МЕТЕОРОЛОГИЯ

УДК 551.509.324.1: [551.574.13+551.594.253]: doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-7-26
551.508.85

Совершенствование методов раннего предупреждения развития грозовых процессов и выявления зон обледенения в облаках на основе комплексного использования методов активной и пассивной радиолокации

Д.М. Караваев, Г.Г. Щукин

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург,
ggshchukin@mail.ru

Рассматриваются методические вопросы комплексного использования пассивной и активной радиолокации для совершенствования методов раннего предупреждения развития глубокой конвекции, грозовых процессов и выявления зон обледенения в облаках. Обсуждаются некоторые результаты экспериментальных комплексных исследований атмосферы и мощных конвективных облаков с помощью наземных микроволновых радиометров и метеорологического радиолокатора на примере экспериментов в Северо-Западном регионе России.

Ключевые слова: опасные явления погоды, гроза, метод пассивно-активной радиолокации, микроволновый радиометр, влагозапас атмосферы, водозапас облаков, водность переохлажденных облаков.

Improvement of methods for early warning of thunderstorm and identification of icing zones in clouds based on the integrated use of active and passive radar techniques

D.M. Karavaev, G.G. Shchukin

Mozhaisky military aerospace academia, Saint Petersburg, Russia

The article considers the methodical issues of integrated use of passive and active radars to improve early warning methods for development of thunderstorm processes and to identify icing areas in clouds. It discusses some results of experimental integrated studies of the atmosphere and powerful convective clouds using ground-based microwave radiometers and meteorological radar (as illustrated by the experiments in the northwestern Russia). The method of ground-based microwave radiometry has been developed to assess the integrated water vapor and integrated cloud liquid water contents. Comparative experiments have shown good agreement of radiometric measurements of atmospheric water vapor with radio sounding data, root mean square value being about 1 kg/m^2. The measured values of cloud liquid water intake are consistent with empirical cloud models based on aircraft cloud sensing. When studying convective clouds, a method of passive-active sensing at 36.5 and 9.3 GHz has been developed to determine the their average liquid water content and to identify dangerous areas of possible aircraft icing. The article discusses the results of experiments conducted at the Geophysical Observatory of the Mozhaisky Military Aerospace Academia and the use of the novel water vapor radiometer designed by Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences to determine the characteristics of the atmospheric water content with high space-time resolution.

Keywords: dangerous weather phenomena, thunderstorm, passive-active radar method, microwave radiometer, atmospheric water vapor, cloud liquid water content.

For citation: *D.M. Karavaev, G.G. Shchukin.* Improvement of methods for early warning of thunderstorm and identification of icing zones in clouds based on the integrated use of active and passive radar techniques. *Gidrometeorologiya i Ekologiya.* Journal of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2021. 62: 7—26. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-7-26

Введение

Опасные атмосферные явления погоды (мощные конвективные облака, град, гроза, сдвиг ветра, шквал, ливневые осадки и др.) наносят ущерб многим отраслям экономики. Особую опасность они представляют для авиации, электроэнергетики, сельского и лесного хозяйств. Важное прикладное значение имеет раннее выявление критических для запуска ракет космического назначения погодных условий на космодромах, а также выявление опасных переохлажденных зон в облаках и связанного с ними обледенения летательных аппаратов. Для своевременного обнаружения, идентификации опасных явлений большое значение имеют системы раннего предупреждения, основанные на применении современных радиофизических методов и дистанционных средств контроля состояния природной среды. Так, весьма перспективными являются методы активной и пассивной радиолокации [1—3], которые позволяют получать информацию о состоянии атмосферы (профили влажности и температуры воздуха), а также о характеристиках облаков (водность, водозапас облаков и др.) и осадков. Актуальность исследований микрофизических свойств облаков и их связи с электрическими процессами трудно переоценить в связи с развитием моделей грозоопасных облаков и технологий их модифицирования [4]. При исследовании опасных явлений погоды, связанных с процессами облако- и осадкообразования в атмосфере, особое внимание уделяется детальному экспериментальному исследованию динамических процессов, происходящих в атмосфере и связанных с образованием мощных конвективных облаков, с исследованиями микроструктурных особенностей их связи с атмосферно-электрическими процессами.

В настоящее время прогностические центры погоды широко используют и развивают мезомасштабные гидродинамические модели атмосферы, причем их разрешение постоянно улучшается [5]. Для задач прогноза погоды среди важнейших метеорологических величин являются профили температуры и влажности воздуха, водность и ледность облаков, интенсивность осадков, параметры ветра. Для совершенствования работы моделей над сушей все большая роль должна отводиться развитию распределенных наземных наблюдений с использованием средств дистанционного зондирования атмосферы, которые для задач по исследованию нижней атмосферы являются предпочтительными с точки зрения достижения высоких уровней пространственного и временного разрешения, точности, возможности детального изучения физических процессов, существенно дополняя спутниковую информацию.

Целью работы является анализ результатов комплексных (с применением методов активной и пассивной локации) экспериментальных исследований временной изменчивости влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков при различных

метеоусловиях, совершенствование метода прогноза грозовых процессов, разработка метода выявления опасных зон обледенения летательных аппаратов в переохлажденных облаках.

Методика комплексирования данных активно-пассивной локации и методы прогноза опасных явлений

Методы пассивной и активной радиолокации

Особую значимость для исследования облачности и осадков в метеорологии приобрела в середине 60-х — начале 70-х годов разработка методов, основанных на совместном применении активно-пассивных комплексов, в состав которых входят метеорологический радиолокатор, работающий в активном режиме, и микроволновая радиометрическая аппаратура [6]. В нашей стране в становление и развитие радиометеорологии, включающей активную и пассивную радиолокацию большой вклад внесли ученые ЦАО, ГГО, ВКА им. А.Ф. Можайского, ИРЭ АН СССР, НИРФИ, ВГИ: В.В. Костарев, В.Д. Степаненко, К.С. Шифрин, А.М. Боровиков, М.А. Колосов, А.Е. Башаринов, В.С. Троицкий, С.А. Жевакин, Е.М. Сальман, А.Г. Горелик, А.А. Черников, А.П. Наумов, Б.Г. Кутуза, Г.Г. Щукин, М.Т. Абшаев, С.М. Гальперин, Ю.В. Мельничук и др.

Основная задача метеорологической радиолокации — оповещение об опасных явлениях погоды, связанных с облаками (ливень, гроза, град, смерч и др.). В автоматизированных метеорологических радиолокационных станциях (МРЛ), работающих на сети штормооповещения, выдается следующая информация: радиолокационная отражаемость, интенсивность и количество осадков, высоты верхней и нижней границ облаков, опасные явления (гроза, ливень, град), данные о скорости и направлении перемещения облаков. Пример отображения получаемых радиолокационных данных (радиолокационной отражаемости) приводится на рис. 1.

В настоящее время разработан новый отечественный многопараметрический доплеровский метеорологический радиолокатор с поляризационной селекцией сигнала ДМРЛ-С. В аэропортах на сети Росгидромета планируется установить около 140 ДМРЛ-С [7]. Введение когерентного режима в радиолокаторе позволяет получать дополнительную информацию о цели — ее радиальную скорость. В частности, представляется возможным восстанавливать поле ветра в обложных осадках, существенно повышать эффективность распознавания шквалов, измерять сдвиг ветра, оценивать турбулентность в облаках и осадках, получать информацию о вертикальных движениях частиц и воздуха в облаках, гораздо надежнее определять смерчи и т. д. Доплеровский радиолокатор способен проводить наблюдения в двух режимах: «Скорость» и «Отражаемость». Радиус обнаружения опасных явлений погоды в режиме «Отражаемость» близок к соответствующему радиусу некогерентного радиолокатора МРЛ-5 и составляет около 250 км. В режиме наблюдений «Скорость» радиус обнаружения составляет около 100 км.

Метод наземной микроволновой радиометрии (радиотеплолокации) используется для определения влагозапаса атмосферы, водозапаса облаков, профилей

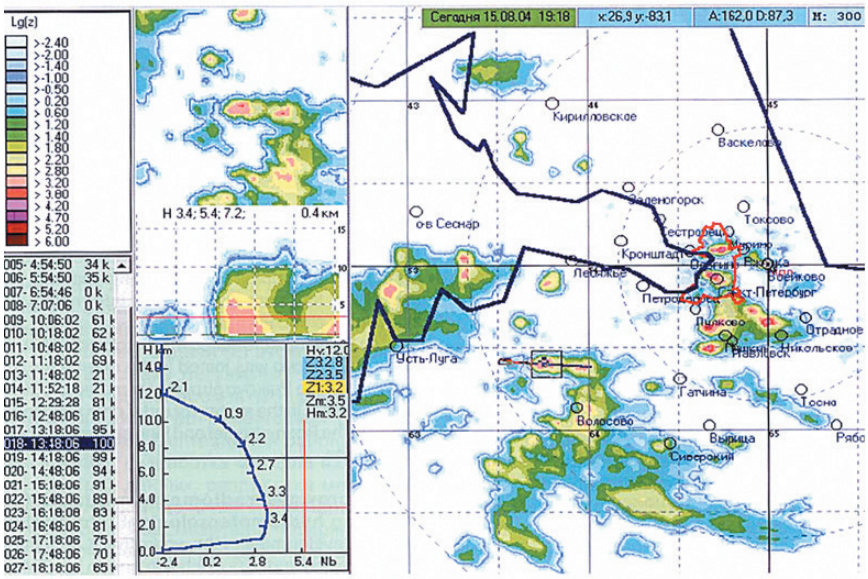

Рис. 1. Карта радиолокационных данных МРЛ.

Fig. 1. Map of meteorological radar data.

влажности и температуры воздуха в тропосфере [1, 8, 9]. В настоящее время метод микроволновой радиометрии достаточно отработан и находит практическое применение в метеорологии. Наиболее информативные участки спектра излучения атмосферы для решения задачи определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков следующие: 1,6—1,9; 4,2—3,0; 7—9,5; 12,8—14,3 и 20—32 мм. Для атмосферы, содержащей слоистообразные облака и конвективные облака на ранних стадиях развития, определение влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков осуществляется из результатов измерения характеристик радиотеплового излучения на частотах f_1, f_2, вблизи центра линии поглощения водяного пара 22,24 и 36,5 ГГц.

Соотношение для определения влагозапаса атмосферы (Q) и водозапаса облаков (W) имеет вид:

$$Q = a_0 + a_1\tau(f_1) + a_2\tau(f_2),$$

$$W = b_0 + b_1\tau(f_1) + b_2\tau(f_2), \qquad (1)$$

где $\tau(f)$ — оптическая толщина атмосферы на частоте f; a_i, b_i — коэффициенты, их среднеклиматические значения получены по данным радиозондирования атмосферы и эмпирическим моделям облачности. Ограничения в применении радиометрического метода определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков по нисходящему радиотепловому излучению в диапазоне частот около 22,2 и 36,5 ГГц связаны с наблюдениями облаков с дождями, когда обработка данных (в приближении чистого поглощения) с целью получения информации

о влагозапасе атмосферы и водозапасе облаков является некорректной. В случае наблюдения переохлажденных облаков могут иметь место облака смешанного фазового состава, включающие обводненные кристаллические частицы сложной формы. Поэтому интерпретация радиотеплового излучения вызывает дополнительные трудности.

Экспериментальные исследования влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков выполнялись в различных регионах: над океаном и над сушей, их результаты рассматривались в [1, 9, 10]. В состав аппаратуры радиометрического комплекса для определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков входят микроволновые радиометры (частоты 22,2 и 36,5 ГГц) с антенной системой, устройства калибровки и система сбора и обработки и визуализации данных на основе аппаратно-программных комплексов. Темп обновления выходных данных (влагозапаса атмосферы) составляет обычно от 10 с до 15 мин. В качестве примера на рис. 2 показаны результаты измерений водозапаса облаков и влагозапаса атмосферы в период с 1 по 21 мая 2007 г. в Ленинградской обл. (п. Воейково).

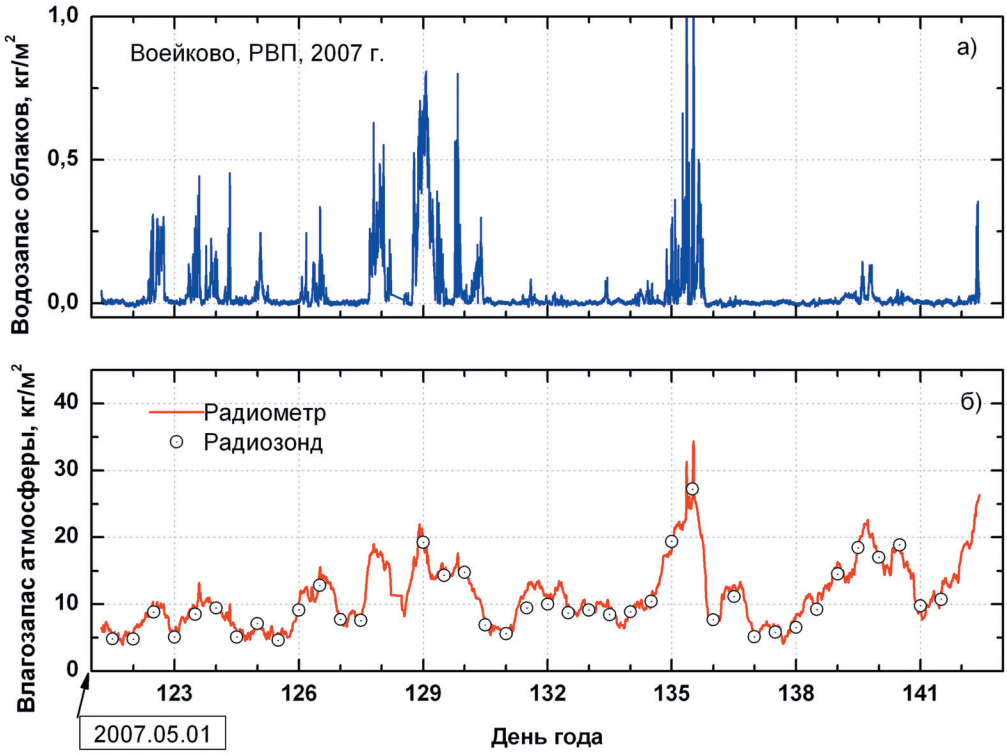

Рис. 2. Временной ход водозапаса облаков (*а*) и влагозапаса атмосферы (*б*) по радиометрическим измерениям в Ленинградской обл.

Fig. 2. Time series of the cloud liquid (*а*) and the water vapor of atmosphere (*б*) from radiometric measurements in Leningrad region.

Как видно из рисунка, влагозапас атмосферы за период измерений изменялся от 3,2 до 35 кг/м^2. Результаты радиотеплолокационных измерений влагозапаса атмосферы согласуются с данными радиозондирования атмосферы (различие составляло около 1 кг/м^2). Наблюдения в различные сезоны года показали, что радиотеплолокационные измерения водозапаса слоистообразных облаков согласуются с имеющимися самолетными данными для Северо-Западного региона России. В зимний период в Ленинградской обл. водозапас облаков не превышал 0,28 кг/м^2 в 95 % случаев, а значения водозапаса, превышающие 0,52 кг/м^2, регистрировались лишь в 1 % случаев. В летний период водозапас облаков превышал уровень 0,8 кг/м^2 в 5 % случаев.

Одной из важнейших задач радиотеплолокации является определение интегрального содержания жидкокапельной влаги в конвективных облаках, для которых из-за их неоднородной вертикальной структуры неприменимо соотношение (1). В данном случае используется однопараметрический метод оценки водозапаса облаков, основанный на соотношении:

$$W = k_w(f, T_{cl})^{-1}\left[\tau(f) - \tau_d(f) - k_q(f)Q\right], \qquad (2)$$

где $k_q(f)$, $k_w(f, T_{cl})$ — эффективные удельные коэффициенты поглощения в жидкокапельных облаках и водяном паре, соответственно; $\tau_d(f)$ — поглощение в кислороде; $\tau(f)$ — полное поглощение, которое определяется в результате радиотеплолокационных измерений радиояркостной температуры. При исследовании конвективных облаков на различных стадиях информативные участки спектра радиотеплового излучения находятся в области малого ослабления излучения и «окнах» прозрачности атмосферы при частотах 6—14, 30—37 и 75—95 ГГц.

Совместное использование методов радиотеплолокации и радиолокации позволяет решать задачи определения профилей водности и средней водности конвективных облаков, водозапаса переохлажденной части конвективных облаков, интенсивности осадков. С практической точки зрения радиолокационно-радиометрический метод перспективен для выявления градоопасных зон переохлажденных облаков и обнаружения обледенения в них. Пассивно-активный метод имеет преимущества (по сравнению с методом классической радиолокации) для повышения точности определения водности облаков и интенсивности осадков.

Пассивно-активный метод определения средней водности конвективных облаков основан на измерении водозапаса зондируемой зоны с помощью микроволнового радиометра и ее протяженности с помощью активного канала пассивно-активной станции [6]. В соответствии с этим методом среднюю водность облака $\bar{w}(\vec{l})$ вдоль направления зондирования определяют по соотношению:

$$\bar{w}(\vec{l}) = \frac{W(\vec{l})}{L(\vec{l})}, \qquad (3)$$

где $L(\vec{l})$ — протяженность зондируемой зоны облака (дождя), определяемая с помощью активного канала (радиолокатора); $W(\vec{l})$ — водозапас облака вдоль направления визирования, определяемый с помощью радиометра.

Для определения интенсивности дождя используются соотношения:

$$I(\vec{l}) = 3,4\overline{w}(\vec{l})^{1.33} \text{ при } \overline{w}(\vec{l}) \le 0,32 \text{ г/м}^3,$$

$$I(\vec{l}) = 2,8\overline{w}(\vec{l})^{1.17} \text{ при } \overline{w}(\vec{l}) > 0,32 \text{ г/м}^3, \quad (4)$$

Пассивно-активный метод определения профилей водности конвективных облаков основан на измерении водозапаса зондируемой зоны с помощью микроволнового радиометра и оценки весовой функции водности с помощью активного канала пассивно-активной станции:

$$w(l) = \frac{z(l)^{1/\beta}}{\int_{l_1}^{l_2} Z(l)^{1/\beta}\, dl} W(\vec{l}), \quad (5)$$

где $Z(l)$ — радиолокационная отражаемость; l_1, l_2 — границы облака по данным радиолокатора; β — параметр, зависящий от распределения капель по размерам.

Метод предупреждения грозовых процессов

Метод предупреждения развития грозовых процессов основан на одновременном измерении интенсивности собственного теплового радиоизлучения облаков и их радиолокационной отражаемости с помощью радиолокационно-радиометрической аппаратуры. Радиолокатор и радиотеплолокатор работают на один рефлектор и излучатель, что обеспечивает совмещение диаграмм направленности излучения и приема радиолокационного и радиометрического каналов, и, следовательно, получения информации от одного и того же объема облака.

Метод предупреждения грозовых процессов включает:

— обнаружение и распознавание зон повышенного содержания жидкокапельной влаги в переохлажденной части облака с помощью пассивно-активного радиолокатора.

— мониторинг состояния атмосферы с применением данных микроволнового радиометрического влажностного или температурно-влажностного зондирования атмосферы с целью определения (прежде всего, содержания парообразной влаги в атмосфере) благоприятных условий для развития мощных конвективных облаков и грозовых облаков.

Современный вариант пассивно-активного радиолокатора, обеспечивающий совмещенную работу радиолокатора и радиометра с общей антенной в стандартном режиме радиолокационного обзора и сбора радиотеплолокационных данных, был разработан на базе ДМРЛ-С специалистами территориально обособленного подразделения «Лианозовский электромеханический завод» (ТОП «ЛЭМЗ», Москва) при участии авторов [11].

Реализации пассивно-активного радиолокатора на базе ДМРЛ-С имеет практические перспективы применения в системе метеорологического обеспечения на космодроме «Восточный». В дальнейшем целесообразно рассматривать также разработку пассивно-активного радиолокатора на базе ДМРЛ-Х. Использование Х-диапазона частот имеет некоторые преимущества (по сравнению

с С-диапазоном) при исследовании переохлажденных облаков [1]. Также перспективны для различных применений мобильные комплексы радиотехнических средств, включающие в состав различные средства дистанционного зондирования атмосферы [12]. Среди зарубежных пассивно-активных радиолокаторов для исследования облаков следует отметить недавние разработки пассивно-активных комплексов миллиметрового диапазона FMCW (Frequency-Modulated Continuos Wave) радиолокатора (Radiometer Physics, GmbH, Германия) [13].

Использование информации о высотных распределениях влажности и температуры воздуха, влагозапаса и метеопараметров атмосферы в регионе исследований является важным для улучшения технологии раннего предупреждения о возможном развитии опасных явлений погоды. Влажностные и температурные параметры атмосферы в значительной степени предопределяют благоприятные условия развития опасных гидрометеорологических процессов, связанных с развитием мощных конвективных облаков, гроз, ливневых осадков. Наземные микроволновые радиометры позволяют существенно дополнять данные аэрологического зондирования атмосферы, позволяя отслеживать динамику процессов, происходящих в атмосфере [14, 15].

Предложенный вариант построения регионального радиометрического прогностического критерия развития облаков и осадков имеет вид:

$$Kr_{th} = C_0 + C_1 Q + C_2 \Delta Q(\Delta t), \qquad (6)$$

где C_k — коэффициенты регрессии; Q — влагозапас атмосферы; $\Delta Q(\Delta t)$ — изменение влагозапаса за интервал времени Δt. При условии $Kr_{th} > 0$ ожидаются опасные явления, связанные с развитием облаков, гроз. Критерий определяет временное «окно», когда вероятно развитие опасных явлений. Предварительное тестирование разработанного радиометрического критерия показало, что заблаговременность прогноза опасных явлений, связанных с развитием мощных облаков в Ленинградской обл. составляет 1—12 ч, а оправдываемость — около 0,76 %. Перспективы дальнейшего совершенствования технологии раннего предупреждения развития опасных явлений погоды связаны с совершенствованием технологий регионального сверхкраткосрочного прогноза на основе усвоения данных дистанционного зондирования атмосферы, включая радиометрическую, радиолокационную (доплеровскую), спутниковую и другие виды разнородной метеорологической информации.

Новые возможности для совершенствования вышеперечисленных технологий предупреждения развития мощных конвективных облаков, грозовых процессов основываются на исследованиях, проводимых на базе Геофизической обсерватории Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского в п. Лехтуси Ленинградской обл., оснащенной современным комплексом радиофизических средств [16].

Метод обнаружения обледенения в облаках

Для авиации одним из опаснейших метеоявлений, связанных с наличием в атмосфере переохлажденной воды, является обледенение летательных аппаратов. Несмотря на достигнутые успехи в изучении физико-метеорологических причин

и условий обледенения самолетов, в диагнозе и прогнозе этих условий, а также в разработке современных конструкций самолетов, применения более совершенных антиобледенительных устройств, проблема обледенения продолжает оставаться актуальной [17, 18]. Одной из важнейших характеристик степени опасности обледенения летательных аппаратов является его интенсивность J (скорость нарастания толщины льда, измеряемая в мм/мин). Эксперименты показали, что параметр J существенно зависит от водности переохлажденных облаков и от трения потока воздуха при полете летательных аппаратов.

В принятые критерии распознавания опасных явлений входят метеопараметры атмосферы, среди которых: высота нижней границы и толщина слоя облаков, толщина слоя обледенения, средние значения температуры, относительной и удельной влажности в слое обледенения и др. [19, 20]. Преимущества применения пассивно-активного радиолокатора связаны с возможностью определения местоположения зон обледенения в переохлажденных облаках, скорости и направления движения, горизонтальных и вертикальных размеров этих зон, а также средней водности и, следовательно, степени интенсивности обледенения.

В метод сверхкраткосрочного прогноза обледенения самолетов входят следующие действия:

— обнаружение и распознавание зон возможного обледенения в облаках с помощью пассивно-активного радиолокатора;

— сверхкраткосрочный прогноз пространственно-временного распределения зон возможного обледенения вдоль авиатрасс;

— определение степени опасности обледенения летательных аппаратов на основе данных о водности переохлажденной зоны в облаках с использованием эмпирических соотношений:

$$J = 1{,}18w - 0{,}12 \text{ при } w < 2{,}0 \text{ г/м}^3,$$

$$J = 1{,}15w + 1{,}76 \text{ при } w \geq 2{,}0 \text{ г/м}^3, \qquad (7)$$

Тяжелые изменения в режиме полета летательных аппаратов наступают при $J > 1{,}15$ мм/мин. Для распознавания опасных зон обледенения самолетов может быть использован критерий, построенный на основе данных о водности (w) и температуры (T_{cl}) переохлажденных облаков:

$$Kr_{icing} = -1{,}785w + 0{,}0312T_{cl} + 0{,}4233. \qquad (8)$$

Если указанный критерий имеет отрицательные значения, то принимается решение о средней или высокой степени возможности обледенения.

При разработке методов диагноза и прогноза обледенения летательных аппаратов, особенно сильного, в первую очередь, необходимо рассматривать слоисто-дождевые облака Ns–As, несмотря на то, что в мощных конвективных облаках возможны более высокие интенсивности обледенения летательных аппаратов. Этот факт обусловлен существующими нормативными документами, запрещающими входить в области мощных конвективных облаков, рекомендующими обходить грозовые облака на удалении 10—15 км.

Результаты комплексных исследований опасных явлений погоды с применением пассивной и активной радиолокации

В последние 40 лет комплексные эксперименты по исследованию опасных явлений погоды, конвективных облаков, грозовых облаков, с применением различных средств дистанционного зондирования атмосферы (в том числе пассивной и активной радиолокации) были проведены:

— в Ленинградской обл. [21] на полевой экспериментальной базе Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова в п. Тургош;

— на экспериментальной базе Научно-исследовательского центра дистанционного зондирования атмосферы в п. Воейково;

— в Геофизической обсерватории Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского в п. Лехтуси [16].

Метод комплексного пассивного и активного исследования мощных конвективных (грозовых) облаков состоит в использовании радиолокаторов и микроволновых радиометров различных диапазонов волн для исследования взаимосвязи микрофизических, динамических и электрических процессов в облаках. Для обнаружения частиц облаков и осадков использовались метеорологические радиолокаторы (длина волны: 0,8, 3,2 и 10 см). Для детектирования крупнокапельных частиц и ионизированных каналов молний применялись радиолокаторы (длина волны: 11, 35 и 200 см), а также осуществлялась регистрация электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,4—60 и 150 МГц. Характеристики влагосодержания атмосферы определялись с помощью микроволновых радиометров (длина волны: 0,8, 1,35 и 3,2 см). Одновременное использование этих технических средств позволяет исследовать микрофизические характеристики тех областей мощных конвективных облаков, в которых происходят генерация электрических зарядов, их разделение и появление сильноточных разрядов молний. Кроме того, такие комплексные наблюдения позволяют рассматривать относительное расположение зон молниевой активности, осадков, турбулентности, повышенного содержания переохлажденной влаги в облаках, фазового состава облаков.

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать следующие выводы:

— пространственно-временное распределение водности мощного конвективного облака по данным радиотеплолокатора не соответствует распределению его отражаемости;

— максимумы грозовой активности и водности конвективной ячейки не совпадают во времени: пик грозовой активности часто имеет место при относительно малых значениях водности облака. Эти экспериментальные данные указывают на то, что зоны интенсивной электризации, по-видимому, содержат ледяные облачные частицы.

Также выявлен ряд особенностей по взаимному расположению зон приземных осадков различной интенсивности и молний в Cb. Из общего дифференцированного количества зафиксированных молний (более 300) 58 % совпали с зонами осадков и 42 % наблюдались вне этих зон.

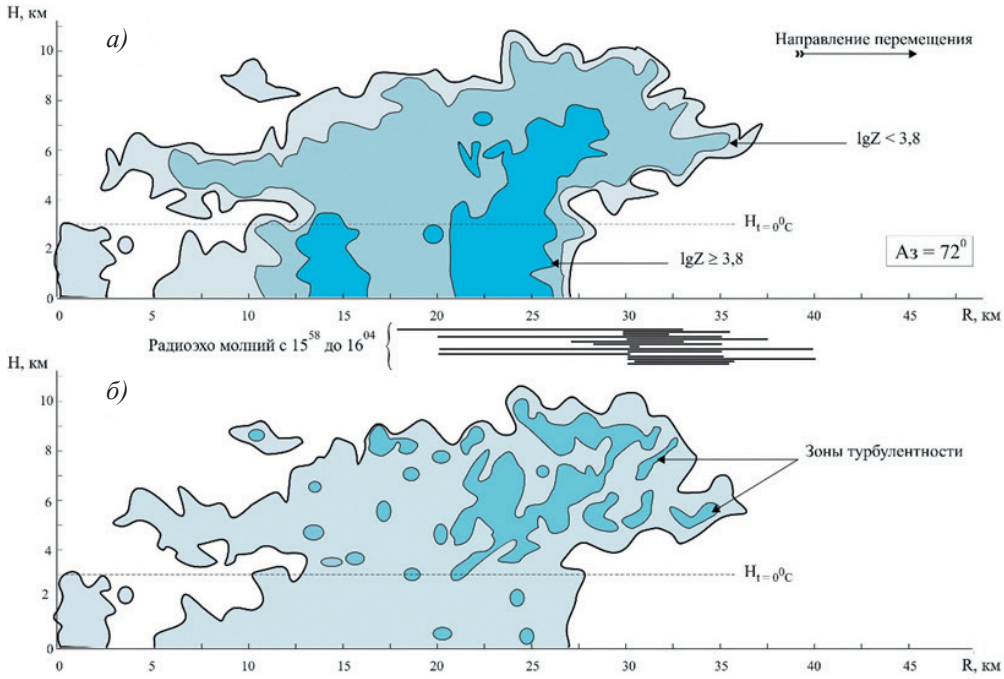

Рис. 3. Относительное расположение:

а) зон повышенной отражаемости, *б*) турбулентности грозового облака в начале молниевой активности (время 16 ч 00 мин 31 июля 1989 г.).

Fig. 3. Relative location of high-reflectivity zones (*a*) and turbulence (*б*) of a thunderstorm at the beginning of lightning activity (16:00 UTC 31 July, 1989)

Анализ проведенных исследований расположения зон повышенных значений отражаемости, турбулентности и грозовой активности в конвективных облаках показал, что:

— зоны повышенной отражаемости и турбулентности в грозовом облаке в целом не совпадают (рис. 3);

— наиболее близкое их взаимное расположение, а местами и перекрытие этих зон наблюдается в грозоактивной стадии облака;

— молниевая активность отмечается вблизи зон повышенной турбулентности в передней части облака.

Несмотря на большое число исследований грозовых облаков, остаются вопросы относительно динамики взаимосвязи различных характеристик облака на различных стадиях грозовой активности. В качестве иллюстрации полученных экспериментальных данных на рис. 4 представлены результаты исследований грозовых облаков.

На рис. 4 *а* приводятся вертикальные профили отражаемости $Z(H)$ и водности $w(H)$ облака для периодов роста, пика и ослабления его грозовой активности. Облако исследовалось в течение 60 мин, включая 40 мин в период грозы. За время

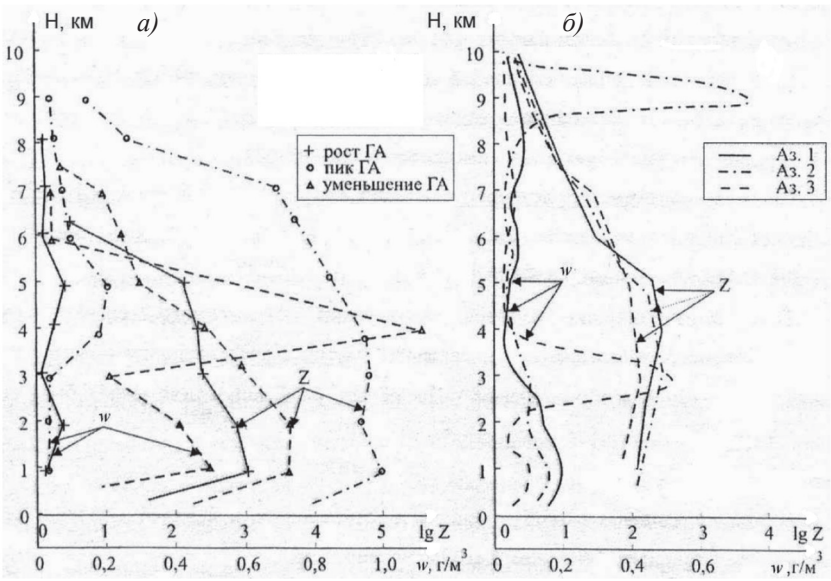

Рис. 4. Вертикальные профили $Z(H)$ и $w(H)$:

а) в периоды роста, пика и уменьшения грозовой активности (ГА);
б) при различных азимутах (1), (2), (3).

Fig. 4. Vertical profiles of $Z(H)$ и $w(H)$:

а) during periods of growth, peak and decrease of thunderstorm activity; *б*) at different azimuths (1), (2), (3).

грозы профили $Z(H)$ и $w(H)$ имели явно различающуюся форму с несовпадающими максимумами. Кроме того, данная конвективная ячейка высотой около 10 км имела максимумы водности на высоте 1—3 км (связанный с осадками) и на высоте 4—6 км. Число молний за пятиминутный интервал для каждого из трех профилей $Z(H)$ и $w(H)$ составило 4, 18 и 1. Соответствующие значения максимальной водности облака для этих периодов грозовой активности облака составили 0,07; 0,25 и 1,2 г/м^3. Отмечается несоответствие максимумов числа разрядов и водности облака. На рис. 4 *б* приводятся вертикальные профили отражаемости $Z(H)$ и водности $w(H)$ при трех различных азимутах. Максимальная водность в переохлажденной части облака (на высоте около 9 км) в данном случае составляла около 0,77 г/м^3. Таким образом, экспериментальные данные показывают возможность существования локальных зон 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.

Экспериментальные исследования поляризации радиотеплового излучения облаков и осадков в диапазонах частот 10, 13, 36 и 90 ГГц в основном согласуются с модельными оценками радиотеплового излучения облачной атмосферы и осадков, причем второй и третий параметры Стокса в случае осадков на наклонных трассах могут составлять величины 15—20 К и 2—3 К соответственно.

Обнаруженные кратковременные высокие уровни поляризации собственного радиотеплового излучения переохлажденной части мощных конвективных облаков (около 15 К на частоте 36,5 ГГц) могут объясняться динамическими факторами и кратковременной ориентацией облачных частиц в электрическом поле облака. Поляризационные измерения полезны при исследовании грозовых облаков, при определении водозапаса облаков и осадков, для раздельного определения содержания мелкокапельной и крупнокапельной фракции водозапаса облаков.

В период экспериментов реализован метод определения водозапаса конвективных облаков из результатов двухчастотных (9,3 и 36,5 ГГц) измерений характеристик радиотеплового излучения облачной атмосферы. В состав аппаратуры для определения водозапаса входят радиометры, полноповоротная антенная система (ширина луча диаграммы направленности антенны составляет около 1 градуса по уровню 3 dB) и система сбора данных.

При радиометрических исследованиях конвективных облаков используются методики азимутальных разрезов при различных углах места. Полученные радиотепловые карты облака использовались для определения водозапаса облака по лучу зрения антенны. Пример результатов радиотеплолокационного зондирования конвективного облака (определения его водозапаса) в п. Тургош Ленинградской обл. приводится на рис. 5. Как видно из рисунка, в конвективном облаке на стадии диссипации выделяются 2 ячейки с максимальным водозапасом около 8 кг/м^2.

Одной из задач экспериментов являлось исследование пространственно-временной изменчивости влагозапаса атмосферы в период развития интенсивной

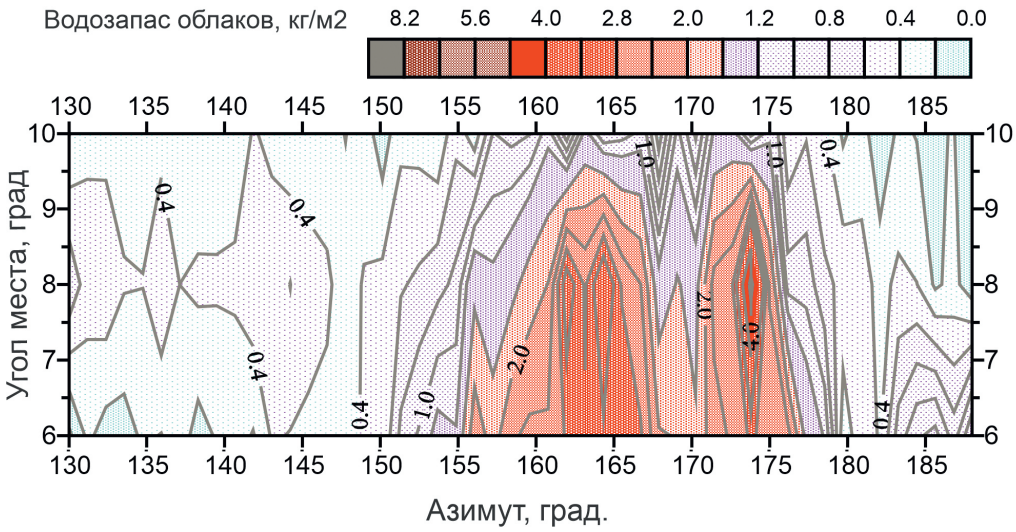

Рис. 5. Карта водозапаса
конвективного облака по данным радиотеплолокационных наблюдений.

Fig. 5. The map of cloud liquid path of convective cloud from microwave radiometric measurements.

конвекции. В качестве примера на рис. 6 приводятся результаты наблюдения мощного грозового фронта, который наблюдался 14 июля 2008 г. в Ленинградской обл.

По радиолокационным данным МРЛ-5 первые грозовые очаги были зарегистрированы около 15 ч в районе г. Кингисепп. Облачная система перемещалась в северо-восточном направлении со скоростью около 50 км/ч. Высота верхней границы облачности достигала 13 км. Максимальные значения логарифма радиолокационной отражаемости Log(Z) составляли более 3,2 дБ. Площадь радиолокационной отражаемости составляла более 3 000 км^2. Около 18 ч 50 мин грозовой фронт проходил через п. Воейково (данные МРЛ-5 показаны на рис. 6 *в*) и сопровождался ливнями, шквалистым ветром и интенсивными разрядами молний типа облако—земля. Результаты приземных измерений низкочастотной составляющей

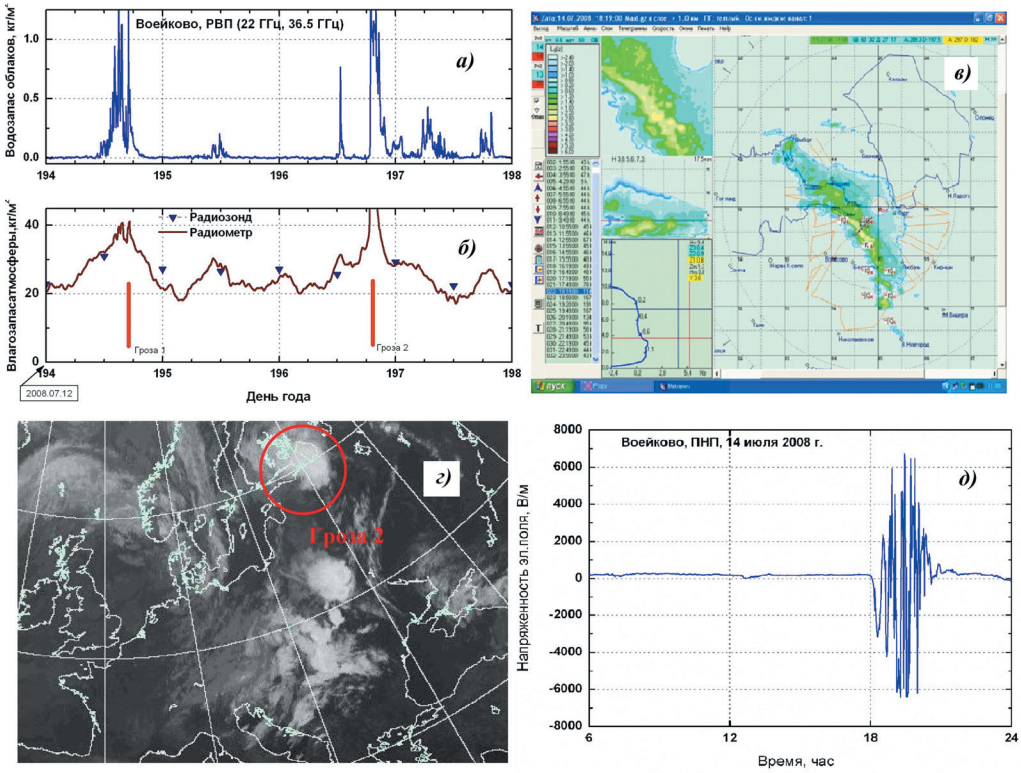

Рис. 6. Данные радиофизических исследований атмосферы в Ленинградской обл.:

а) временной ход водозапаса облаков; *б*) временной ход влагозапаса атмосферы в период 12—15 июля 2008 г. в п. Воейково (красные вертикальные линии указывают период развития грозовых облаков); *в*) карта данных МРЛ-5 14 июля 2008 г. в 17 ч 19 мин; *г*) изображение Meteosat-9; *д*) электрическое поле у Земли 14 июля 2008 г. в п. Воейково.

Fig. 6. Data from radiophysical observations of the atmosphere in the Leningrad region:

а) time series of cloud liquid; *б*) time series of water vapor of atmosphere 12—15 July 2008 in Voeikovo; *в*) data of MRL-5 14 July 2008 at 17:19 UTC; *г*) map of Meteosat-9; *д*) ground atmospheric electric field at 14 July 2008 in Voeikovo.

электрического поля показаны на рис. 6 *д* и обнаруживают отрицательную волну поля перед областью осадков и детектируют более 150 электрических разрядов за период времени продолжительностью около 3 ч.

Микроволновые радиометрические наблюдения показывают, что 14 июля отмечался рост влагозапаса атмосферы, во второй половине дня в окрестности грозового фронта влагозапас атмосферы составлял более 35—40 кг/м^2 (рис. 6 *б*). Водозапас облаков при прохождении грозового фронта превышал значения 1,0 кг/м^2 в течение более чем 2 ч. (рис. 6 *а*). По спутниковым данным ИК-радиометра Метеосат-9 (длина волны 10,8 мкм) видна обширная зона облачности над Ленинградской обл. (рис. 6 *г*), температура частиц наковальни конвективного облака оценивалась около минус 52—55 °С. По данным аэрологического зондирования п. Воейково после прохождения фронта отмечается понижение температуры в пограничном слое атмосферы на 3—7 °С, уменьшение относительной влажности воздуха в различных слоях атмосферы и уменьшение влагозапаса атмосферы.

На рис. 7 показан временной ход влагозапаса атмосферы в период интенсивного развития гроз в июле (п. Тургош, Ленинградская обл.).

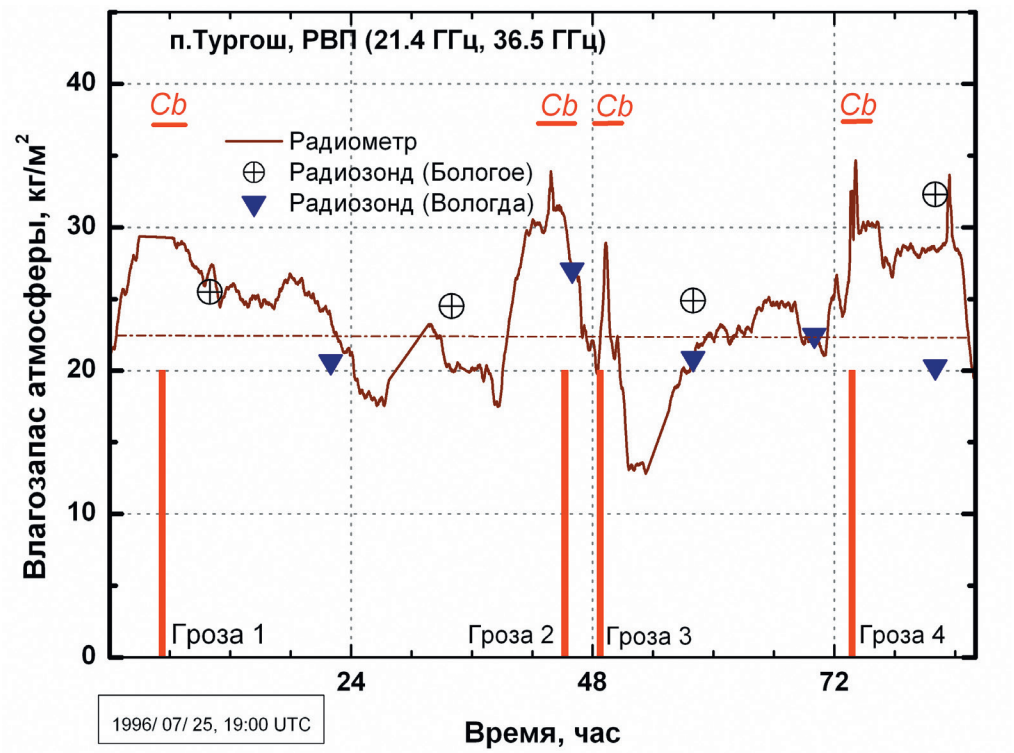

Рис. 7. Временной ход влагозапаса атмосферы в период развития грозовых облаков в регионе п. Тургош (вертикальная красная линия — обнаружение грозовой активности).

Fig. 7. Time series of water vapor during the development of thunderstorms around Turgosh (vertical red line shows thunderstorm activity).

На рисунке отмечены периоды, когда радиотехнические средства обнаруживали развитие молниевых разрядов (красная вертикальная линия). В эти периоды обнаруживалось развитие мощных конвективных облаков (в радиусе до 100 км), которые достигали стадии Cb. Выполненные эксперименты также показали, что вариации влагозапаса атмосферы в окрестности грозового облака могут значительно превышать уровни вариаций влагозапаса, наблюдаемые обычно для фоновой атмосферы.

В последние годы в Геофизической обсерватории Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского (п. Лехтуси Ленинградской обл.) проводились эксперименты с использованием радиометра водяного пара Института прикладной астрономии РАН [22]. Микроволновый радиометр водяного пара построен по классической схеме двухчастотного (20,6 и 32,0 ГГц) радиометра полной мощности с супергетеродинным приемником. Ширина луча диаграммы направленности антенны (по уровню 3 дБ) составляет около 7 град., флуктуационный порог чувствительности составляет менее 0,1 К/с$^{1/2}$. Темп сбора данных составлял 5 с.

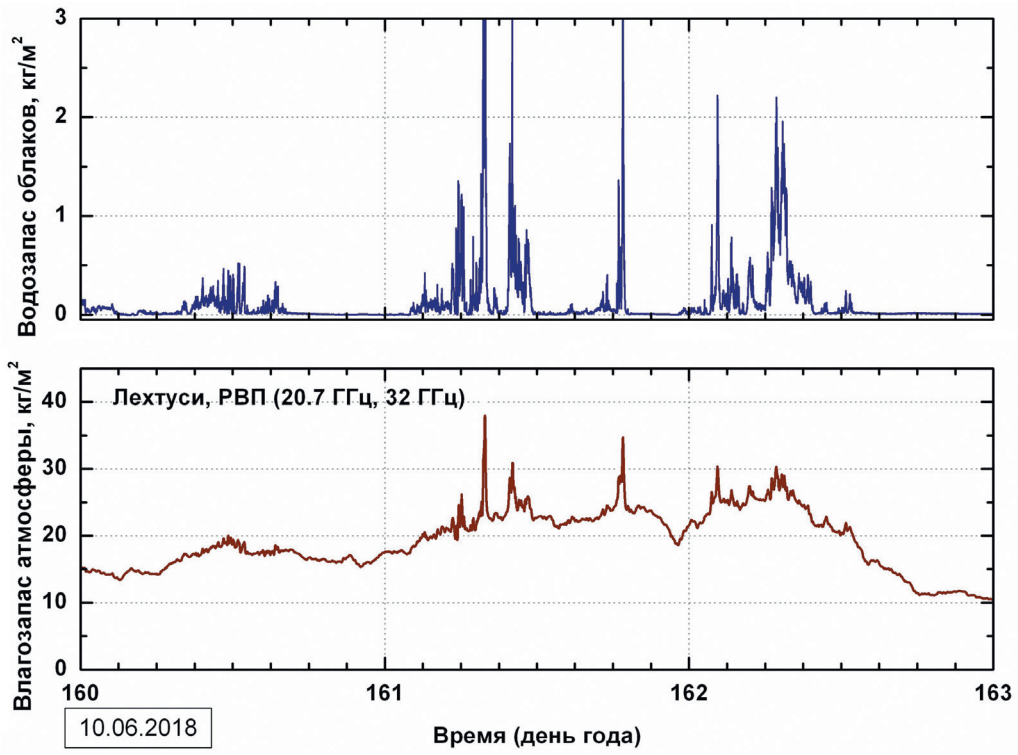

Рис. 8. Временной ход водозапаса облаков и влагозапаса атмосферы в период прохождения атмосферного фронта (10—12 июня 2018 г., п. Лехтуси).

Fig. 8. Time series of cloud liquid, and water vapor during the passage of the atmospheric front (10—12 June 2018, Lehtusi).

По предварительным оценкам погрешность определения влагозапаса атмосферы составляет около 0,5 кг/м^2, водозапаса облаков — около 0,03 кг/м^2. Радиометр дает возможность проведения длительных, непрерывных, круглосуточных измерений характеристик влагосодержания атмосферы в автоматическом режиме.

Для иллюстрации на рис. 8 приводится пример временной изменчивости водозапаса облаков и влагозапаса атмосферы в период с 10 по 12 июня 2018 г. в п. Лехтуси Ленинградской обл. Видно, что в период с 10 по 11 июня происходили существенные изменения (рост) влагозапаса атмосферы в интервале от ~15 до 27 кг/м^2. Качественно микроволновые радиометрические измерения влагозапаса атмосферы согласуются с независимыми наблюдениями станции аэрологического зондирования в п. Воейково (удаленной на расстояние около 40 км), уменьшение влагозапаса атмосферы по данным радиозондирования 12 июня составляло около 14,3 кг/м^2. Вариации водозапаса облаков 11 и 12 июня — более 2 кг/м^2. Столь значительные изменения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, обусловлены прохождением сложной системы атмосферных фронтов в области циклона.

Заключение

1. Усовершенствован метод сверхкраткосрочного прогноза грозоопасности мощных конвективных облаков на основе комплексного применения средств пассивной и активной радиолокации.

2. Разработаны новые критерии обнаружения зон обледенения в переохлажденных облаках.

3. В результате выполненных экспериментальных исследований конвективных облаков на разных стадиях развития выявлено следующее:

а) получены оригинальные результаты о взаимном расположении зон максимальной радиолокационной отражаемости, водности облаков и зон повышенной турбулентности;

б) обнаружено наличие на больших высотах переохлажденной влаги.

4. Дальнейшее развитие технологий сверхкраткосрочного прогнозирования опасных явлений погоды планируется осуществлять на основе комплекса радиофизических средств Геофизической обсерватории Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского.

Список литературы

1. *Степаненко В.Д., Щукин Г.Г, Бобылев Л.П., Матросов С.Ю.* Радиотеплолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 283 с.
2. *Ryzhkov A.V., Snyder J., Carlin J.T., Khain A., Pinsky M.* What polarimetric weather radars offer to cloud modelers: forward radar operators and microphysical / thermodynamic retrievals // Atmosphere. 2020. V. 11, No. 4. P. 362—395. doi:10.3390/atmos11040362.
3. *Matrosov, S.Y., Schmitt C.G., Maahn M., G.de Bur.* Atmosheric ice shape estimates from polarimetric radar measurements and in situ observations // Journal of atmospheric and oceanic technology. 2017. V. 34. No. 12. P. 2569—2587. doi: 10.1175/JTECH-D-17-0111.1.
4. *Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Тапасханов В.О., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А., Макуашев М.К., Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т., Ташилова А.А., Кешева Л.А.* Физика градовых облаков и активных воздействий на них: состояние и направления развития. Нальчик: ООО «Печатный двор», 2013. 216 с.

5. *Veltishchev N.F., Zhupanov V.D.* Experiments on Numerical Modelling of intense convection // Russian Meteorology and Hydrology. 2008. V. 33, No. 9. P. 560—569. doi: 10.3103/S1068373908090033.
6. *Shchukin G.G., Bulkin B.B.* Meteorological passive-active radar observations // Journal of Communication Technology and Electronics. 2011. V. 56, No. 5. P. 1064—1069. doi: 10.1134/S1064226911030089.
7. *Zhukov V.Y., Shchukin G.G.* Current Problems of Meteorological Radiolocation // Journal of Communication Technology and Electronics. 2016. V. 61, No. 10. P. 1069—1080. doi: 10.1134/S1064226916100235.
8. *Solheim F., Godwin J.R., Westwater E.R., Han Y., Keihm S.J., Marsh K., Ware R.* Radiometric profiling of temperature, water vapor and cloud liquid water using various inversion methods // Radio Science. 1998, v. 33, No. 2. P. 393—404. doi: 10.1029/97RS03656.
9. *Karavaev D.M., Shchukin G.G.* Status and prospects of application of microwave radiometry of the atmosphere // Atmospheric and Oceanic Optics. 2016. V. 29, No. 3. P. 308—313. doi: 10.1134/S1024856016030076.
10. *Karavaev D.M., Shchukin G.G., Efremenko A.N.* Ground-based microwave radiometry for measurements of atmospheric water vapour and cloud liquid water contents // Journal of Physics: Conference Series. 1632 (2020) 012026, IOP Publishing. doi: 10.1088/1742-6596/1632/1/012026.
11. *Вылегжанин И.С., Жуков В.Ю., Караваев Д.М., Щукин Г.Г.* Развитие метода пассивно-активной радиолокации в задачах штормооповещения // Труды ВКА имени А.Ф. Можайского. 2016. Вып. 653. С. 146—150.
12. *Boreysho A.S, Ilyin M.Y, Kim A.A, Konyaev M.A, Shchukin G.G., Zhukov V.Y.* Possibility and application of all-weather lidar-radio sensing complexes // Journal of Physics: Conference Series (International Conference “Actual Trends in Radiophysics”). 1499(2020) 012025. doi: 10.1088/1742-6596/1499/1/012025.
13. *Küchler N., Kneifel S., Löhnert U., Kolliasa P., Czekala H., Rose T.* W-Band radar—radiometer system for accurate and continuous monitoring of clouds and precipitation // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2017. V. 34. P. 2375—2392. doi: 10.1175/JTECH-D-17-0019.1.
14. *Cimini D., Nelson M., Guldner J., Ware R.* Forecast indices from a ground-based microwave radiometer for operational meteorology // Atmos. Meas. Tech. 2015. V. 8, No. 1. P. 315—333. doi: 10.5194/amt-8-315-2015.
15. *Щукин Г.Г., Караваев Д.М.* Разработка критерия развития облаков и осадков с использованием радиотеплолокационных данных и радиолокационной информации // Труды ГГО. 2008. Вып. 557. С. 119—132.
16. *Готюр И.А., Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Караваев Д.М., Коровин Е.А., Кулешов Ю.В., Чернышев С.В., Щукин Г.Г.* Состояние и перспективы создания геофизической обсерватории ВКА имени А.Ф. Можайского // Труды ВКА. 2018. Вып. 662. С. 184—187.
17. *Степаненко В.Д.* Вероятность и интенсивность обледенения самолетов. СПб.: ГГО, 1994. 99 с.
18. *Politovich M.K.* Aircraft icing caused by large supercooled droplets // J. Appl. Meteorology and climatology. 1989. V. 28, No. 9. P. 856—868. doi: 10.1175/1520-0450(1989)028<0856-AICBLS>2.0.CO;2.
19. *Bernstein B.C., Mcdonough F., Politovich M.K., Brown B.G., Ratvasky T.P., Miller D.R.* Current icing potential: algorithm description and comparison with aircraft observations // Journal of applied meteorology. 2005. V. 44, No. 7. P. 969—986. doi: 10.1175/JAM2246.1.
20. *Vivekanandan J., Zhang G., Politovich M. K.* An assessment of droplet size and liquid water content derived from dual-wavelength radar measurements to the application of aircraft icing detection // Journal of atmospheric and oceanic technology. 2001. V. 18, No. 11. P. 1787—1988. doi: 10.1175/1520-0426(2001)018<1787:AAODSA>2.O.CO;2.
21. *Щукин Г.Г., Степаненко В.Д., Егоров А.Д., Гальперин С.М., Караваев Д.М.* Радиофизические исследования атмосферы и подстилающей поверхности // Юбилейный сборник «Современные исследования Главной геофизической обсерватории» к 150-летию со дня основания. Т. 1. СПб.: Гидрометеоиздат, 1999. С. 172—190.
22. *Быков В.Ю., Ильин Г.Н., Караваев Д.М., Щукин Г.Г.* СВЧ радиометрические измерения содержания парообразной и жидкокапельной влаги в тропосфере // Труды ВКА. 2020. Вып. 674. С. 128—132.

References

1. *Stepanenko V.D., Shchukin G.G., Bobylev L.P., Matrosov S.Ju. Radioteplolokacija v meteorologii*. Microwave radiometry in meteorology. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1987: 283 p. [In Russian].

2. *Ryzhkov A.V., Snyder J., Carlin J.T., Khain A., Pinsky M.* What polarimetric weather radars offer to cloud modelers: forward radar operators and microphysical/ thermodynamic retrievals. Atmosphere. 2020, 11 (4): 362—395. doi: 10.3390/atmos11040362.
3. *Matrosov S.Y., Schmitt C.G., Maahn M., G. de Bur.* Atmosheric ice shape estimates from polarimetric radar measurements and in situ observations. Journal of atmospheric and oceanic technology. 2017, 34 (12): 2569—2587. doi: 10.1175/JTECH-D-17-0111.1.
4. *Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Tapashanov V.O., Shapovalov A.V., Shapovalov V.A., Makuashev M.K., Kagermazov A.H., Sozaeva L.T., Tashilova A.A., Kesheva L.A. Fizika gradovyh oblakov i aktivnyh vozdejstvij na nih: sostojanie i napravlenija razvitija.* Physics of hail clouds and cloud modifications: state and directions of developments. Nalchik: Printing House, 2013: 216 p. [In Russian].
5. *Veltishchev N.F., Zhupanov V.D.* Experiments on Numerical Modelling of intense convection. Russian Meteorology and Hydrology. 2008, 33 (9): 560—569. doi: 10.3103/S1068373908090033.
6. *Shchukin G.G., Bulkin B.B.* Meteorological passive-active radar observations. Journal of Communication Technology and Electronics. 2011, 56 (5): 1064—1069. doi: 10.1134/S1064226911030089.
7. *Zhukov V.Y., Shchukin G.G.* Current Problems of Meteorological Radiolocation. Journal of Communication Technology and Electronics. 2016, 61 (10): 1069—1080. doi: 10.1134/S1064226916100235.
8. *Solheim F., Godwin J.R., Westwater E.R., Han Y., Keihm S.J., Marsh K., Ware R.* Radiometric profiling of temperature, water vapor and cloud liquid water using various inversion methods. Radio Science. 1998, 33 (2): 393—404. doi: 10.1029/97RS03656.
9. *Karavaev D.M., Shchukin G.G.* Status and prospects of application of microwave radiometry of the atmosphere. Atmospheric and Oceanic Optics. 2016, 29 (3): 308—313. doi:10.1134/S1024856016030076.
10. *Karavaev D.M., Shchukin G.G., Efremenko A.N.* Ground-based microwave radiometry for measurements of atmospheric water vapour and cloud liquid water contents. Journal of Physics: Conference Series. 1632 (2020) 012026. IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/1632/1/012026.
11. *Vylegzhanin I.S., Zhukov V.Ju., Karavaev D.M., Shchukin G.G.* Developments of passive and active methods in storm warning tasks. *Trudy VKA.* Proc. of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. 2016, 653: 146—150. [In Russian].
12. *Boreysho A.S., Ilyin M.Y., Kim A.A., Konyaev M.A., Shchukin G.G., Zhukov V.Y.* Possibility and application of all-weather lidar-radio sensing complexes. Journal of Physics: Conference Series (International Conference "Actual Trends in Radiophysics"). 1499 (2020) 012025. doi: 10.1088/1742-6596/1499/1/012025.
13. *Küchler N., Kneifel S., Löhnert U., Kolliasa P., Czekala H., Rose T.* W-band radar—radiometer system for accurate and continuous monitoring of clouds and precipitation. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2017, 34: 2375—2392. doi: 10.1175/JTECH-D-17-0019.1.
14. *Cimini D., Nelson M., Guldner J., Ware R.* Forecast indices from a ground-based microwave radiometer for operational meteorology. Atmos. Meas. Tech. 2015, 8(1): 315—333. doi: 10.5194/amt-8-315-2015.
15. *Shchukin G.G., Karavaev D.M.* Development of criteria of cloud and precipitation evolutions using microwave radiometric and radar data. *Trudy GGO.* Proc. of the MGO. 2008, 557: 119—132. [In Russian].
16. *Gotjur I.A., Denisenkov D.A., Zhukov V.Ju., Karavaev D.M., Korovin E.A., Kuleshov Ju.V., Chernyshev S.V., Shchukin G.G.* Status and prospects of creating of geophysical observatory Mozhaysky MAA. *Trudy VKA.* Proc. of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. 2018, 662: 184—187. [In Russian].
17. *Stepanenko V.D. Verojatnost' i intensivnost' obledenenija samoletov*. Probability and intensity of aircraft icing. St. Petersburg: MGO, 1994: 99 p. [In Russian].
18. *Politovich M.K.* Aircraft icing caused by large supercooled droplets. J. Appl. Meteorology and climatology. 1989, 28(9): 856—868. doi: 10.1175/1520-0450 (1989)028<0856-AICBLS>2.0.CO;2.
19. *Bernstein B.C., Mcdonough F., Politovich M.K., Brown B.G., Ratvasky T.P., Miller D.R.* Current icing potential: algorithm description and comparison with aircraft observations. Journal of applied meteorology. 2005, 44 (7): 969—986. doi: 10.1175/JAM2246.1.
20. *Vivekanandan J., Zhang G., and Politovich M.K.* An assessment of droplet size and liquid water content derived from dual-wavelength radar measurements to the application of aircraft icing detection. Journal of atmospheric and oceanic technology. 2001, 18 (11): 1787—1988. doi: 10.1175/1520-0426(2001)018<1787:AAODSA>2.O.CO;2.
21. *Shchukin G.G., Stepanenko V.D., Egorov A.D., Gal'perin S.M., Karavaev D.M.* Radiophysical research of the atmosphere and underlying surface. *Jubilejnyj sbornik "Sovremennye issledovanija Glavnoj*

geofizicheskoj observatorii" k 150-letiju so dnja osnovanija. Anniversary collection "Modern research in the Main geophysical observatory" for the 150th anniversary of the MGO foundation. St. Petersburg: Hydrometeizdat. 1999, (1): 172—190. [In Russian].
22. *Bykov V.Ju., Il'in G.N., Karavaev D.M., Shchukin G.G.* Microwave radiometric measurements of integrated water vapor and cloud liquid water contents in troposphere. *Trudy VKA.* Proc. of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. 2020, 674: 128—132. [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 18.01.2021
Принята к публикации 25.02.2021

Сведения об авторах

Караваев Дмитрий Михайлович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, dm.karavaev@mail.ru.

Щукин Георгий Георгиевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, ggshchukin@mail.ru.

Information about authors

Karavaev Dmitrii Mikhailovich, PhD (Tech. Sci.), Scientist, Mozhaisky military aerospace academia.
Shchukin Georgii Georgievich, Grand PhD (Phys and Math. Sci.), Professor, Mozhaisky military aerospace academia.