

Комплексный метод исследования и раннего предупреждения опасных явлений погоды 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, г. Санкт-Петербург, Кожевенный пер., д.41.

Представлен комплексный метод исследования и раннего предупреждения опасных явлений погоды, мощных конвективных облаков и грозовых процессов с применением радиофизических средств зондирования, в том числе пассивной и активной радиолокации. Рассмотрены критерии опасных явлений и некоторые результаты комплексных исследований атмосферы в период развития опасных явлений, связанных с мощной конвекцией, грозами и атмосферными фронтами в Ленинградской области.

Ключевые слова: СВЧ- радиометрия, пассивно-активная радиолокация, конвективные облака, гроза, атмосферный фронт, критерии опасных явлений.

Complex method of investigations and early warning dangerous of weather events with using passive and active radar

D.M. Karavaev¹, Yu.V. Kuleshov¹, A.N. Efremenko¹, G.G. Shchukin²

¹ Mozhaisky Military Aerospace Academy.

² State Research navigation-hydrographic Institute.

The possibilities of developing a comprehensive method of investigation and early warning of cloud and precipitation-related hazards, powerful convective clouds and thunderstorm with using passive and active radar are presented. The criteria and some results of comprehensive studies of atmosphere during the development of dangerous weather phenomena associated with powerful convection, thunderstorm, and the passage of atmospheric fronts in the Leningrad region, are considered.

Keywords: microwave radiometry, passive-active radar, convective clouds, thunderstorm, atmospheric front, criteria of dangerous weather phenomena.

Введение

Комплексные исследования атмосферы актуальны в связи с необходимостью детального исследования условий развития опасных явлений, связанных с мощной конвекцией, с учетом сложной взаимосвязи микрофизических, термодинамических, атмосферно-электрических характеристик облаков, совершенствования методов сверхкраткосрочного прогнозирования опасных явлений погоды, гроз, ливней, снегопадов, обледенения [1-3]. Очевидно, что для совершенствования методов исследования связанных с облаками опасных явлений погоды перспективно применение комплексных радиофизических методов и средств зондирования облачной атмосферы, в том числе методов и средств активной и пассивной (СВЧ- радиометрии), пассивно-активной радиолокации [4,5] применяются в метеорологии для влажностного и температурного зондирования атмосферы, позволяют определять характеристики влагосодержания атмосферы, содержание жидкокапельной влаги в переохлажденной

части конвективных облаков. Кроме этого, развитие экспериментальных комплексных исследований имеет значение для апробации численных моделей атмосферы и грозо-градоопасных облаков. Целью работы ставится формирование (уточнение) комплекса радиолокационных критериев опасных явлений погоды, обобщение результатов комплексных исследований атмосферы, в том числе, в период связанных с облаками опасных явлений погоды для задач раннего предупреждения опасных явлений погоды.

Комплексные методы исследования опасных явлений

Возможность совершенствования методов диагноза и раннего предупреждения связанных с мощными конвективными облаками опасных явлений погоды, включая, электрически опасных зон в облаках связывается с развитием методов, технологий прогнозирования на основе комплексного использования разнородной метеорологической информации, получаемой различными радиофизическими средствами. Особую роль играет применение средств активной и пассивной радиолокации. В первую очередь в комплексе радиофизических средств рассматриваются следующие:

- средства метеорологической некогерентной или доплеровской многопараметрической радиолокации, в том числе пассивно-активной радиолокации,
- средства атмосферно-электрических измерений (ПНП) и грозопеленгации (одиночные ГПД или сетевые),
- наземные средства СВЧ-радиометрии (одиночные СВЧ-радиометры или сетевые) для определения влагозапаса атмосферы, профилей температуры и влажности воздуха в атмосфере, водозапаса облаков, мониторинга термодинамического состояния атмосферы,
- средства приема спутниковой информации (в первую очередь данных температурно-влажностного зондирования атмосферы и характеристик облачности).

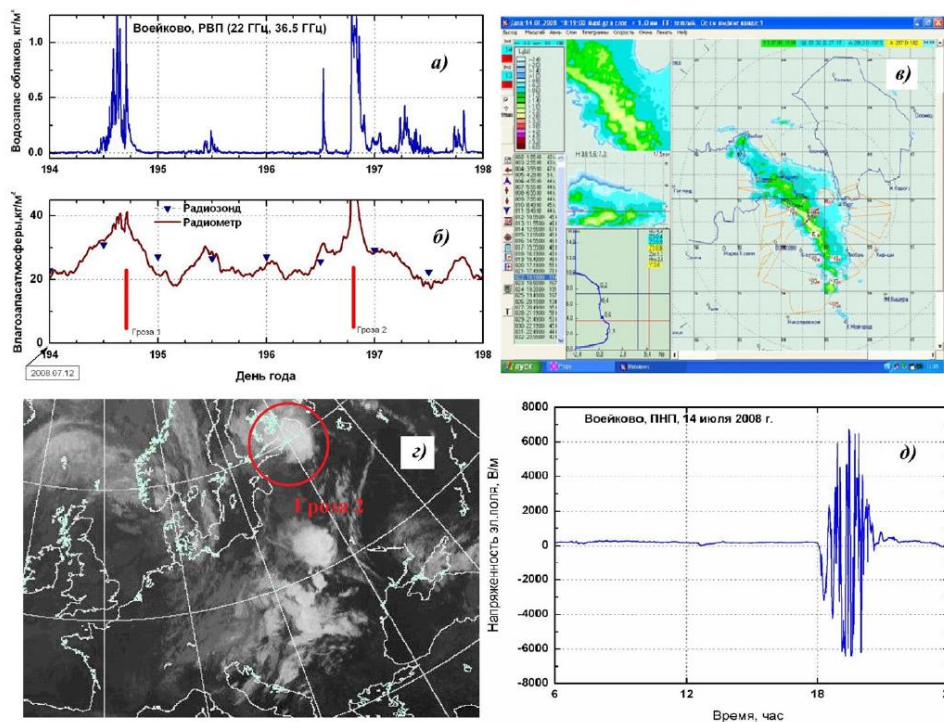


Рис.1. Пример комплексных исследований мощных конвективных облаков, гроз в Ленинградской области: а)-влагозапас атмосферы по данным СВЧ-радиометра, б)-водозапас облаков, в) - данные МРЛ-5, г) - изображение ИСЗ, д) электрическое поле

Пример комплексных исследований грозового фронта в Ленинградской области с применением средств активной и пассивной радиолокации приведен на рис.1. Одновременное применение различных технических средств позволяет осуществлять контроль состояния природной среды с высоким пространственно-временным разрешением, определять особенности микрофизических характеристик областей мощных конвективных облаков, в которых происходят генерация электрических зарядов, появление молниевых разрядов (МР). Кроме того, комплексные наблюдения позволяют рассматривать относительное расположение зон молниевой активности, осадков, турбулентности, повышенного содержания переохлажденной влаги в облаках. Комплексирование различных средств, средств пассивной и активной радиолокации необходимо для исследования особенностей фазового состава различных зон облаков. Применение комплексной системы контроля среды на всех стадиях эволюции грозового облака (рост, зрелая стадия, диссипация) с применением средств метеорологической радиолокации, атмосферно-электрических измерений ПНП и экспериментальной сети ГПД, СВЧ-радиометров, ИСЗ и других средств должны определить интервал времени, характеризующий раннее или более позднее установление активной стадии грозовых облаков (стадии, когда в облаке возникают любые электрические разряды) с помощью одиночного грозопеленгатора или сети грозопеленгаторов относительно обнаружения этой стадии МРЛ-5 (ДМРЛ-С) с помощью косвенного радиолокационного критерия развития грозы, определить взаимное расположение координат МР с полем радиолокационной отражаемости грозовых облаков, зонами осадков.

Полученные экспериментальные данные по комплексному исследованию опасных явлений погоды в Ленинградской области позволяют сделать следующие выводы:

- высокое влагосодержание атмосферы является необходимым, но недостаточным условием развития мощной конвекции в атмосфере. При относительно низких влагозапасах атмосферы (менее критических значений) развитие активных грозовых процессов не наблюдалось. Применение наземных СВЧ-радиометров (частота 22.2 и 36.5 ГГц) для определения влагозапаса атмосферы над пунктом зондирования перспективно для выявления условий развития мощной конвекции (в радиусе до 50 км). Вариации влагозапаса атмосферы в окрестности грозового облака могут значительно превышать значения, характерные для невозмущенной атмосферы,

- двухчастотный радиометрический метод на частотах около 9,5 и 36,5 ГГц является предпочтительным для определения водозапаса облаков в широком диапазоне вариаций водности, в том числе в переохлажденной части конвективных облаков. 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 минут. Выявление зон повышенного содержания жидкокапельной влаги в переохлажденной части конвективного облака может свидетельствовать об усилении процессов электризации в облаках. Экспериментальные данные указывают на то, что зоны интенсивной электризации, по-видимому, содержат в основном ледяные облачные частицы,

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

- исследования мезомасштабных вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков показали, что в области теплых атмосферных фронтов циклонов рост влагозапаса атмосферы обычно предшествовал росту водозапаса облаков. СВЧ-

радиометрическая информация позволяет уточнить пространственно-временную структуру атмосферных фронтов,

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

Формирование комплекса критериев опасных явлений

В состав технических средств Геофизической обсерватории в пос. Лехтуси входят средства радиолокации, в том числе метеорологический радиолокатор МРЛ-5 (длина волны 3.2 и 11 см), станция приема спутниковой информации, приборы напряженности электрического поля, грозопеленгаторы, автоматизированная метеорологическая станция, комплекс автоматизированного сбора и обработки данных метеорологических наблюдений [6]. Комплексование таких радиофизических средств дистанционного зондирования, стандартных средств метеорологических измерений, радиозондирования атмосферы, позволяет проводить оперативный контроль параметров среды для получения физических закономерностей в процессах возникновения опасных явлений погоды, в том числе предгрозового состояния облаков. Одной из задач является усовершенствование комплексных радиолокационных критериев опасных явлений погоды, таких как грозы и ливни, базирующихся на результатах одновременных наблюдений средствами радиолокации, грозопеленгации, приборов напряженности электрического поля, СВЧ- радиометров и других средств наблюдений.

Комплексные методы контроля состояния атмосферы и прогнозирования опасных явлений погоды основаны на применении физико-статистических методов, гидродинамического моделирования атмосферы, и формировании различных признаков и критериев развития опасных явлений, среди них:

1. Прямые методы регистрации молниевых разрядов на основе данных пассивных систем мониторинга грозовой активности, фиксирующих время, координаты и другие характеристики молниевых разрядов, а также дополнительные методы анализа данных датчиков напряженности электрического поля ПНП [7]. В экспериментах показано, что ПНП является эффективным средством выявления в ближней зоне (до 30...40 км) электрически опасных облаков, а также позволяет наблюдать изменения вертикальной составляющей электрического поля при возникновении МР. Вероятность обнаружения МР, особенно внутриоблачных, у ПНП, как правило, ниже в сравнении с грозопеленгаторами.

2. Косвенные радиолокационные критерии грозоопасности [8-10], в том числе на основе данных доплеровской поляризованной радиолокации для определения интенсивности осадков, восстановления микрофизических характеристик облаков, вертикальных воздушных потоков. Известный радиолокационный критерий гроз Y определяется следующим выражением:

$$Y > Y_{\text{кр гроза}} = H_{-22} \log Z_{3.\text{мин}}, \quad (1)$$

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. При этом распознавание гроз проводится с некоторой вероятностью (90% при $Y > Y_{\text{кр}} + 14$, (70 – 90)% при $Y > Y_{\text{кр}} + 6$, $\leq 70\%$ при $Y > Y_{\text{кр}}$). Признаками образования электроактивных зон (ЭАЗ) в облаках для условий Ленинградской области могут быть следующие параметры облака: температура на верхней границе облака находится в интервале от минус 15° до минус 22° С, радиолокационная отражаемость облака lgZ превышает 2.5 дБ, мощность облака составляет 4.8 - 6.5 км, мощность переохлажденной части облака (той части облака, которая находится выше нулевой изотермы) составляет 2.0 - 3.5 км, высота верхней границы облака составляет 5.5 - 7.2

км. Ряд дополнительных параметров, получаемых современным доплеровским поляризационным радиолокатором ДМРЛ-С может использоваться для улучшения методов распознавания грозовых облаков, при этом, как показывают современные наблюдения различных лабораторий, измерения объёмов облака, занимаемых крупой, имеет важное значение для исследования процессов электризации и инициации грозовых разрядов.

3. Критерии развития ЭАЗ зон в облаках на основе данных пассивно-активной радиолокации о жидкокапельной водности в переохлажденной части облака. Введение пассивного канала в метеорологический радиолокатор позволяет определять водозапас конвективных облаков и интенсивность осадков, профили жидкокапельной водности облаков в направлении визирования, оценку пространственного распределения мелкокапельной и крупнокапельной фракций водозапаса облачной системы. Из экспериментов следует, что на стадии диссипации грозового облака обычно отмечаются низкие значения содержания жидкокапельной влаги в переохлажденной части конвективного облака, однако, на предгрозовой стадии обнаружение значительного количества жидкокапельной водности в переохлажденной части облака является признаком интенсивного развития ЭАЗ. Пример пространственного распределения водозапаса конвективного облака приводится на рис.2.

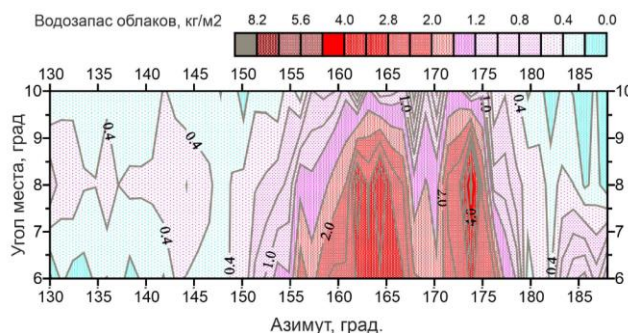


Рис. 2. Пример пространственного распределения водозапаса облаков по данным СВЧ-радиометра 9.5 и 36 ГГц

4. Радиолокационно-радиометрические критерии градоопасности [11]. Область локализации сухого града на картах радиолокационно-радиометрического зондирования облака может расцениваться как область преимущественно рассеивающей среды, а область локализации жидкокапельных осадков и обводненного града - как преимущественно поглощающая среда, или как частично поглощающая и частично рассеивающая среда при наличии крупнокапельной фракции в облаках. Критерий градоопасности облака Cr^R определяется по соотношению [11]:

$$Cr^R(\lambda_{\text{мрл}}, \lambda_{\text{рi}}) = \frac{Z(\lambda_{\text{мрл}})}{T_{\text{я}}(\lambda_{\text{рi}})}, \quad (2)$$

где Z - радиолокационная отражаемость в см^{-1} , $T_{\text{я}}(\lambda_i)$ – радиояркостьная температура, измеренная радиометром при длине волны $\lambda_{\text{рi}}$.

5. Различные индексы неустойчивости, характеризующие состояние атмосферы [12]. Эти индексы неустойчивости атмосферы достигают критических значений, когда в атмосфере создаются благоприятные условия для развития глубокой конвекции, вызывающей опасные явления погоды: грозы, град, смерчи и др. Широко используются индекс KI (критерий Вайтинга), CAPE (Convective Available Potential Energy), Total total index, SWEAT index и др. Индексы получаются по данным аэрологического зондирования атмосферы, наземного температурно-влажностного СВЧ-радиометрического зондирования, спутниковым данным температурно-влажностного

зондирования или по данным гидродинамического моделирования. Например, в случае применения метода Вайтинга, КИ индекс определяется по известному соотношению:

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700}), \quad (3)$$

где T_{Pi} – температура воздуха на изобарической поверхности Pi ; T_{dPi} – температура точки росы на изобарической поверхности Pi . Для северо-западного района РФ при $K > 20-25$ возможно развитие грозовых процессов. В численном эксперименте по исследованию возможностей мезомасштабной модели для прогноза опасных явлений погоды [12], моделировалась грозовая ситуация, наблюдавшаяся в Ленинградской области (рис.3). В результате гидродинамического моделирования метеорологических параметров атмосферы получены поля распределения КИ при использовании различных параметризаций конвекции.

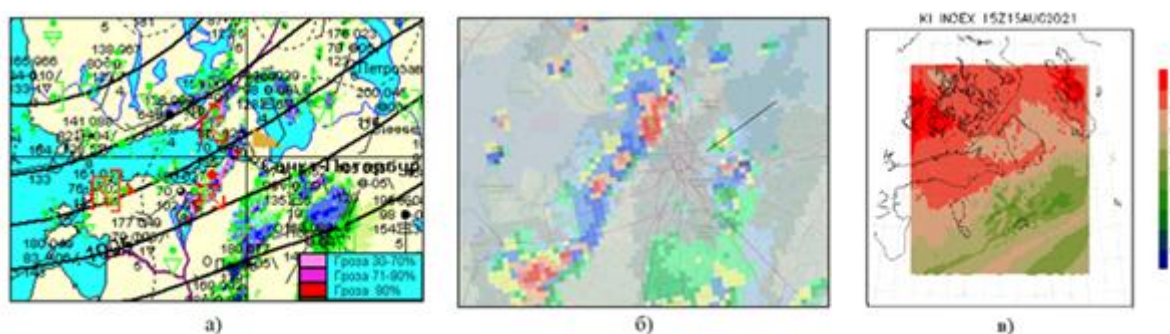


Рис.3. Фрагмент комплексной карты погоды, 15 ч. 00мин 15.08.2021(а); карта отражаемости ДМРЛ-С пос. Воейково, 15 ч 30 мин (б); распределение К-индекса по результатам гидродинамического моделирования [12]

На отечественных КА серии «Метеор-М» для решения задач температурно-влажностного зондирования облачной атмосферы используются приборы видимого, ИК-, СВЧ-диапазонов: многозональное устройство малого разрешения МСУ-МР (длина волны от 0.5 мкм до 12.5 мкм) используется для определения, характеристик облаков и поверхности (при отсутствии облачности); инфракрасные Фурье спектрометры - зондировщики ИКФС (спектральный диапазон – 3,6 - 15,5 мкм, спектральное разрешение $0,35 \div 0,55 \text{ см}^{-1}$) используются для определения вертикальных профилей температуры и влажности воздуха при безоблачной атмосфере; СВЧ-радиометры МТВЗА-ГЯ (спектральный диапазон от 10.65 до 190 ГГц) используются для определения вертикальных профилей температуры и влажности воздуха, а также водозапаса облаков и влагозапаса атмосферы. Развиваются комплексные методы решения задачи восстановления профилей температуры и влажности по данным зондирования атмосферы в различных спектральных диапазонах.

6. СВЧ-радиометрический критерий опасных явлений, связанных с развитием конвективных облаков, гроз, ливней, на основе данных о влагозапасе атмосферы [3]. Критерий ($\text{Vapor-index} = VI$) опасных явлений можно использовать для предупреждения предгрозового состояния, записывается в виде:

$$VI(t) = c_0 + c_1 Q(t) + c_2 \Delta Q(t, t - dt), \quad (4)$$

где c_i - коэффициенты регрессии; $Q(t)$ - влагозапас атмосферы, t - время; $\Delta Q(t, t - dt)$ - изменение влагозапаса атмосферы за период dt ,

7. Критерии на основе обработки снимков геостационарных и полярно-орбитальных космических аппаратов. Численные эксперименты показали, что вероятность автоматического распознавания вершин облаков Сб с использованием данных геостационарного космического аппарата может составлять 50-70%. Пример фрагментов снимков ИСЗ представлен на рис.4.

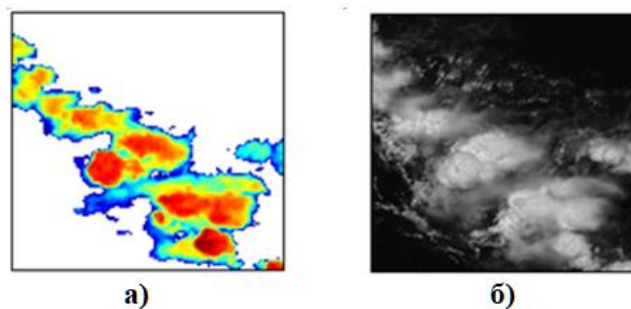


Рис.4. Фрагмент снимка геостационарного ИСЗ: а) – 11,2 мкм; б) – 0,64 мкм

Одним из важнейших в исследованиях грозовых облаков остается вопрос о роли различных форм льда и воды в возникновении электрически активных зон в облаках на предгрозовой стадии. Для более глубокого понимания взаимодействия микрофизических, термодинамических, атмосферно-электрических процессов на различных стадиях формирования грозовых облаков актуально применение пассивно-активного метода зондирования конвективных облаков, и пассивно-активных комплексов, работающих в X-, K- диапазонах частот.

Определенные перспективы исследований опасных явлений связаны с применением спутниковых систем мониторинга грозовой активности, основанных на анализе излучения МР в ближнем инфракрасном диапазоне с помощью детекторов вспышек молниевых разрядов. Перспективные детекторы молниевых разрядов: LI на европейских КА МТИ-12,-13,-14, LMI на китайских КА FengYang-4D,-4F, LMX на американских КА GeoXO, а также LM на отечественных КА серии Электро-М.

Выводы

Комплексирование методов пассивной и активной радиолокации является перспективным для совершенствования методов исследования и сверх-краткосрочного прогнозирования опасных явлений погоды, связанных с развитием мощных конвективных облаков и грозовых процессов. Усовершенствован метод раннего предупреждения мощных конвективных облаков, гроз на основе комплексного применения средств СВЧ-радиометрии и метеорологической радиолокации, предложен СВЧ-радиометрический критерий развития опасных явлений погоды, связанных с облаками. Получены, с применением наземных СВЧ-радиометров и радиолокации, результаты экспериментальных исследований параметров атмосферы, характеристик облаков при различных метеорологических условиях, в том числе при прохождении атмосферных фронтов циклонов и развитии мощных конвективных облаков, гроз в Ленинградской области.

Литература

1. Караваев Д.М., Кулешов Ю.В., Ефременко А.Н., Щукин Г.Г. Комплексные методы исследования и раннего предупреждения гроз на основе применения средств активной и пассивной радиолокации // Всероссийские Арmandовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской открытой научной конференции. – Муром: МИ ВлГУ. – 2025. – С.187-191.
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 // Сборник докладов Всероссийской открытой конференции по исследованиям атмосферных и склоновых

стихийных явлений в условиях современного изменения климата. – Нальчик, 07-11 октября 2024 г. ВГИ. – 2024. – С.72-75.

3. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Совершенствование методов раннего предупреждения развития грозовых 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.

4. Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Ленинград: Гидрометеиздат. – 1987. – 253 с.

5. Степаненко В.Д., Гальперин С.М. Радиотехнические методы исследования гроз. Л.: Гидрометеиздат. – 1983. – 204с.

6. Готюр И.А., Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Караваев Д.М., Коровин Е.А., Кулешов Ю.В., С.В. Чернышев, Г.Г. Щукин. Состояние и перспективы создания Геофизической обсерватории Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. –2018. – Вып.662. – С.184-187.

7. Коровин Е.А., Готюр И.А., Львова М.В., Занюков В.В., Юсупов И.Е., Щукин Г.Г. Обнаружение молниевых разрядов с использованием приборов напряженности электрического поля / Всероссийские открытые Арmandовские чтения: Материалы Всероссийской научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн», Муром, 02 – 05 июня 2025. – Муром: МИВлГУ. – 2025. – С.248 - 254.

8. 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.

9. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Радиолокационное распознавание вертикальных воздушных потоков // Распространение радиоволн: труды XXIX Всероссийской открытой научной конференции (Казань, 30 июня-04 июля 2025 года) / Казань: КФУ. – 2025. – С.417-419.

10. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Геккиева Ж.М., Михайловский Ю.П., Синькевич А.А., Торопова М.Л. О связях процессов грозо- и градообразования в конвективных облаках Северного Кавказа // Труды XXIX Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн», 30 июня-04 июля 2025 года, Казань. – 2025. – С.388-391.

11. Абшаев М. Т., Кармов Х. Н. Пассивно-активный метод обнаружения градовых очагов в кучево-дождевых облаках // Труды ВГИ, –1976. – Вып.33. – С.43-56.

12. Анискина О.Г., Давыдов С.А., Камнев С.М., Толстоброва Н.Б. Прогнозирование грозовой деятельности на основе гидродинамического моделирования // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. – 2025. – Вып.697. – С.93-104.