

Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 249—259.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(71):249—259.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 551.515.8:551.501.81
doi: 1033933/2713-3001-2023-71-249-259

Совершенствование методики исследований мезоструктуры атмосферных фронтов на основе применения наземной микроволновой радиометрии

***Александр Николаевич Ефременко¹, Дмитрий Михайлович Караваев¹,
Андрей Борисович Лебедев², Наталья Олеговна Моисеева³,
Георгий Георгиевич Щукин^{1,4}***

¹ Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

² Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия, lebandbor@rambler.ru

³ Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Муромский институт (филиал) ВлГУ имени А. Г. и Н. Г. Столетовых, Муром, Россия

Аннотация. В статье описана методика исследования мезомасштабной структуры атмосферных фронтов с использованием данных наземных микроволновых радиометров водяного пара. Методика продемонстрирована на примере мезомасштабного анализа последовательного прохождения теплого и холодных фронтов через Ленинградскую область 9—10 сентября 2020 г. В работе одновременно изучаются возможности микроволнового радиометра водяного пара по выявлению мезомасштабных особенностей атмосферных фронтов, и исследуется мезоструктура этих синоптических объектов. Полученные оценки пространственных характеристик атмосферных фронтов для рассматриваемого района отличаются от аналогичных характеристик, полученных П. Хоббсом для северо-восточного побережья Северной Америки.

Ключевые слова: атмосферный фронт, влагозапас атмосферы, водозапас облаков, мезомасштабная структура, микроволновый радиометр

Благодарности: работа проведена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект 21-19-00378), <https://rscf.ru/project/21-19-00378/>.

Для цитирования: Ефременко А. Н., Караваев Д. М., Лебедев А. Б., Моисеева Н. О., Щукин Г. Г. Совершенствование методики исследований мезоструктуры атмосферных фронтов на основе применения наземной микроволновой радиометрии // Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 249—259. doi: 1033933/2713-3001-2023-71-249-259.

Original article

Improvement of research methodology mesostructures of atmospheric fronts on the basis of ground-based microwave radiometry

*Alexander N. Efremenko¹, Dmitry M. Karavaev¹,
Andrey B. Lebedev², Natalya O. Moiseeva³, Georgy G. Schukin^{1,4}*

¹ Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia

² Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

³ St Petersburg State University of civil aviation, St. Petersburg, Russia

⁴ Murom Institute of Vladimir State University, Murom, Russia

Summary. The paper considers the some results of experimental studies of the mesoscale structure of atmospheric fronts using a ground-based microwave water vapor radiometer. A methodology for studying the mesoscale structure of atmospheric fronts is described, which includes two stages: the stage of synoptic (frontological) analysis and the stage of mesoscale analysis based on measurements of atmospheric moisture and cloud liquid water content using a microwave water vapor radiometer. The application of the methodology is demonstrated by the example of the analysis of the results of observation of the case of the passage of warm and cold fronts through the Leningrad region on September 9—14, 2020. Based on the analysis of the results of previous studies, the features of changes in the characteristics of moisture content during the passage of atmospheric fronts are generalized. The growth of the atmospheric water vapor and cloud liquid water content is delayed relative to the appearance of harbingers of a warm cloud front of the upper tier. The growth of moisture content characteristics has a wave-like character, which can be explained by the manifestation of the strip mesostructure of the front. Estimates of the characteristic scales of spatial heterogeneities in the structure of atmospheric fronts for the area under consideration differ from similar characteristics obtained by P. Hobbs for the northeastern coast of North America. In the course of mesoscale analysis, the type of atmospheric front crossing the observation point can be clarified. The results obtained determine the prospects for improving the methods of diagnostics and current forecasting of dangerous weather phenomena during the passage of atmospheric fronts using ground-based microwave radiometers.

Keywords: atmospheric front, integrated water vapor, cloud liquid water content, mesoscale structure, microwave radiometer

Acknowledgments: The work was supported by a grant of Russian Science Foundation (Project 21-19-00378), <https://rscf.ru/project/21-19-00378/>

For citation: Efremenko A. N., Karavaev D. M., Lebedev A. B., Moiseeva N. O., Schukin G. G. Improvement of research methodology mesostructures of atmospheric fronts on the basis of ground-based microwave radiometry. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(71):249—259. (In Russ.). doi: 1033933/2713-3001-2023-71-249-259.

Введение

Повышение качества краткосрочных метеорологических прогнозов достигается, как правило, привлечением дополнительной информации, в качестве которой могут выступать как данные измерений новых приборов, так и более полные знания об атмосферных процессах, обуславливающих погоду. В настоящей работе применяются оба вышеупомянутых подхода. Изучается мезомасштабная

структура атмосферных фронтов с помощью наземного микроволнового радиометра водяного пара (РВП).

О завершенности прикладных научных исследований можно судить по тому признаку, насколько результаты этих исследований вошли в руководящие документы, учебную и справочную литературу. Сведения о мезомасштабной структуре атмосферных фронтов наиболее полно были обобщены Н. Ф. Вельтищевым в 1988 г. в Технической записке ВМО №701 [1], которая является одновременно и руководящим документом ВМО, и учебным пособием для студентов. Руководство по краткосрочному прогнозированию [2], которым пользуются и по настоящее время, было опубликовано двумя годами ранее и не включало данных о мезоструктуре фронтов. В последующие годы как в отечественных руководящих документах (например, РД 52.27.723-2009), так и в учебной литературе [3] новых сведений по данному вопросу не появилось. Следует отметить, что классификация и пространственно-временные характеристики мезоструктуры атмосферных фронтов, приводимые в работе [1], основываются на выполненном П. Хоббсом обобщении случаев прохождения циклонов по северо-восточному побережью Северной Америки. Очевидно, что условия цикло- и фронтогенеза в этом регионе существенно отличаются от условий развития циклонов и фронтов для различных регионов Евразии. Целью данной работы является исследование пространственной мезоструктуры атмосферных фронтов над Санкт-Петербургом и Ленинградской областью.

Методика исследований

Методика проводимых исследований представляет собой анализ прохождения атмосферных фронтов различных типов через станции наблюдений в Ленинградской области, вблизи которых установлены микроволновые радиометры водяного пара.

Анализ условно можно разделить на два этапа. В ходе первого этапа — комплексного синоптического анализа — выявляется сам факт прохождения атмосферного фронта через район измерений, идентифицируется тип фронта и определяется период его прохождения. Кроме того, определяется целесообразность дальнейшего исследования прохождения фронта. Отбираются случаи, когда атмосферные фронты пересекают пункты наблюдений в направлении близком к нормальному относительно линии фронта вблизи подстилающей поверхности. В ходе второго этапа — мезомасштабного анализа с использованием данных радиометрических измерений — уточняются сроки прохождения атмосферного фронта и выявляются мезомасштабные особенности его структуры, которые сравниваются с данными ранее выполненных исследований [4—6] и результатами других авторов [1, 7—8].

В ходе комплексного синоптического анализа на основе имеющегося в наличии аэросиноптического материала, спутниковых изображений, архивов наземных метеорологических наблюдений проводится классический фронтологический анализ, порядок выполнения которого изложен в [2]. В случаях, когда имеется неоднозначность в определении положения фронтов, дополнительно

учитываются закономерности взаимного расположения атмосферных фронтов и струйных течений.

Для определения сроков прохождения фронтов через пункт наблюдений анализируются кольцевые карты погоды совместно с данными наземных метеорологических измерений. Исходя из закономерностей изменения метеорологических величин при прохождении атмосферных фронтов различных типов:

— за начало прохождения теплого фронта или фронта окклюзии принимается срок, в который было отмечено появление сплошной облачности верхнего яруса;

— за завершение прохождения теплого фронта — срок с правым поворотом ветра или прекращением выпадения обложных осадков;

— за начало прохождения холодного фронта — срок также с правым поворотом ветра или прекращением выпадения ливневых осадков из предфронтальной гряды кучево-дождевых облаков;

— за завершение прохождения холодного фронта или фронта окклюзии — срок, в который было отмечено уменьшение количества облаков верхнего (при их отсутствии — среднего) яруса менее значительной.

Ввиду того, что процесс развития каждого атмосферного фронта является по-своему уникальным, вопрос об использовании критериев начала и завершения прохождения атмосферных фронтов в каждом конкретном случае решается индивидуально.

Мезомасштабный анализ основывается главным образом на результатах измерений радиометра водяного пара. При анализе используются интегральные характеристики влагосодержания атмосферы: влагозапас атмосферы и водозапас облаков.

Под влагозапасом атмосферы Q понимается интегральное содержание (масса) водяного пара в вертикальном столбе атмосферы единичного сечения. Под водозапасом облаков W — суммарное содержание жидкокапельной влаги и кристаллов льда в том же объеме воздуха. Методические вопросы определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков по данным радиотеплолокационных измерений вблизи линии водяного пара 22,236 ГГц, на частотах 20,7 ГГц и в «окне прозрачности» атмосферы 31,4 ГГц подробно рассмотрены в [4]. Сравнение оценок влагозапаса атмосферы, полученных по результатам радиометрических измерений, с данными аэрологического зондирования атмосферы показывает, что точность определения влагозапаса атмосферы в пределах $1,0 \text{ кг/м}^2$ [5].

При проведении мезомасштабного анализа выявляются особенности прохождения атмосферного фронта во временном ходе влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, полученных по данным радиометрических измерений. Период прохождения атмосферных фронтов определен ранее в ходе выполнения первого этапа — фронтологического анализа. Первоначально определяются фоновые значения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, которые наблюдались до и после прохождения атмосферных фронтов, а также период запаздывания начала роста характеристик интегрального паро- и влагосодержания относительно момента принятого за начало или окончание прохождения фронта. Полосовая структура

выпадения осадков проявляется в волнообразном изменении рассматриваемых характеристик содержания парообразной и жидкокапельной влаги при прохождении фронтов, поэтому определяются параметры волнообразного изменения этих характеристик (длина волны, амплитуда, тенденция изменения, число волн и т.п.). Полученные параметры сравниваются с аналогичными для других случаев прохождения атмосферных фронтов. Кроме того, сопоставляются оценки пространственных размеров полос осадков с данными, полученными П. Хоббсом [1] для атмосферных фронтов северо-восточного побережья Северной Америки.

Ниже будет рассмотрен случай, который продемонстрирует возможности анализа с использованием результатов радиометрических измерений по уточнению периода прохождения фронтов, идентификации типа фронта и выявлению их мезомасштабной структуры.

Анализ случаев прохождения атмосферных фронтов через Санкт-Петербург 9—10 сентября 2020 г.

Использование классического фронтологического анализа позволило сделать вывод о прохождении в период с 9 ч СГВ (среднего времени по Гринвичу) 9 сентября 2020 г. до 6 ч СГВ 10 сентября 2020 г. через ст. Санкт-Петербург фронта окклюзии по типу холодного фронта (рис. 1).

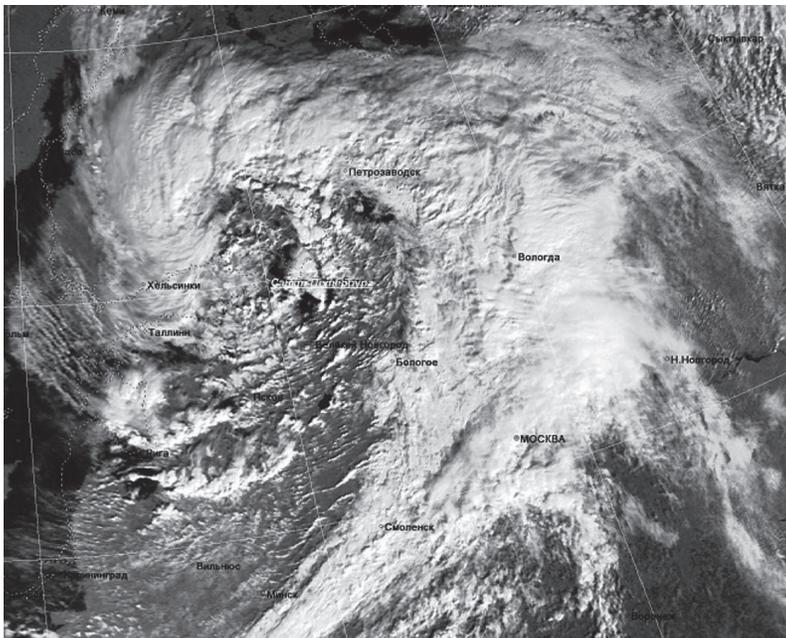


Рис. 1. Изображение фронтальной облачности циклона
10 сентября 2020 г. 08 ч. СГВ (NOAA-18, AVHRR, 0,72 1,1 мкм).

Fig. 1. Satellite map of cloudiness on September 10, 2020 at 08 h GMT.

В утренние часы 9 сентября наблюдалась сплошная низкая слоистая облачность после выпавших накануне ливневых осадков, не являющаяся атрибутом прохождения фронта данного типа. За момент начала прохождения фронта был условно принят срок 09 ч 9 сентября, в который были отмечены значительная облачность верхнего яруса, характерная для прохождения фронта окклюзии, рассеяние слоистых облаков и последующая их трансформация в облачность кучевых форм. При этом в 15 ч был отмечен поворот ветра с западного на южный, который свидетельствовал о прохождении через пункт наблюдений оси барического гребня, что также не является признаком прохождения фронта.

За момент завершения прохождения фронта был условно принят срок 06 ч 10 сентября, в котором уже не наблюдалось выпадение обложных осадков. По данным наземных наблюдений, более точно определить момент завершения прохождения фронта не представляется возможным, так как исчезновение облачности среднего яруса, которое могло бы об этом свидетельствовать, было замаскировано значительной облачностью кучевых форм неустойчивой воздушной массы в тыловой части циклона (рис. 1).

По данным радиометрических измерений (рис. 2) прохождение фронта проявляется в относительно плавном росте влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, а затем в более резком уменьшении их интегральных характеристик.

За фоновые значения (значения, при которых влияние фронта по данным РВП не проявляется) приняты минимальные значения влагозапаса атмосферы $15,0 \text{ кг/м}^2$ и водозапаса облаков $0,016 \text{ кг/м}^2$, наблюдавшиеся в полуденные часы 09 сентября при сплошной облачности верхнего яруса и минимальном количестве облаков нижнего яруса. Рост влагозапаса атмосферы начинается после 12 ч 15 мин 9 сентября и несколько запаздывает относительно появления предвестников прохождения фронта — облаков верхнего яруса. Данная особенность выявлена ранее [6] и может быть объяснена тем, что кристаллические облака, которыми преимущественно являются перистые облака, слабо влияют на перенос радиотеплового излучения [9].

Момент начала роста влагозапаса атмосферы совпадает с началом всплеска водозапаса облаков, который наблюдался в период с 12 ч 15 мин до 12 ч 45 мин и имел максимальное значение $0,134 \text{ кг/м}^2$. Всплеск водозапаса облаков мог быть обусловлен прохождением отдельного кучевого облака.

После всплеска водозапас облаков принимает фоновые значения, а влагозапас атмосферы уменьшается от значения $17,5 \text{ кг/м}^2$ до значения $16,5 \text{ кг/м}^2$, а затем продолжает постепенный рост. Рост водозапаса атмосферы, обусловленный влиянием облачности кучевых форм, снова начинается после 13 ч 40 м, достигает максимальных значений $0,312 \text{ кг/м}^2$ в 13 ч 55 м, а затем начинает постепенное понижение, и опять достигает фоновых значений к 17 ч. 00 мин. Вышеупомянутое наличие облачности кучевых форм является специфичным для данного конкретного фронта. К этому моменту значения влагозапаса атмосферы достигли значения $22,1 \text{ кг/м}^2$.

После 17 ч 00 мин 9 сентября начинается более крутой рост водозапаса облаков — существенно позже относительно момента времени начала роста влагозапаса атмосферы, что можно объяснить усилением процессов облако-

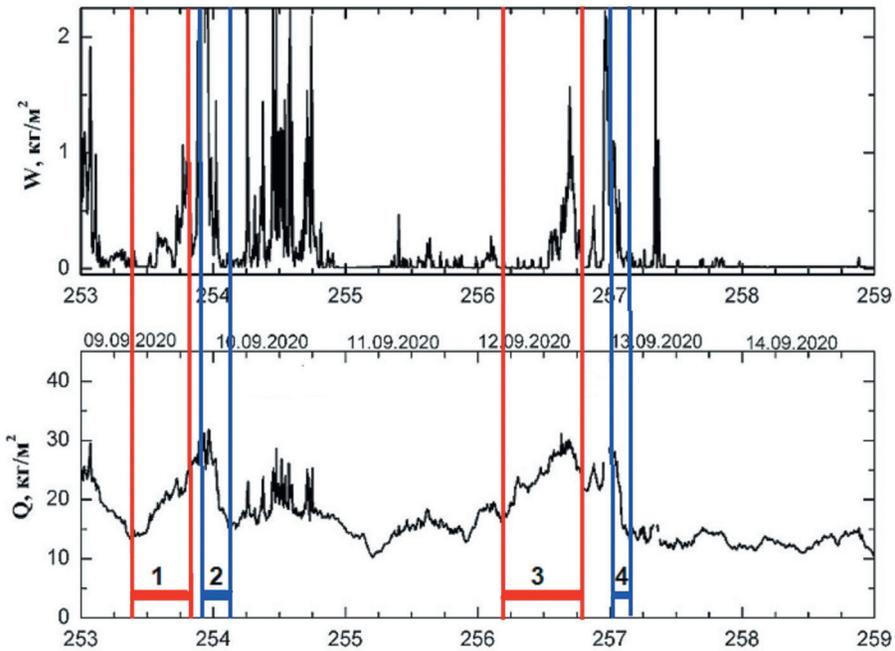


Рис. 2. Временной ход влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков 9—14 сентября 2020 г. в г. Санкт-Петербург.

1—4 — периоды прохождения фронтов: 1, 3 — теплых фронтов; 2, 4 — холодных фронтов.

Fig. 2. Time series of integrated water vapor and of cloud liquid water content measured by WVR from September 11 to 14, 2020 in St. Petersburg region.

1—4 — periods of passage of fronts: 1, 3 — warm; 2, 4 — cold.

осадкообразования. Рост водозапаса облаков при прохождении фронта (рис. 2) имел не монотонный характер, а был промодулирован волнами более высокой частоты. Первая волна наблюдалась в период с 17 ч 05 мин до 18 ч 15 мин, имела двухгорбую форму, водозапас облаков при этом вырос от фоновых значений $0,52 \text{ кг/м}^2$ (наблюдались в период с 17 ч 20 мин до 17 ч 30 мин). Вторая волна наблюдалась в период с 18 ч 15 мин до 18 ч 55 мин, имела также двухгорбую форму, а водозапас облаков при этом увеличился от $0,36 \text{ кг/м}^2$ до $1,07 \text{ кг/м}^2$. Третья волна наблюдалась в период с 19 ч 00 мин до 19 ч 30 мин, имела двухгорбую форму, водозапас облаков увеличился от $0,55 \text{ кг/м}^2$ до $1,07 \text{ г/м}^2$.

В период с 19 ч 35 мин до 20 ч 05 мин наблюдалось монотонное уменьшение водозапаса облаков до значений $0,10 \text{ кг/м}^2$, а затем до 21 ч 00 мин — плавный рост водозапаса до значений $0,40 \text{ кг/м}^2$. Данный эффект не удалось теоретически объяснить с использованием типовых схем фронтов окклюзий с учетом мезомасштабных особенностей. Был учтен тот факт, что фронт проходил через ст. Санкт-Петербург вблизи точки окклюзии. Авторы сравнили ход изменения интегральных характеристик влажности данного случая с ходом изменения этих характеристик

в теплых секторах циклонов ранее рассмотренных случаев [6]. Характер изменения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков во всех случаях был аналогичным, поэтому авторы пришли к выводу, что рассматриваемый случай является последовательным прохождением теплого и холодного фронтов в системе фронтального циклона. Вышеописанные волны следует отнести, согласно классификации П. Хоббса [1], к полосам осадков на теплом фронте. Тогда, теплый фронт проходил в период с 9 ч 00 мин до 20 ч 05 мин 9 сентября 2020 г.

По данным работы [1], на теплом фронте полосы осадков имеют ширину порядка 50 км, расстояние между соседними полосами составляет порядка 100 км. На изобарической поверхности 700 гПа, которую обычно принимают за уровень ведущего потока, по данным комплексного температурно-ветрового зондирования 10 сентября 2020 г 00 ч СГВ на ст. Воейково скорость ветра составляла 15 м/с (54 км/ч). Для расчета скорости перемещения фронта скорость ветра умножают на коэффициент приведения, который для теплого фронта составляет 0,8. Таким образом, перемещение полосы осадков шириной 50 км со скоростью 43 км/ч должна составлять порядка 1 ч 10 мин. Размеры полос осадков теплого фронта в Ленинградской области существенно меньше, чем получены в [1].

Теперь уже, в теплом секторе циклона было отмечено волновое изменение водозапаса облаков в период 21 ч 00 мин — 21 ч 35 мин с максимумом водозапаса облаков 2,07 кг/м². Особенностью максимумов в теплых секторах циклонов является относительно равномерный монотонный рост и уменьшение водозапаса облаков.

Согласно типовой схеме прохождения облачности холодного фронта, перед линией прохождения холодного фронта вблизи поверхности проходит гряда кучево-дождевой облачности. Данная гряда по радиометрическим данным наблюдалась в период с 21 ч 40 мин до 22 ч 30 мин. Максимальные значения водозапаса облаков достигали 4,09 кг/м², а затем уменьшились до значений 1,97 кг/м². Таким образом, момент начала прохождения холодного фронта приходится на 22 ч 30 мин 10 сентября 2020 г.

Уменьшение водозапаса облаков при прохождении холодного фронта (рис. 2) имеет не монотонный характер, а промодулирован волнами более высокой частоты. Первая волна наблюдалась в период с 22 ч 30 мин до 23 ч 20 мин, имела трехгорбую форму, водозапас облаков достигал значений 3,35 кг/м², затем уменьшился до 0,38 кг/м². Вторая волна наблюдалась в период с 23 ч 20 мин 9 сентября до 00 ч 05 мин 10 сентября, имела одногорбую форму, водозапас облаков увеличился до 0,96 кг/м², затем уменьшился до 0,12 кг/м². Третья волна наблюдалась в период с 00 ч 05 мин до 1 ч 15 мин 10 сентября СГВ, имела трехгорбую форму, водозапас облаков достигал 1,44 кг/м², затем уменьшился до фоновых значений. Значения влагозапаса атмосферы в этот момент достигали значений 1,80—1,85 кг/м², а фоновых значений влагозапас атмосферы достиг в 04 ч 05 мин. Данный момент следует считать моментом завершения прохождения холодного фронта.

В соответствии с экспериментальными данными, изложенными в [1], в теплом секторе циклона полосы осадков имеют ширину порядка 50 км, а полосы осадков на холодном фронте наблюдаются двух видов: одни (на некотором удалении

от линии фронта) имеют ширину порядка 50 км; другие (вблизи линии фронта) имеют ширину порядка 5 км. Пространственные параметры полос осадков теплого сектора циклона и холодного фронта по результатам их оценивания с помощью радиометрических измерений лучше согласуются с данными П. Хоббса [1].

На рис. 2 также представлен случай последовательного прохождения тепло-го и холодного фронтов в период с 12 по 13 сентября 2020 г., который детально проанализирован в [6]. Мезомасштабные особенности прохождения фронтов аналогичны рассмотренному выше случаю. Для сравнения на рис. 2 также приведен суточный ход характеристик влагосодержания атмосферы 14 сентября 2020 г. при антициклоническом типе синоптической ситуации.

Аналогичные результаты об особенностях прохождения атмосферных фронтов получены в работах [5, 6], а также подтверждаются при анализе случаев прохождения атмосферных фронтов с помощью данных радиометрических измерений за достаточно длительный период времени, начиная с 90-х гг.

Заключение

В работе показаны возможности совершенствования методики комплексного синоптического анализа атмосферных фронтов [2], которая используется и в настоящее время в оперативной работе. Применение радиометрической информации позволяет уточнить тип фронта, период прохождения фронтов через пункт наблюдений, а также особенности его мезомасштабной структуры, что может быть использовано при уточнении синоптического положения над пунктом наблюдений и при текущем сверхкраткосрочном прогнозировании.

Применение настоящей методики позволило выявить особенности изменения интегральных характеристик влажности атмосферы при прохождении тепло-го и холодного фронтов и их регистрации с помощью РВП:

— запаздывание роста влагозапаса атмосферы относительно появления предвестников появления теплого фронта — облаков верхнего яруса;

— запаздывание роста водозапаса облаков относительно начала роста влагозапаса атмосферы;

— рост водозапаса облаков при прохождении теплого фронта и уменьшение водозапаса облаков при прохождении холодного фронта не является монотонным, а промодулировано волнами, которые можно объяснить прохождением полос осадков;

— ширина полос осадков во фронтальной облачности увеличивается по мере удаления от линии фронта, проведенной вблизи подстилающей поверхности;

— пространственно-временные характеристики мезомасштабных особенностей атмосферных фронтов в Ленинградской области не соответствуют данным, полученным П. Хоббсом в работе [1], и требуют уточнения.

Поскольку выполненные исследования мезоструктуры атмосферных фронтов относятся к теплomu времени года, то в дальнейшем планируется провести аналогичный анализ для холодного времени года.

В настоящее время пространственно-разнесенная система радиометрических измерений в Ленинградской области расширяется [6]. Радиометры водяного

пара предполагается установить не только на исследовательских площадках, но и в оперативных метеорологических подразделениях. К мезомасштабному анализу предполагается привлечь также данные наземных радиолокационных наблюдений и данные непрерывных наблюдений за облачностью и осадками в периоды прохождения атмосферных фронтов. Регулярное и детальное изучение атмосферных фронтов позволит получить не только достоверную статистику по их пространственно-временным характеристикам, но и создать более надежную методику анализа и прогнозирования прохождения атмосферных фронтов.

Список литературы

1. Вельтишев Н. Ф. Мезометеорология и краткосрочное прогнозирование: сб. лекций. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 137 с.
2. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть 1. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 704 с.
3. Толмачева Н. И. Дистанционные методы исследования мезометеорологических процессов: уч. пос. Пермь: Перм. ун-т, 2010. 200 с.
4. Караваев Д. М., Шукин Г. Г. Определение содержания парообразной и жидкокапельной влаги из измерений микроволнового излучения атмосферы. // Известия вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 12. С. 942—953. doi:10.52452/00213462_2021_64_12_942.
5. Караваев Д. М., Шукин 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. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-7-26.
6. Караваев Д. М., Лебедев А. Б., Шукин Г. Г. и др. Перспективы применения методов наземной микроволновой радиометрии для синоптического анализа атмосферных фронтов и прогноза опасных явлений погоды // Метеорология и гидрология. 2022. № 12. С. 56—65. doi: 10.52002/0130-2906-2022-12-56-65.
7. Мазин И. П., Шметтер С. М. Облака: строение и физика образования. Л.: Гидрометеиздат, 1983, 279 с.
8. Knupp K. R., Coleman T., Philips D., et al. Ground-based passive microwave profiling during dynamic weather conditions. — J. Atmos. Oceanic Technol., 2009, vol. 26, no 6, pp. 1057—1073. doi: 10.1175/2008JTCNA1150.1.
9. Мазин И. П., Хргиан А. Х. Облака и облачная атмосфера: справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1989, 648 с.
10. Кондратьев К. Я., Тимофеев Ю. М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеиздат, 1978, 280 с.

References

1. Veltischev N. F. *Mesometeorology and short-term forecasting*. WMO technical note N 701. Leningrad: Hidrometizdat Press, 1988: 136 p. (In Russ.).
2. *Guide to short term weather forecasts. Guidance document 1*. Leningrad: Hidrometizdat Press, 1986: 703 p. (In Russ.).
3. Tolmacheva N. I. *Distantionnyye metody issledovaniya mezometeorologicheskikh protsessov: uchebnik = Remote methods for studying mesometeorological processes: textbook*. Perm: Perm. University, 2010. 200 p. (In Russ.).
4. Karavaev D. M., Shchukin G. G. Determination of integrated water vapor and liquid water contents from the measurements of microwave atmospheric radiation. *Izvestiya vuzov. Radiofizika = Radiophysics and Quantum Electronics*. 2022:12(64):846—856. (In Russ.). doi:10.1007/s11141-022-10183-2.
5. Karavaev D. M., Shchukin G. G. 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 = Hydrometeorology and ecology*. 2021; (62): 7—26. (In Russ.). doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-7-26.
6. Karavaev D. M., Lebedev A. B., Shchukin G. G., Ilyin G.N. Prospects for application of ground-based microwave radiometry for analysis of atmospheric fronts and early prediction of severe weather events. *Meteorologiya i gidrologiya. = Meteorology and hydrology*. 2022; (12): 56—65. (In Russ.). doi: 10.52002/0130-2906-2022-12-56-65.
 7. Mazin I. P., Shmetter S. M. *Oblaka: stroeniye i fizika obrazovaniya. = Clouds: structure and physics of education*. Leningrad: Hidrometizdat Press, 1983: 279 p. (In Russ.).
 8. Knupp K. R., Coleman T., Philips D. et.al. Ground-based passive microwave profiling during dynamic weather conditions. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2009; (26): 1027—1073. doi: 10.1175/2008JTECHA1150.1.
 9. Mazin I. P., Khragian A. Kh. *Oblaka i oblachnaya atmosfera: spravochnik. = Clouds and cloudy atmosphere: a handbook*. Leningrad: Hidrometizdat Press, 1989: 648 p. (In Russ.).
 10. Kondratiev K. Ya., Timofeev Yu. M. *Meteorologicheskoye zondirovaniye atmosfery iz kosmosa. = Meteorological sounding of the atmosphere from space*. Leningrad: Hidrometizdat Press, 1978: 280 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Ефременко Александр Николаевич, канд. тех. наук, начальник отдела, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского, vka@mil.ru.

Каравеев Дмитрий Михайлович, канд. тех. наук, старший научный сотрудник, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, vka@mil.ru.

Лебедев Андрей Борисович, канд. тех. наук, доцент, доцент кафедры метеорологии, климатологии и охраны атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет, lebandbor@rambler.ru.

Моисеева Наталья Олеговна, канд. тех. наук, доцент кафедры авиационной метеорологии и климатологии, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, natali.ziadinova@yandex.ru.

Щукин Георгий Георгиевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технологии и средств геофизического обеспечения, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, vka@mil.ru.

Information about authors

Efremenko Alexander Nikolaevich, PhD (Tech. Sci.), head of the department, Mozhaisky Military Space Academy.

Karavaev Dmitry Mikhailovich, PhD (Tech. Sci.), Senior Researcher, Mozhaisky Military Space Academy.

Lebedev Andrey Borisovich, PhD (Tech. Sci.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Meteorology, Climatology and Protection of Atmosphere, Russian State Hydrometeorological University.

Moiseeva Natalya Olegovna, PhD (Tech. Sci.), Associate Professor of the Department of Aviation Meteorology and Climatology, St Petersburg State University of civil aviation.

Georgy Geogievich Schukin, Dr. Sci. (Tech.), Prof., Professor of the Department of Technology and Geophysical Support, Mozhaisky Military Space Academy.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 24.04.2023

Принята к печати после доработки 25.05.2023

The article was received on 24.04.2023

The article was accepted after revision on 25.05.2023