

Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 269—279.

Hydrometeorology and Ecology. 2024;(75):269—279.

Научная статья

УДК 551.509.616

doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-269-279

Применение прогностической модели атмосферы при проведении работ по активным воздействиям на облака

***Роман Юрьевич Игнатов¹, Андрей Викторович Частухин²,
Андрей Михайлович Петрунин²***

¹ Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия,
prognostist@gmail.com

² АНО «Агентство атмосферных технологий»

Аннотация. Практика оперативных работ по активному воздействию на облака показала, что наряду с радиолокационной информацией и данными радиозондирования атмосферы важную роль в этих работах играет оперативная прогностическая информация о поле ветра в регионе их проведения. В статье на примере процессов, имевших место во время метеозащиты Санкт-Петербурга и при проведении противоградовых работ на территории Северного Кавказа, показано, что информация о поле ветра в регионе проведения воздействий позволяет своевременно скорректировать процесс их проведения. Делается заключение о целесообразности использования в оперативных работах по активному воздействию на облака совместно с другими источниками информации прогностической модели атмосферы WRF-ARW.

Ключевые слова: поле ветра, прогностическая модель атмосферы, активные воздействия на облака, мезомасштабные процессы.

Для цитирования: Игнатов Р. Ю., Частухин А. В., Петрунин А. М. Применение прогностической модели атмосферы при проведении работ по активным воздействиям на облака // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 269—279. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-269-279.

Original article

Application of a predictive atmospheric model during work on active influences on clouds

Roman Yu. Ignatov¹, Andrey V. Chastukhin², Andrey M. Petrunin²

¹ Institute for Problems of Safe Development of Nuclear Energy Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, prognostist@gmail.com

² ANO «Atmospheric Technology Agency»

Summary. The practice of operational work on active influence on clouds has shown that, along with radar information and atmospheric radio sounding data, the analysis of which allows only an inertial forecast

to be made, operational forecast information about the wind field in the region where they are carried out plays an important role in these works. The paper examines two real cases, which, from the authors' point of view, seem to be the most interesting for studying the wind field in the region of influence. An analysis of the synoptic situations of the processes that took place during the weather protection of St. Petersburg and during anti-hail work in the North Caucasus is provided. The results of the analysis, carried out without taking into account forecast information, showed that in the first case there was an unpredictable movement of the precipitation zone into the protected area, in the second case there was an anomalous movement of the convective cell relative to super-powerful hail convective storms. The article presents forecast wind fields for these processes obtained using the regional non-hydrostatic atmospheric model WRF-ARW, which showed the formation of local atmospheric disturbances. The authors make the assumption that the formation of such local atmospheric disturbances can affect the overall wind field in the region where the work is being carried out. Using these processes as an example, it is shown that information about the wind field in the region of impact allows timely adjustment of the process of their implementation. A conclusion is made about the advisability of using the WRF-ARW atmospheric forecast model in operational work on active influence on clouds together with other sources of information.

Keywords: wind field, atmospheric forecast model, active influences on clouds, mesoscale processes.

For citation: Ignatov R Yu., Chastukhin A.V., Petrunin A.M. Application of a predictive atmospheric model during work on active influences on clouds. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(75):269—279. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-269-279.

Введение

Работы по активным воздействиям (АВ) на облака с целью искусственного регулирования осадков или борьбы с градом проводятся более 60 лет. Важную роль в достижении положительного эффекта при их проведении играет оперативная радиолокационная информация и данные радиозондирования атмосферы. Анализ этих данных позволяет делать лишь инерционный прогноз. Однако, как показывает практика, важную роль в работах по АВ играет оперативная прогностическая информация, полученная с помощью модели атмосферы в регионе проведения работ, что может позволить более эффективно управлять процессом АВ, оперативно корректируя районы, время и высоты воздействий.

Модели атмосферы в настоящее время широко используются для решения различных задач, связанных с исследованием влияния мезомасштабных атмосферных процессов и получения прогностической информации о поле ветра в конкретном регионе. Положительный опыт применения прогностической информации моделей авторы отмечают в работах [1, 2, 3].

Цель работы состоит в том, чтобы на конкретных примерах показать необходимость применения прогностической модели атмосферы в работах по АВ. Ниже рассмотрены процессы при проведении противоградовых работ 17 июля 2006 г. во время метеозащиты Санкт-Петербурга и 19 августа 2015 г. на территории Северного Кавказа, анализ которых без учета прогностической информации показал:

- в первом случае наблюдалось непрогнозируемое перемещение зоны осадков на защищаемую территорию;
- во втором случае — аномальное перемещение конвективной ячейки относительно сверхмощных градовых конвективных штормов.

На данных примерах исследуется влияние мезомасштабных атмосферных процессов на процесс принятия решений о проведении АВ.

Анализ процесса в районе Санкт-Петербурга 17 июля 2006 г.

Синоптическая ситуация 17 июля 2006 г. Синоптическая ситуация в Ленинградской области и на Карельском перешейке характеризовалась в первой половине дня 17 июля 2006 г. влиянием тыловой части заполняющегося циклона с центром над востоком Вологодской области. Во второй половине дня влияние этого циклона значительно ослабло, а к вечеру начало сказываться влияние другого циклона, приближающегося со Скандинавии. В данной работе рассматривается период до 15 часов, когда циклон со Скандинавии ещё не оказывал влияние на данный регион.

По данным радиолокационных наблюдений 17 июля 2006 г. [4], в утренние часы к северо-востоку от Санкт-Петербурга наблюдалась обширная зона облачности и осадков (рис. 1). Слоистая и слоисто-дождевая облачность перемещалась на юг—юго-восток со скоростью 25—30 км/час и имела многослойный характер: высота нижнего яруса до 4—5 км, верхнего — до 8—9 км. Из облачности выпадали осадки интенсивностью до 2 мм/час. С 00:00 до 05:00—06:00 МСК во всей

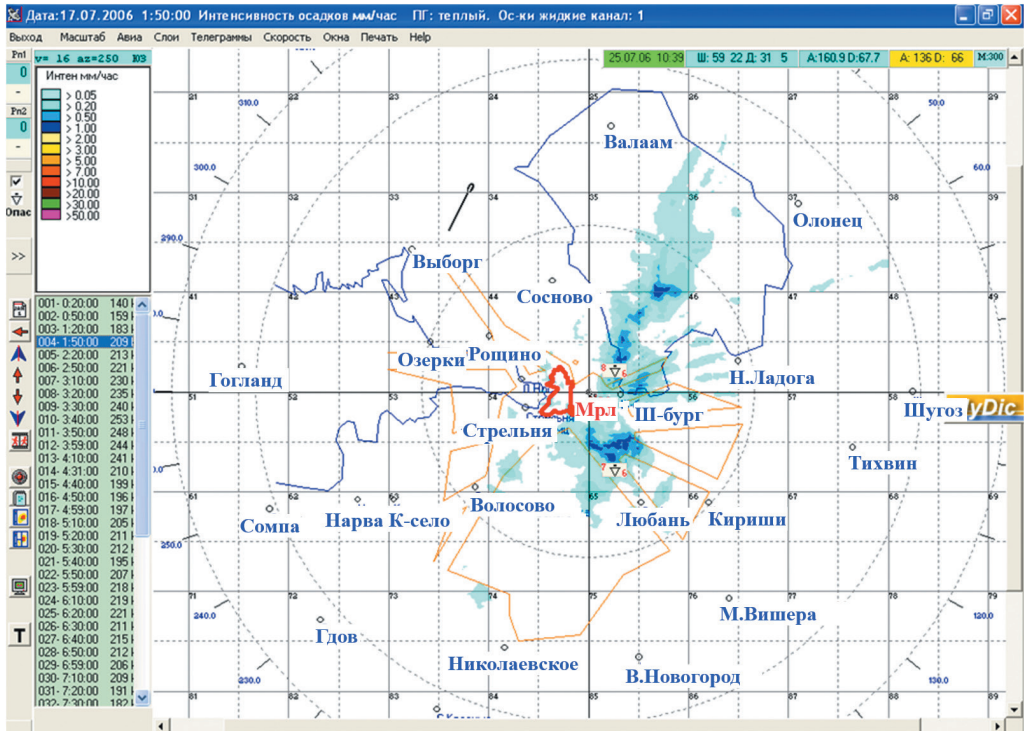


Fig. 1. Radar map of precipitation intensity distributions at the work area at 01:50 Moscow time, July 17, 2006.

тропосфере наблюдался северный перенос воздушных масс, который, по данным синоптического прогноза, сохранялся на протяжении всего дня, причем зона осадков должна была пройти в 20—30 км восточнее границ города, не затронув его. Следует отметить, что данный прогноз был сделан без учета прогностической информации о ветре на высотах. Ниже показано, что использование прогностической модели WRF-ARW улучшает качество работ по АВ, позволяя корректировать процесс их проведения.

Обоснование выбора данных прогностической модели атмосферы WRF-ARW. Прогностические поля ветра были получены с помощью региональной негидростатической модели атмосферы WRF-ARW (Weather, Research, Forecast) (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>) [5, 6]. Данная модель, созданная в Национальном центре атмосферных исследований США, хорошо документирована и широко используется для решения значительного числа прикладных метеорологических задач и в оперативной работе. Модель является открытой и свободно распространяемой по сети Интернет. Открыт также и программный код всех модулей этой модели, что предоставляет широкую возможность для её усовершенствования и адаптации к самым разным задачам. Модель WRF-ARW достаточно качественно воспроизводит ветер. Примеры оценок качества прогноза приземного ветра приведены в работе [7].

В качестве начальных данных и граничных условий для WRF-ARW в данной работе использовался реанализ Европейского Центра Среднесрочных Прогнозов Погоды (ECMWF) ERA-5 [8]. ERA5 представляют собой глобальные данные в формате GRIB1 со следующими параметрами:

- горизонтальное разрешение — 0.25° вдоль широты и долготы;
- шаг по времени — 6 часов (00:00, 06:00, 12:00 и 18:00 ч);
- приземные метеорологические параметры, необходимые для запуска модели WRF-ARW (температура на 2 м, зональная компонента ветра на 10 м, меридиональная компонента ветра на 10 м, точка росы на 2 м, маска «суша-море», орография, давление на поверхности орографии, давление на уровне моря, температура поверхности, сплочённость льда, температура поверхности моря, плотность снежного покрова, высота снежного покрова, температура и влажность почвы на глубинах 7, 28, 100, 289 см);
- метеорологические параметры на 37 изобарических поверхностях от 1000 до 1 гПа (геопотенциал, температура, относительная влажность, зональная компонента ветра, меридиональная компонента ветра).

Результаты расчета по прогностической модели. Рис. 2 и рис. 3 демонстрируют результаты расчета по модели WRF-ARW для процесса в районе Санкт-Петербурга 17 июля 2006 г. На рис. 2 показаны линии тока (линии со стрелками) на цветном фоне скорости ветра, на рис. 3 — изменение со временем ветра в точке с координатами 59.91° с. ш., 30.85° в. д. (обозначена синим треугольником на рис. 2), горизонтальная ось — время, вертикальная — давление в гПа.

На рис. 2 видно, что в 06:00 часов в юго-восточной части горизонтального сечения поля ветра прослеживается северная окраина циклона (на рисунке оно обозначено черным овалом), где наблюдается ветер восточного направления.

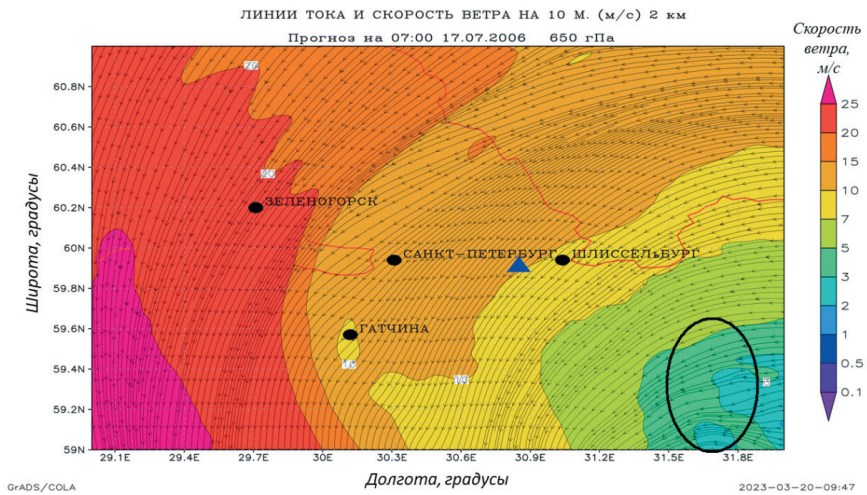


Рис. 2. Карта линий тока (линии со стрелками) и скорости ветра (цвет) на изобарической поверхности 650 гПа на 07:00 17 июля 2006 г.

Синий треугольник — точка вертикального разреза на рис. 3.

Fig. 2. Map of streamlines (lines with arrows) and wind speed (color) on an isobaric surface of 650 hPa at 07:00 July 17, 2006.

The blue triangle is the point of the vertical section in Fig. 3.

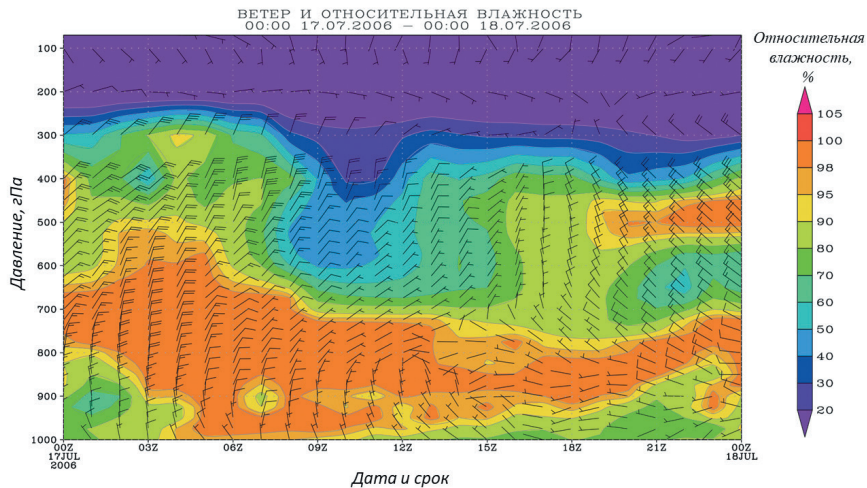


Рис. 3. Вертикальный разрез поля ветра (перья) и относительной влажности (цвет) для 17 июля 2006 г. в точке с координатами 59.91° с. ш., 30.85° в. д.

Fig. 3. Vertical section of the wind field (feathers) and relative humidity (color) for July 17, 2006 at a point with coordinates 59.91° N. latitude, 30.85° east. d.

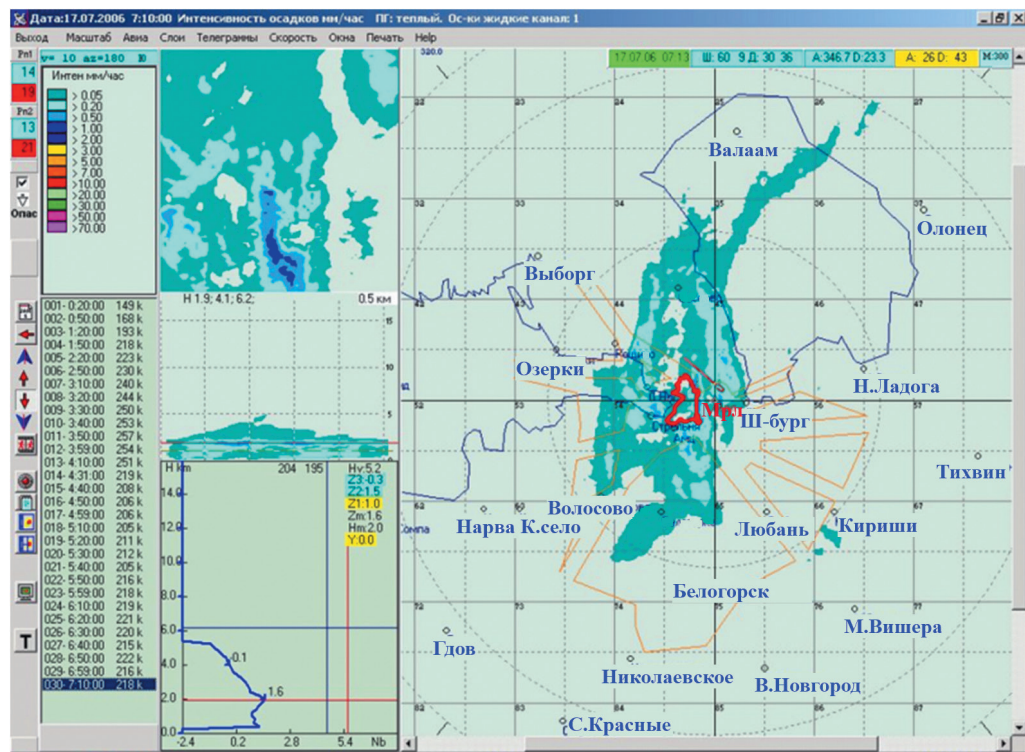


Рис. 4. Радиолокационная карта распределения интенсивности осадков на площади работ в 7:10 МСК, 17 июля 2006 г.

Fig. 4. Radar map of precipitation intensity distributions over the work area at 7:10 Moscow time, July 17, 2006.

Этот циклон, согласно прогнозу, медленно смещался на север, в результате чего около 13:00 часов произошел разворот ветра в слое до 650 гПа на восточный — северо-восточный в районе Санкт-Петербург — Шлиссельбург. В результате данная территория оказалась в северо-западной периферии мезомасштабного барического возмущения, которое на несколько часов изменило преобладающий северный перенос на северо-восточный и восточный в слое 850—650 гПа. Это хорошо видно на вертикальном разрезе (рис. 3) в период с 7 до 15 часов. В результате около 10:00 часов зона облачности, перемещавшаяся с севера на юг восточнее Санкт-Петербурга, по данным радиолокатора (рис. 4), повернула на город, вследствие чего в Санкт-Петербурге наблюдалось выпадение осадков, которых по прогнозу без учета результатов прогностической модели не должно быть. Впрочем, помимо инерционных прогнозов и прогностической информации, необходимо учитывать фактор распространения процесса обновления системы (кластера).

Анализ процесса 19 августа 2015 г. на Северном Кавказе

Синоптическая ситуация 19 августа 2015 г. Синоптическая ситуация 19 августа 2015 г. в Карачаево-Черкессии и Ставропольском крае характеризовалась размытым барическим полем. Центры барических образований находились довольно далеко от региона, антициклон располагался над Балтикой, циклон — над югом Каспийского моря. В северной части рассматриваемой территории сказывалось влияние холодного атмосферного фронта, который медленно смещался на восток-юго-восток, и к концу дня под влиянием этого фронта оказалась значительная часть Карачаево-Черкессии и Ставропольского края.

По данным радиолокационных наблюдений, с 13:20 до 24:00 МСК на территории Северного Кавказа наблюдались сверхмощные, быстро перемещающиеся, градовые конвективные штормы. Общая длительность грозоградового процесса составила более 10,5 часов [9]. На рис. 5 показаны данные радиолокационных наблюдений для четырех последовательных моментов времени. Как видно из рисунка, в 16:00 МСК в районе Моздока образовалась конвективная ячейка (рис. 5 а, положение 1). Эта ячейка смещалась в западном направлении со скоростью около 50 км/ч с высотой нижней границы около 2 км и верхней — 10 км (рис. 5 б, рис. 5 в, положение 2 и 3 соответственно). После 18:15 данная ячейка стала перемещаться обратно в восточном направлении со скоростью около 40 км/ч и к 19:00 вернулась в район Моздока, практически слившись с облачной системой приближавшегося атмосферного фронта (рис. 5 г, положение 4). Высота её нижней границы составляла около 3,5 км, а верхней — 10 км.

Противоградовые работы в регионе были начаты в 13:46 часов и проводились Краснодарской, Ставропольской и Северо-Кавказской военизированными службами по АВ на гидрометеорологические процессы до 19:30 часов.

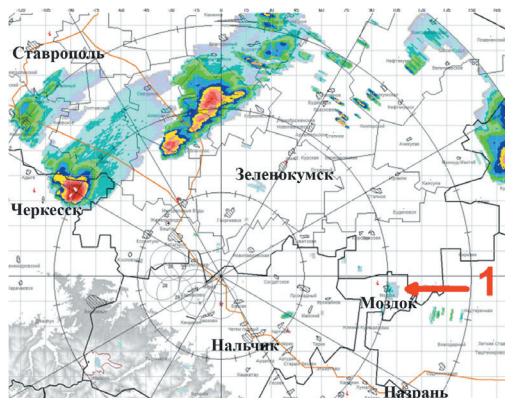
Хотя воздействия на данную ячейку не проводились, этот случай представляет несомненный интерес с точки зрения необходимости оперативного мониторинга поля ветра в районе воздействий и с точки зрения перемещения и эволюции облачности во избежание угрозы нанесения ущерба для защищаемой территории.

Результаты расчета по прогностической модели. Рис. 6 и рис. 7 демонстрируют результаты расчета по модели WRF-ARW в районе Моздока 19 августа 2015 г. На рис. 6 даны линии тока (линии со стрелками) на цветном фоне скорости ветра. На рис. 7 показано изменение со временем вертикального разреза ветра в точке с координатами 43.75° с. ш., 44.02° в. д. (обозначена синим треугольником на рис. 6), горизонтальная ось — время, вертикальная — давление в гПа.

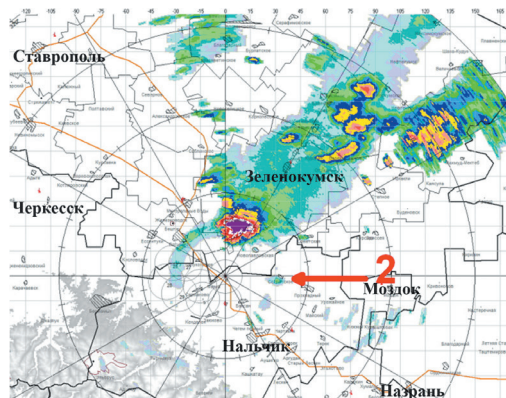
На рис. 6 видно, что около 19:00 часов над Северной Осетией сформировалось локальное атмосферное возмущение (на рисунке обозначено черным овалом), что привело к возмущению потоков в регионе. При этом восточный перенос пространился почти до 700 гПа с 15:00 до 21:00 часов (рис. 7).

Наблюдавшаяся по радиолокатору конвективная ячейка в районе между Прохладным и Моздоком, подчиняясь этому потоку, в отличие от облачной системы северо-восточнее Черкесска, двигалась на запад. Данное локальное атмосферное возмущение просуществовало до 23:00, смещаясь на северо-восток,

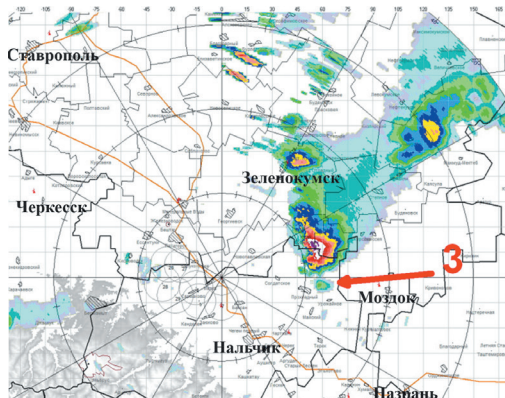
а) 19:00



б) 20:30



в) 21:15



г) 22:00

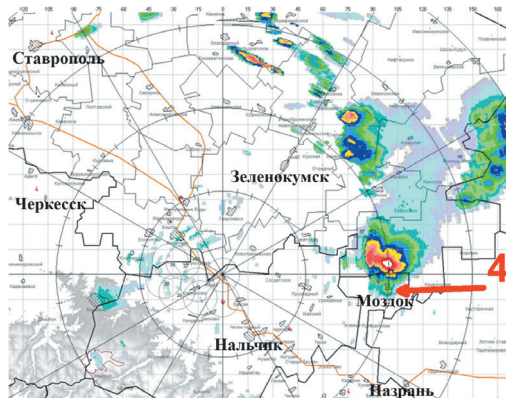


Рис. 5. Радиолокационная карта распределения отражаемости 19 августа 2015 г. для четырех моментов времени и четырех положений выбранной конвективной ячейки.

Fig. 5. Radar map of reflectivity distributions on August 19, 2015 for 4 times and 4 positions of the selected convective cell.

прослеживалось до высоты 650 гПа. После чего восточный перенос на 700—800 гПа сменился на западный и юго-западный, увлекая конвективную ячейку в этом же направлении.

Таким образом, причиной аномальной траектории конвективной ячейки в указанном районе могло явиться локальное атмосферное возмущение воздушного потока, который привёл к формированию восточного переноса в слое до 700 гПа.

Выводы

Проведенный анализ между синоптическими данными и прогностическими данными по модели атмосфера WRF-ARW подтвердил возможность

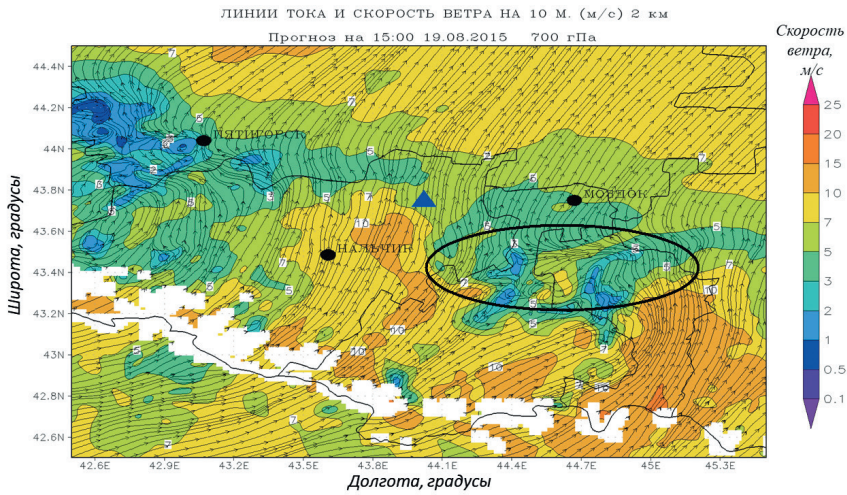


Рис. 6. Карта линий тока (линии со стрелками) и скорости ветра (цвет) на изобарической поверхности 700 гПа на 15:00 19 августа 2015 г.

Синий треугольник — точка вертикального разреза на рис. 7.

Fig. 6 Map of streamlines (lines with arrows) and wind speed (color) on an isobaric surface of 700 hPa at 15:00 on August 19, 2015.

The blue triangle is the point of the vertical section in Fig. 7.

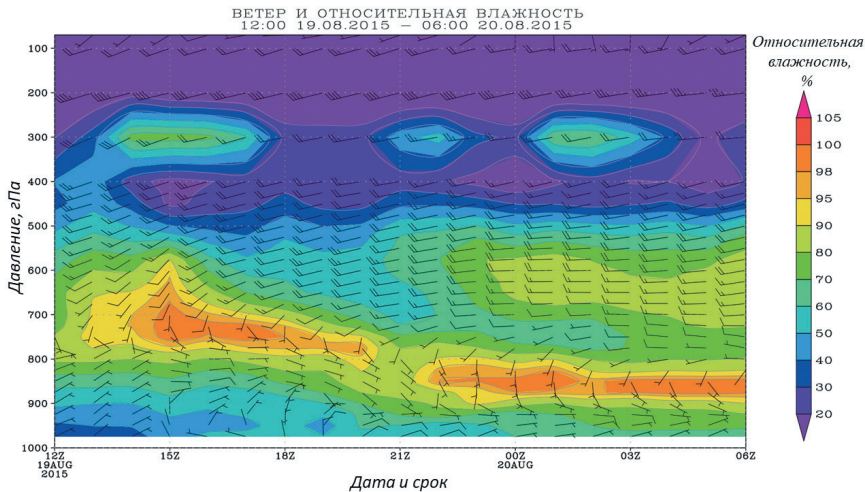


Рис. 7. Вертикальный разрез поля ветра и влажности для 19—20 августа 2015 г. в точке с координатами 43.75° с. ш., 44.02° в. д.

Fig. 7. Vertical section of the wind and humidity field for August 19—20, 2015 at a point with coordinates 43.75° N. latitude, 44.02° east. d.

использования последних для прогноза образования локальных атмосферных возмущений. Исследование поля ветра при проведении противогорговых работ 17 июля 2006 г. во время метеозащиты Санкт-Петербурга и 19 августа 2015 г. на территории Северного Кавказа, и сравнение его с полученным с помощью модели атмосфера WRF-ARW, показало наличие сдвига ветра, который оказывал влияние на общий ведущий поток. Это приводило к ухудшению качества проведения работ по АВ без учета данной прогностической информации. Таким образом, полученные результаты в ходе проведенных исследований, на наш взгляд, повысят эффективность работ по модификации облаков.

Список литературы

1. Кагермазов А. Х., Созаева Л. Т. Использование глобальной модели атмосферы (GFS NCEP) для прогноза грозоградных процессов с заблаговременностью до пяти суток // Гидрометеорология и экология. 2021. № 61. С. 671—680. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-671—680.
2. Калинин Р. А., Шихов А. Н., Быков А. В. Прогноз мезомасштабных конвективных систем на Урале с помощью модели WRF и данных дистанционного зондирования // Метеорология и гидрология. 2017. № 1. С. 16—28.
3. Рубинштейн К. Г., Игнатов Р. Ю., Набокова Е. В., Арутюнян Р. В. и др. Использование региональной негидростатической модели для получения метеорологических данных в задачах прогноза распространения и выпадения радионуклидов // Метеорология и гидрология. 2009. № 8. С. 27—38.
4. Айсин Д. Р., Гальперин С. М., Козлов В. Н., Шукин Г. Г. Активные воздействия на облака и осадки в Санкт-Петербурге во время проведения саммита Глав Государств и Правительства «Группы восьми» // Труды ГГО. 2007. Вып. 556. С. 215—229.
5. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J. et al. Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note. June 2008. 113 p. doi:10.5065/D68S4MVH.
6. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J. et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 4. NCAR Technical Note. January 2019. 128 p. doi: 10.5065/1DFH-6P97.
7. Смирнова М. М., Рубинштейн К. Г., Юшков В. П. Оценка воспроизведения региональной моделью характеристик пограничного слоя атмосферы // Метеорология и гидрология. 2011. № 12. С. 5—16.
8. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 Global Reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, July 2020, 1999—2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
9. Абшаев М. Т. Крупномасштабный суперячейковый градовый процесс на Северном Кавказе 19 августа 2015 г. // Евразийское научное объединение. 2017. Т. 1. № 7. С. 1—8.

References

1. Kagermazov A. Kh., Sozaeva L. T. Using the global atmospheric model (GFS NCEP) to forecast thunderstorm processes with a lead time of up to five days. *Gidrologiy i ekologiy = Hydrometeorology and Ecology*. 2021; (61):(671—680). (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-671-680.
2. Kalinin R. A., Shikhov A. N., Bykov A. V. Forecast of mesoscale convective systems in the Urals using the WRF model and remote sensing data. *Meteorologiy i gidrologiy = Meteorology and Hydrology*. 2017; (1):(16—28). (In Russ.).
3. Rubinshtein K. G., Ignatov R. Yu., Nabokova E. V., Arutyunyan R. V. et al. Using a regional non-hydrostatic model to obtain meteorological data in problems of forecasting the spread and fallout of radionuclides. *Meteorologiy i gidrologiy = Meteorology and Hydrology*. 2009; (8):(27—38). (In Russ.).
4. Aisin D. R., Galperin S. M., Kozlov V. N., Shchukin G. G. Active influences on clouds and precipitation in St. Petersburg during the G8 summit of Heads of State and Government. *Trudy glavnoi geofizicheskoi observatorii = Proceedings of the main geophysical observatory*. 2007; (556):(215—229). (In Russ.).

5. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O. et al. Description of the Advanced Research WRF Version 3. *NCAR Technical Note*. June 2008:113 p. doi:10.5065/D68S4MVH.
6. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O. et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 4. *NCAR Technical Note*. January 2019:128 p. doi: 10.5065/1DFH-6P97.
7. Smirnova M. M., Rubinshtein K. G., Yushkov V. P. Assessment of the regional model's reproduction of the characteristics of the atmospheric boundary layer *Meteorologiy i gidrologiy = Meteorology and Hydrology*. 2011; (12):(5—16). (In Russ.).
8. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, July 2020; (1999—2049). <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
9. Abshaev M. T. Large-scale supercell hail process in the North Caucasus August 19, 2015. *Evraziiskoe naychnoe obiedinenie = Eurasian Scientific Association*. 2017; 1(7):(1—8). (In Russ.).

Информация об авторах

Роман Юрьевич Игнатов, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, prognozist@gmail.com.

Андрей Викторович Частухин, канд. физ.-мат. наук, заместитель директора по научной работе, АНО «Агентство атмосферных технологий», a.chastuhin@mail.ru.

Андрей Михайлович Петрунин, канд. физ.-мат. наук, заместитель директора по оперативным проектам, АНО «Агентство атмосферных технологий», a.m.petrinin@mail.ru.

Information about authors

Roman Y. Ignatov, PhD (Phys. and Math. Sci.), Senior Researcher, Institute for Problems of Safe Development of Nuclear Energy Russian Academy of Sciences, prognozist@gmail.com.

Andrey V. Chastukhin, PhD (Phys. and Math. Sci.), Deputy Director for Research, ANO «Atmospheric Technology Agency», a.chastuhin@mail.ru.

Andrey M. Petrunin, PhD (Phys. and Math. Sci.), Deputy Director for Operational Projects, ANO «Atmospheric Technology Agency», a.m.petrinin@mail.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 17.04.2023

Принята к печати после доработки 01.05.2022

The article was received on 17.04.2023

The article was accepted after revision on 01.05.2022