИ: Изд. типография «Принт Центр». 2024. С.68-72.
3. Караваев Д.М., Кулешов Ю.В., Щукин Г.Г. Исследование сверх-высокочастотного радиометрического влажностного зондирования атмосферы для раннего предупреждения опасных явлений погоды // Радиотехника и электроника. 2023. Т.68, №6. С.615-620.
4. Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Ленинград: Гидрометеоиздат. 1987. 253 с.
5. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. Ленинград: Гидрометеоиздат. 1973. 243 с.
6. Жуков В. Ю., Щукин Г. Г. Распознавание опасных явлений погоды в современной метеорологической радиолокации // Материалы VI Всероссийской конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды», СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2020. С.40-50.
7. Абшаев М. Т., Кармов Х. Н. Пассивно-активный метод обнаружения градовых очагов в кучево-дождевых облаках // Труды ВГИ. 1976. Вып.33. С.43-56.
8. Вылегжанин И. С., Жуков В. Ю., Караваев Д. М., Щукин Г. Г. Развитие метода пассивно-активной радиолокации в задачах штормооповещения // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2016. Вып.653. С.146-150.