

К 85-ЛЕТИЮ
ДМИТРИЯ СЕРГЕЕВИЧА ЛУКИНА

УДК 551.51

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО
РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ВЛАЖНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
АТМОСФЕРЫ ДЛЯ РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ
ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ

© 2023 г. Д. М. Караваев^{а, *}, Ю. В. Кулешов^а, Г. Г. Щукин^{а, б}

^а Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,

Ждановская ул., 13, Санкт-Петербург, 197198 Российская Федерация

^б Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,
ул. Орловская, 23, Муром, 602264 Российская Федерация

*E-mail: vka@mil.ru

Поступила в редакцию 11.02.2023 г.

После доработки 31.03.2023 г.

Принята к публикации 05.04.2023 г.

Методом наземной СВЧ-радиометрии исследованы характеристики влагосодержания атмосферы в период развития связанных с облаками опасных явлений погоды, осадков, гроз. На основе комплексных радиофизических исследований атмосферы, проведенных в Ленинградской области, показана возможность совершенствования методов раннего предупреждения опасных явлений погоды и диагностики атмосферных фронтов с привлечением оперативной СВЧ-радиометрической информации.

DOI: 10.31857/S0033849423060050, EDN: XLUSVS

ВВЕДЕНИЕ

Применение методов СВЧ-радиометрии атмосферы имеет актуальное значение в задачах метеорологии для совершенствования раннего предупреждения развития связанных с облаками опасных атмосферных явлений погоды, грозовых процессов, ливней, снегопадов и др. Известно, что наземные СВЧ-радиометры позволяют получать важную для задач прогнозирования информацию о метеорологических параметрах атмосферы (влагозапас атмосферы, влагозапас облаков, профили температуры и влажности воздуха) практически в режиме непрерывных измерений с высоким пространственным разрешением [1–10]. Эти преимущества особенно проявляются в условиях наблюдения быстропротекающих процессов в атмосфере, когда СВЧ-радиометрическая информация может существенно дополнять данные стандартных метеорологических наблюдений, аэрологического зондирования атмосферы [11–14].

Ранее в работах [1, 10–16] рассматривались вопросы применения методов и средств наземной СВЧ-радиометрии для влажностного зондирования атмосферы. В данной работе эти исследования обобщены и продолжены с целью применения методов наземной СВЧ-радиометрии в комплексных исследованиях атмосферы для совершенствования методов раннего предупреждения развития

связанных с облаками опасных явлений, уточнения структуры атмосферных фронтов циклонов [17–19].

1. МЕТОД И ЗАДАЧИ СВЧ-РАДИОМЕТРИИ

Известно, что метод СВЧ-радиометрии позволяет определять характеристики влагосодержания атмосферы (влагозапас атмосферы и влагозапас облаков) по измерениям характеристик собственного нисходящего радиотеплового излучения атмосферы [1]. На практике применяли несколько различных подходов.

1.1. Определение влагозапаса атмосферы и влагозапаса облаков

В случае наблюдения малооблачной атмосферы (не содержащей осадков) влагозапас атмосферы (Q) и влагозапас облаков (W) определяют по результатам измерений характеристик радиотеплового излучения с помощью регрессионных уравнений [1, 10, 15]:

$$\begin{aligned} Q &= a_0 + a_1\tau(f_1) + a_2\tau(f_2), \\ W &= b_0 + b_1\tau(f_1) + b_2\tau(f_2), \end{aligned} \quad (1)$$

где a_j, b_j – коэффициенты регрессии, полученные по данным радиозондирования атмосферы и

эмпирическим моделям облаков; $\tau(f_k)$ – оптическая толщина атмосферы при частоте f_k . Оптическую толщину атмосферы определяют по измеряемой радиояркой температуре атмосферы [1]. При этом измерения радиояркой температуры атмосферы проводят на частотах вблизи центра линии молекулярного поглощения водяного пара 22.235 ГГц и в окне прозрачности атмосферы 30...38 ГГц. По теоретическим оценкам погрешность определения влагзапаса атмосферы зависит от точности измерения радиояркой температуры и определения оптической толщины атмосферы [1]. Погрешность определения водозапаса облаков зависит от неопределенности оценивания температуры облаков и может составлять 20...30%. Кроме того, уравнения (1) некорректно использовать при наличии осадков при нарушении приближения рэлеевского поглощения в облаках.

В экспериментах данной работы применяли двухчастотный вариант СВЧ-радиометра с центральными частотами каналов около 20.7...22.23 и 31...36 ГГц. Полоса усиления радиометрических приемников составляла 200...500 МГц. Были использованы малошумящие антенны с шириной луча 7...9 град по уровню половинной мощности. Дискретность измерений выбирали в интервале 5...1000 с. Погрешность определения влагзапаса атмосферы составляла около 0.5...1 кг/м², водозапаса облаков около 0.03 кг/м².

1.2. СВЧ-радиометрические исследования конвективных облаков

Метод наземной СВЧ-радиометрии эффективен для исследования водозапаса (содержания жидкокапельной влаги) конвективных облаков [1, 13, 15]. При исследовании конвективных облаков на различных стадиях наиболее информативные участки спектра радиотеплового излучения находятся в области малого ослабления излучения 6...14 ГГц и “окнах” прозрачности атмосферы при частотах 30...37 и 75...95 ГГц. Погрешность определения водозапаса конвективных облаков оценивается величиной около 20...40% [1].

При экспериментальных исследованиях водозапаса конвективных облаков использовали СВЧ-радиометры, работающие в диапазонах частот 9.5 и 36.5 ГГц. Полоса усиления радиометрических приемников составляла 250...500 МГц. Использовали полноповоротные антенны с шириной диаграммы направленности по уровню половинной мощности менее 1 град, что позволяло исследовать пространственное распределение собственного излучения конвективных облаков с достаточно высоким пространственным разрешением. Методика исследований конвективных облаков состояла в получении последовательности радио-

тепловых карт переохлажденной части конвективных облаков и определении водозапаса по направлению луча антенны. На рис. 1а–1г приведены результаты СВЧ-радиометрического зондирования мощного конвективного облака и определения водозапаса облака вдоль луча антенны $W(\varphi, \theta)$, где φ – азимут, θ – угол места антенны (пос. Тургош Ленинградской обл.). Представленные четыре карты водозапаса облака, полученные в период времени с 18 ч 42 мин до 19 ч 02 мин, демонстрируют эволюцию пространственного распределения водозапаса конвективного облака на стадии его диссипации.

Метод комплексного СВЧ-радиометрического и радиолокационного зондирования облаков (пассивно-активный метод) применяется для определения профилей водности, средней водности конвективных облаков, водозапаса переохлажденной части конвективных облаков и интенсивности осадков [1, 10, 13, 20]. Реализация метода направлена на повышение точности определения водности облаков и интенсивности осадков (по сравнению с методом классической метеорологической радиолокации). Вариант современной реализации метеорологического радиолокатора со встроенным радиометром на базе современной ДМРЛС был рассмотрен в [21].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1. СВЧ-радиометрический критерий опасных явлений

Комплексные экспериментальные исследования мощных конвективных облаков, грозовых процессов были основаны на применении средств радиолокации, атмосферно-электрических измерений и СВЧ-радиометров и направлены на изучение сложных процессов, происходящих при развитии связанных с облаками опасных явлений, взаимосвязи микрофизических, динамических и электрических процессов в облаках [11, 13, 14, 22–26]. Метеорологические радиолокаторы (длина волны 8 мм, 3.2 и 10 см) применялись для обнаружения частиц облаков и осадков. Для детектирования ионизированных каналов молний применялись радиолокаторы с длиной волны 11, 35 и 200 см, а также осуществлялась регистрация электромагнитного излучения в диапазоне частот 0.4...60 и 150 МГц. Влагзапас атмосферы и водозапас облаков определяли с помощью СВЧ-радиометров (22 и 36 ГГц). Сканирующие СВЧ-радиометры, работающие в диапазоне частот 9.5 и 36.5 ГГц, использовались совместно с радиолокатором для детального исследования содержания жидкокапельной влаги в переохлажденной части конвективных облаков.

Одновременное использование перечисленных технических средств позволяет исследовать

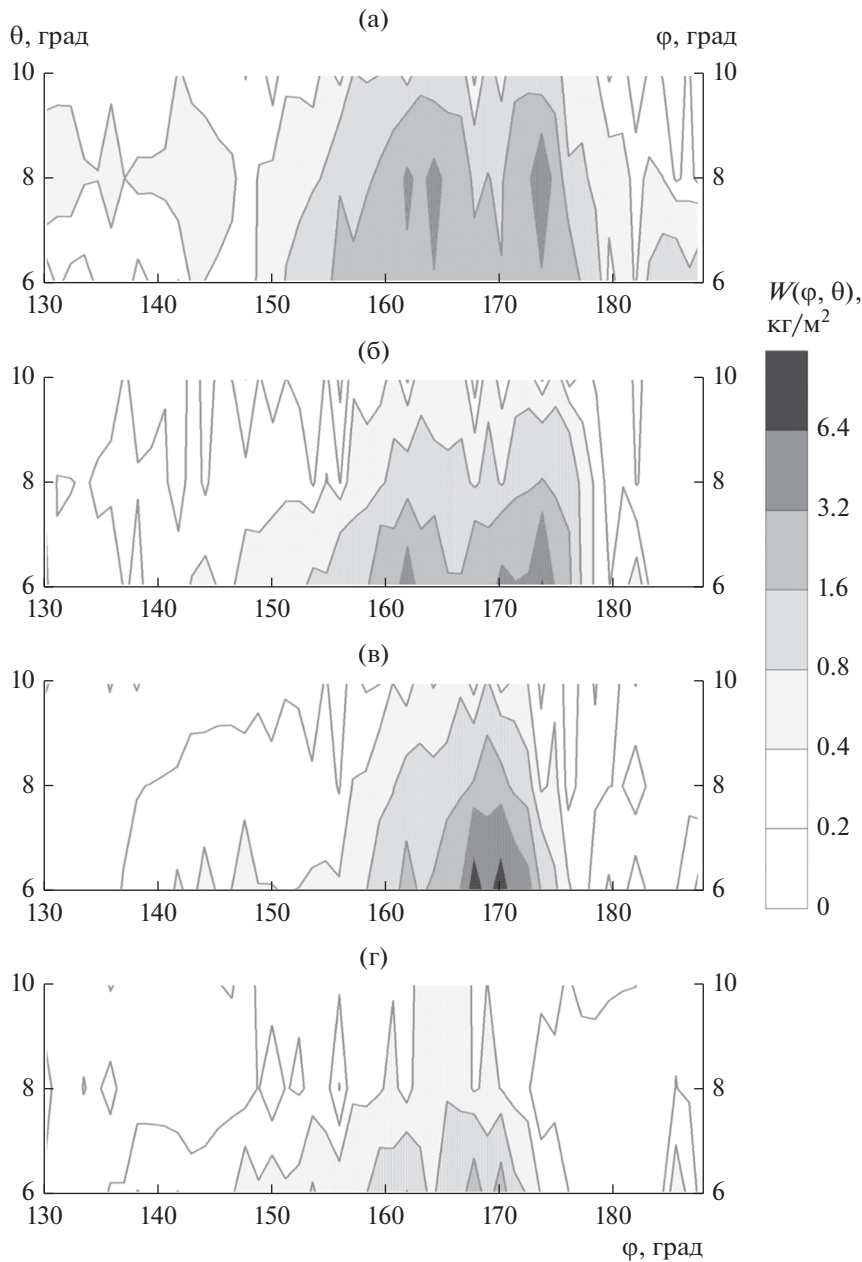


Рис. 1. Карты водозапаса конвективного облака, полученные СВЧ-радиометром в пос. Тургошь Ленинградской обл. в разные периоды времени: 18 ч 42 мин (а), 18 ч 49 мин (б), 18 ч 56 мин (в) и 19 ч 02 мин (г).

микрофизические характеристики областей мощных конвективных облаков, в которых происходят генерация электрических зарядов, их разделение и появление сильнооточных разрядов молний. Кроме того, такие комплексные наблюдения позволяют рассматривать относительное расположение зон молниевой активности, осадков, турбулентности, повышенного содержания переохлажденной влаги в облаках, особенности фазового состава облаков.

По результатам предыдущих исследований параметров атмосферы, конвективных облаков,

грозовых процессов с применением средств СВЧ-радиометрии и радиолокации и можно сделать следующие выводы:

- полученные с помощью двухчастотного радиометра 22 и 36 ГГц данные о водозапасе атмосферы согласуются с данными аэрологического зондирования атмосферы (СКО при водозапасах атмосферы в интервале 4...45 кг/м³ составляет около 1 кг/м³);

- полученные с помощью двухчастотного радиометра 22 и 36 ГГц данные о водозапасах обла-

ков слоистых форм согласуются с соответствующими оценками по эмпирическим моделям водности облаков, а также с данными спутникового зондирования (для экспериментов, выполненных с борта научно-исследовательского судна погоды над океаном);

- пространственно-временное распределение водности мощного конвективного облака по данным СВЧ-радиометрических не соответствует распределению радиолокационной отражаемости;

- полученные при комплексных радиолокационно-радиометрических исследованиях мощных конвективных (грозовых) облаков данные СВЧ-радиометров (центральные частоты 9.5 и 36 ГГц) указывают на возможность существования локальных зон переохлажденной влаги в верхней части мощного конвективного облака на высотах 6...9 км с характерным пространственным размером 1...2 км;

- вариации влагозапаса атмосферы (по данным двухчастотного СВЧ-радиометра 22 и 36 ГГц) в окрестности грозового облака могут значительно превышать значения, характерные для невозмущенной атмосферы.

Эксперименты показали возможность использования оперативных данных о влагозапасе атмосферы для раннего предупреждения развития мощных конвективных облаков и грозовых процессов [25, 26]. На основе анализа данных наземного СВЧ-радиометра о влагозапасе атмосферы и радиолокационной информации предложен СВЧ-радиометрический критерий развития мощных конвективных облаков, гроз. В качестве предикторов использовались значения влагозапаса атмосферы и его изменения во времени, которые определяли по данным двухчастотного микроволнового радиометра (при частотах около 22.2 и 36.5 ГГц). Для оценивания прогностического критерия использовали данные СВЧ-радиометра по влагозапасу атмосферы, а критерий определяли из соотношения:

$$kr = c_0 + c_1Q + c_2\Delta Q(t), \quad (2)$$

где c_i – коэффициенты регрессии; $\Delta Q(t)$ – изменение влагозапаса атмосферы за период времени t . Предварительное тестирование критерия было проведено в п. Воейково Ленинградской обл. в теплый период года с применением радиолокатора МРЛ-5 для распознавания мощных конвективных облаков, гроз, ливней. Получено, что заблаговременность прогноза опасных явлений может составлять 1...12 ч, а оправдываемость составляет около 76%.

Дальнейшее совершенствование метода раннего предупреждения развития грозовых процессов определяется применением комплексных методов радиолокации, СВЧ-радиометрии и атмосферно-электрических измерений для определения пара-

метров атмосферы и характеристик облаков, осадков. Метод включает: а) мониторинг состояния атмосферы с применением СВЧ-радиометров влажностного (температурно-влажностного) зондирования атмосферы с целью заблаговременного выявления благоприятных условий для развития мощных конвективных облаков и грозовых процессов; б) выявление зон повышенного содержания жидкокапельной влаги в переохлажденной части облака с помощью СВЧ-радиометров, работающих совместно с радиолокатором.

2.2. СВЧ-радиометрия атмосферных фронтов

Применение наземных двухчастотных СВЧ-радиометров (22 и 36 ГГц) позволяет исследовать синоптические, мезомасштабные а также микро-масштабные вариации влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков [12, 16–19, 24]. В комплексных экспериментах проводился анализ данных наземных двухчастотных СВЧ-радиометров (22 и 36 ГГц) и фронтологический анализ обстановки (с привлечением данных спутниковых наблюдений облаков) с целью исследования особенностей мезомасштабной структуры атмосферных фронтов циклонов. Эксперименты показали возможность для оперативного уточнения синоптической обстановки и совершенствования методов раннего предупреждения развития опасных явлений погоды при использовании наземных СВЧ-радиометров влажностного зондирования атмосферы.

Наземные СВЧ-радиометры влажностного зондирования атмосферы позволяют выявить характерные особенности временной изменчивости влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков при прохождении атмосферных фронтов:

- в области атмосферных фронтов регистрировались значительные изменения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, которые уверенно регистрируются СВЧ-радиометрами;

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

В экспериментах, проводимых в обсерватории п. Лехтуси в 2018 г. был использован двухчастотный (20.7 и 31.4 ГГц) СВЧ-радиометр водяного пара, разработанный в Институте прикладной астрономии РАН [12]. Для определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков измерения радиоярких температур в зенитном направлении проводились с дискретностью 5 с. В качестве примера на рис. 2 показан временной ход водозапаса облаков и влагозапаса атмосферы в зените при прохождении атмосферных фронтов 10–12 июня 2018 г. в п. Лехтуси Ленинградской обл. Как следует из рис. 2, СВЧ-радиометрические данные по влагозапасу атмосферы согласуются с расчетны-

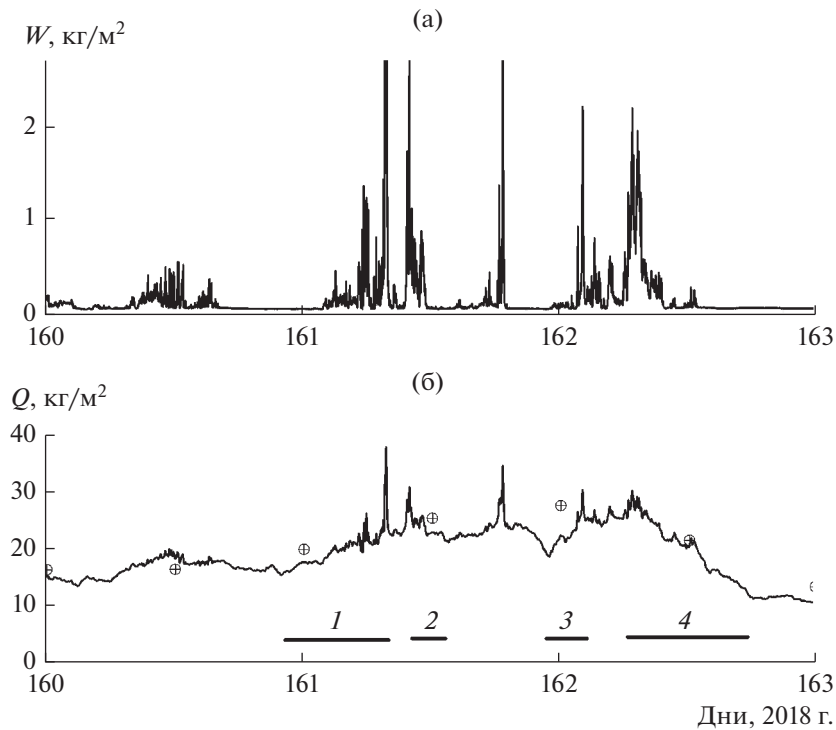


Рис. 2. Временной ход водозапаса облаков (а) и влагозапаса атмосферы (б) при прохождении атмосферных фронтов 10–12 июня 2018 г. в пос. Лехтуси Ленинградской обл. (сплошная линия – данные СВЧ-радиометра со 160 по 163-й день 2018 г.; кружки – данные аэрологического зондирования в пос. Воейково; 1 и 3 – время прохождения теплых фронтов; 2 и 4 – холодных фронтов).

ми данными аэрологического зондирования, полученными в п. Воейково. Из рисунка видно, что влагозапас атмосферы в период с 10 по 12 июня изменялся в интервале от 10 до 30 кг/м². Значения водозапаса облаков (в зените) 11 и 12 июня достигали значений 2 кг/м² и более. Как показал синоптический анализ, такие изменения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков были обусловлены последовательным прохождением 10–12 июня 2018 г. двух циклонов и связанных с ними атмосферных фронтов. Периоды прохождения теплых фронтов на рис. 2 соответствуют областям 1 и 3. Периоды прохождения холодных атмосферных фронтов на рис. 2 соответствуют областям 2 и 4.

3. ПЕРСПЕКТИВЫ

Дальнейшие комплексные эксперименты в Ленинградской области продолжаются с применением радиофизических средств Геофизической обсерватории Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского [27]. В состав технических средств обсерватории включены автоматизированная метеорологическая станция АМРИИК, некогерентный метеорологический радиолокатор МРЛ-5 (длина волны 3.2 и 11 см), доплеровский радиолокатор МРМЛ (длина волны 3.2 см), станция приема спутниковой информации “Сю-

жет-МБ”, приборы напряженности электрического поля “Рябина”, грозопеленгаторы ФАГ, комплекс сбора и тематической обработки и хранения данных. Задачами исследований являются:

- уточнение комплексных радиолокационных критериев опасных явлений погоды, таких как грозы и ливни, на основе одновременных наблюдений средствами радиолокации, СВЧ-радиометрии, грозопеленгации, атмосферно-электрических измерений.

- совершенствование методов и технологий сверхкраткосрочного прогноза погоды и связанных с облаками опасных явлений на основе усвоения разнородной метеорологической информации (в том числе радиолокационной, СВЧ-радиометрической, спутниковой, атмосферно-электрических измерений) в моделях атмосферы и аттестация моделей мощного конвективного грозового облака.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования СВЧ-радиометрического метода для определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в период развития связанных с облаками опасных явлений погоды показали возможности усовершенствования сверхкраткосрочного прогнозирования мощных конвективных облаков, гроз. Предложен вариант получения СВЧ-

радиометрического прогностического критерия развития связанных с облаками опасных явлений погоды на основе комплексного применения методов СВЧ-радиометрии и радиолокации. Показано, что применение наземных СВЧ-радиометров влажностного зондирования атмосферы перспективно для исследования мезомасштабной структуры атмосферных фронтов и уточнения синоптического положения. Дальнейшие исследования в области усовершенствованием методов раннего предупреждения связанных с облаками опасных явлений погоды предполагают развитие экспериментов в Ленинградской области с применением радиофизических средств Геофизической обсерватории Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-19-00378).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степаненко В.Д., Шукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеоздат, 1987.
2. Westwater E. Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry / Ed. M.A. Janssen. N. Y.: J. Wiley and Sons. 1993. P. 145.
3. Westwater E.R., Crewel S., Mätzler C. // The Radio Sci. Bull. URSI. 2004. № 310. P. 59.
4. Наумов А.П., Плечков В.М. // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. 1971. Т. 7. № 3. С. 352.
5. Горелик А.Г., Калашиников В.В., Райкова Л.С. и др. // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. 1973. Т. 9. № 9. С. 928.
6. Rose T., Crewel S., Löhnert U., Simmer C. // Atmos. Res. 2005. V. 75. № 3. P. 183. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.12.005>
7. Ware R., Carpenter R., Guldner J., Liljegren J. et al. // Radio Sci. 2003. V. 38. № 4. P. 8079. <https://doi.org/10.1029/2002RS002856>
8. Illingworth A.J., Cimini D., Gaffard C. // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2015. V. 96. № 12. P. 2107. <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-6-883>
9. Кадыгров Е.Н., Горелик А.Г., Точилкина Т.А. // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 6. С. 546. <https://doi.org/10.1134/S1024856014060074>
10. Караваев Д.М., Шукин Г.Г. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 12. С. 1122. <https://doi.org/10.1134/S1024856016030076>
11. Караваев Д.М., Шукин Г.Г. // Гидрометеорология и экология. 2021. Вып. 62. С. 7. <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2021-62-7-26>
12. Караваев Д.М., Лебедев А.Б., Шукин Г.Г., Ильин Г.Н. // Метеорология и гидрология. 2022. № 12. С. 56. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-12-56-65>
13. Шукин Г.Г. // Тр. XXVII Всерос. симп. “Радиолокационное исследование природных сред”. Санкт-Петербург, 17–19 мая 2012. СПб.: ВКА, 2012. Вып. 6. Т. 2. С. 441.
14. Караваев Д.М., Шукин Г.Г. // Успехи совр. радиоэлектроники. 2008. № 6. С. 29.
15. Караваев Д.М., Шукин Г.Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 12. С. 942.
16. Караваев Д.М., Лебедев А.Б., Моисеева Н.О., Шукин Г.Г. // XII Всерос. Армандовские чтения: “Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн” / Матер. Всерос. науч. конф. Муром: ВлГУ, 2022. С. 336. <https://doi.org/10.24412/2304-0297-2022-1-336-340>
17. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеоздат, 1986.
18. Вельтищев Н.Ф. Мезометеорология и краткосрочное прогнозирование: Сб. лекций. Л.: Гидрометеоздат, 1988.
19. Шакина Н.П. Динамика атмосферных фронтов и циклонов. Л.: Гидрометеоздат, 1985.
20. Шукин Г.Г., Булкин В.В. Метеорологические пассивно-активные радиолокационные системы. Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2009.
21. Вылегжанин И.С., Жуков В.Ю., Караваев Д.М., Шукин Г.Г. // Труды Военно-космич. акад. им. А.Ф. Можайского. 2016. Вып. 653. С. 146.
22. Степаненко В.Д., Гальперин С.М. Радиотехнические методы исследования гроз. Л.: Гидрометеоздат, 1983.
23. Караваев Д.М., Кулешов Ю.В., Шукин Г.Г. // Тр. XXVII Всерос. научн. конф. “Распространение радиоволн”. Калининград, 28 июня–3 июля 2019. Калининград: БФУ им. И. Канта, 2021. С. 682.
24. Караваев Д.М., Шукин Г.Г. // Тр. XXX Всерос. симп. “Радиолокационное исследование природных сред”. Санкт-Петербург, 18–19 апреля 2017. СПб.: ВКА, 2017. Вып. 12. Т. 2. С. 204.
25. Шукин Г.Г., Караваев Д.М. // Тр. ГГО. 2008. Вып. 557. С. 119.
26. Караваев Д.М., Шукин Г.Г. // Докл. Всерос. конф. по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, 08–10 сентября 2021. Нальчик: Принт Центр, 2021. С. 165.
27. Кулешов Ю.В., Шукин Г.Г., Готюр И.А. и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2018. Вып. 662. С. 186.