

УДК 551.501.815

## **Способы оценки максимальной конвективной скорости в диагнозе и прогнозе опасных конвективных явлений погоды**

*А.А. Алексеева*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия  
antonida\_alekseeva@mail.ru*

Рассмотрены способы расчета максимальной скорости конвективных потоков в облаках на основе выходных данных гидродинамической модели REGION ФГБУ «Гидрометцентр России», а также спутниковой и метеорологической радиолокационной информации. Точность прогнозируемых максимальных конвективных скоростей существенно зависит от точности прогнозирования приземных значений температуры и влажности воздуха. Диагностические расчеты максимальной конвективной скорости на основе спутниковой и радиолокационной информации характеризуются высоким пространственным (порядка 4 км) и временным (10–15 мин) разрешением. Они позволяют уточнить краткосрочный прогноз опасных конвективных явлений погоды, особенно места и времени их возникновения. Предлагаемый подход к определению максимальной конвективной скорости в развитой конвективной облачности, а также ее расчет по спутниковым и метеорологическим радиолокационным данным, является разработкой ФГБУ «Гидрометцентр России». Он используется в методах прогноза опасных конвективных явлений погоды в летний период года, внедренных в оперативную практику, при разработке новых подходов к диагностированию параметров конвекции по данным сети ДМРЛ-С, при создании карт опасных конвективных явлений погоды, выпускаемых в ФГБУ «НИЦ «Планета».

*Ключевые слова:* максимальная конвективная скорость, гидродинамическая модель REGION, спутниковая информация, информация доплеровских локаторов ДМРЛ-С, прогноз, диагноз

**DOI:** <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-2-6-22>

## **Methods to estimate maximum convective velocity for the diagnosis and forecasting of severe convective weather events**

*A.A. Alekseeva*

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,  
Moscow, Russia  
antonida\_alekseeva@mail.ru*

Methods for calculating the maximum velocity of convective updrafts in clouds based on output data of the REGION hydrodynamic model (Hydrometcentre of Russia), as well as on satellite and radar information, are considered. The accuracy of predicted maximum convective velocities largely depends on the accuracy of surface air temperature and humidity prediction. The diagnostic calculations of maximum convective

velocity based on satellite and radar data are characterized by the high spatial (about 4 km) and temporal (10-15 minutes) resolution. They allow updating a short-range forecast of severe convective weather events, especially the place and time of their occurrence. The proposed approach to the determination of maximum convective velocity in mature convective clouds as well as its calculation based on satellite and weather radar data was developed at Hydrometcentre of Russia. It is utilized in the methods for forecasting severe convective weather events in summer implemented to operational practice for developing new approaches to the diagnosis of convection parameters from DMRL-C data and for constructing the maps of severe convective weather events produced by «Planeta» Research Centre.

*Keywords:* maximum convective velocity, REGION hydrodynamic model, satellite data, DMRL-C Doppler radar data, forecast, diagnosis

## Введение

Формирование погоды относится к очень сложным процессам, в которых задействовано множество сил. Они, в свою очередь, образуют большое количество цепей обратной связи, поэтому прогноз погоды есть установление вероятностей. Вертикальные движения в тропосфере принадлежат к числу коренных причин формирования погоды. Рассматривая облако как динамическую систему, возникновение, рост и рассеивание в результате крупномасштабных движений в атмосфере, можно говорить о макрофизическом аспекте.

Образование же непосредственно конвективных облаков связано с восходящим движением воздушных масс, которое может возникнуть в результате действия фронтальных или внутримассовых (прогрева подстилающей поверхности) процессов, а также особенностей орографии. При этом стратификация атмосферы становится неустойчивой, и в зависимости от величины и характера высвобождающейся энергии при разрешении неустойчивости и других причин в тропосфере возникают и развиваются атмосферные процессы с грозами, нередко сопровождающиеся сильными ливнями, шквалами, торнадо и выпадением града. Нужна большая изобретательность, чтобы проанализировать конвективный шторм как термодинамический процесс, подчиненный тем же законам физики, которые изучаются в лабораториях, то есть до сих пор нельзя сказать, что такие процессы полностью изучены.

Не зная того, как осуществляется подъем воздушных масс в конвективном облаке, как меняются параметры потока в пространстве и времени, нельзя понять механизм образования ливневых осадков, шквалов, торнадо, а значит, дать их прогноз с достаточной для принятия превентивных мер защиты заблаговременностью. Структурный состав грозовых процессов обычно представляет собой комплекс очагов, каждый из которых является единицей конвективной циркуляции, объединяющей как восходящие, так и нисходящие потоки. В каждом очаге происходит собственный цикл развития во временном интервале от 30 мин до часа.

Очаги при этом развиваются различными темпами, некоторые могут уже затухать, другие в это время ускоряются в своем развитии, нередко сливаются. В восходящих потоках воздух имеет тенденцию к циклоническому вращению, иногда создавая при сильных грозах особенно благоприятные условия для формирования торнадо.

Попытки установить корреляционные зависимости между величиной всей энергии неустойчивости, количеством осадков и диаметром града не дали положительного результата [31]. Поэтому многие исследователи при оценке параметров конвективного облака используют скорость восходящих потоков, мощность облака, но не величину энергии неустойчивости. Величина максимальной скорости конвективного потока является одной из наиболее важных характеристик термодинамической неустойчивости атмосферы, обуславливающей развитие мощных кучево-дождевых облаков. Она определяет размер града, количество выпадающих осадков, является основным параметром атмосферы, характеризующим возникновение шквала и торнадо, то есть от ее величины зависит характер и интенсивность процессов возникновения и развития зон активной конвекции (ЗАК).

Максимальные значения скорости восходящего потока в кучево-дождевом облаке по данным наблюдений составляют 25–60 м/с [34]. Максимальная конвективная скорость  $W_m$  является основополагающим предиктором во многих методах прогноза конвективных явлений погоды, использующихся в оперативной практике синоптиков России [28, 29], а также в автоматизированных методах прогноза, рекомендованных к использованию на практике решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета [1–3, 6, 7]. К таким методам можно отнести и метод прогноза сильных шквалов [13]. Но рассчитать максимальную конвективную скорость не так просто, поэтому многие исследователи, а также прогнозисты оценивают косвенно конвективную неустойчивость через температурные и влажностные параметры атмосферы на разных уровнях, например [23, 24], а также с использованием индексов неустойчивости [12, 19, 25, 30].

Целью представленной работы является демонстрация того, как максимальные скорости конвективных движений оцениваются на основе модельных данных, а также цифровой спутниковой и радиолокационной информации (в том числе доплеровских локаторов ДМРЛ-С) во внедренных в практику методах прогноза опасных конвективных явлений погоды и подходах к их диагностированию.

Исходя из вышесказанного о важности максимальной конвективной скорости как количественного показателя интенсивности конвекции, можно утверждать, что результаты представляемых исследований являются актуальными и практически значимыми.

### Способы расчета максимальной скорости конвективного потока

Наиболее известными методами для оценки (расчета) величины скорости восходящего конвективного потока, активно используемыми на практике за рубежом и в России, по данным стратификации атмосферы являются метод частицы [29, 32] и метод слоя [26], способы Н.В. Лебедевой [20], Н.С. Шишкина [33] и Н.И. Глушковой [29, 31].

По методу частицы скорость восходящего потока рассчитывается без учета потерь тепла на компенсирующее опускание сухого воздуха [29, 32], что, конечно же, является искусственным допущением.

Метод слоя, предложенный Бьеркнесом [35] и развитый в дальнейшем Петерсеном [26] и Шишкиным [33], учитывает нисходящие движения в окружающей среде. Основными допущениями, положенными в основу метода слоя, являются следующие. Предполагается, что нисходящие движения являются сухоадиабатическими, а восходящие – влажноадиабатическими, количество поднимающегося воздуха равно количеству опускающегося. Кроме того, допускается отсутствие горизонтальных перемещений воздуха.

По методу Н.В. Лебедевой на поверхностях, кратных 100 гПа, определяется среднее отклонение кривой состояния от кривой стратификации. По этому значению рассчитывается средняя скорость конвективного потока [20]. Однако опасные явления определяются не средней, а максимальной скоростью восходящего потока.

Н.С. Шишкиным получена формула для расчета скорости роста облачной башни, которая представляет собой осредненную скорость подъема облачной массы в данном слое [33].

Исследования, проведенные в Высокогорном геофизическом институте [31], показали, что прослеживается четкая корреляционная связь между параметрами конвективного облака и лишь той частью энергии неустойчивости, которая заключена между уровнем конденсации и уровнем максимальной скорости конвективного потока (т. е. в слое активного облакообразования), а не всей энергией неустойчивости. Это был принципиально новый вывод относительно принятых в метеорологии мнений по этому вопросу. Он утверждал, что критерий развития конвекции можно определить не только соотношением масс восходящего и нисходящего потоков, но и соотношением масс слоев воздуха, участвующих в конвекции. Н.И. Глушковой на основе анализа экспериментальных данных, расчета энергии неустойчивости влажнонеустойчивого слоя и сопоставления расчетов с фактическими данными получена формула для расчета максимальной скорости конвективного потока [29, 31]:

$$W_m = \sqrt{2\eta c_p \Delta T_{\max} \lg \frac{P_1}{P_2}}, \quad (1)$$

где  $W_m$  – величина максимальной скорости конвективного потока, м/с;  $\Delta T_{\max}$  – максимальное отклонение кривой состояния от кривой стратификации на верхней границе влажнонеустойчивого слоя (по методу частицы);  $P_1$  и  $P_2$  – давление на уровне конденсации и верхней границы влажнонеустойчивого слоя;  $\eta$  – коэффициент, показывающий, какая часть тепла во влажнонеустойчивом слое расходуется на компенсирующее опускание сухого воздуха;  $c_p$  – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

В рекомендованных ЦМКП Росгидромета методах прогноза опасных конвективных явлений [1–3, 6, 7] реализуется одномерная стационарная модель конвекции, а скорость максимальных конвективных потоков на ее основе вычисляется по методу Н.И. Глушковой по формуле (1). Расчеты производятся на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России [21]. Пример расчета максимальной конвективной скорости данным способом приведен на рис. 1а.

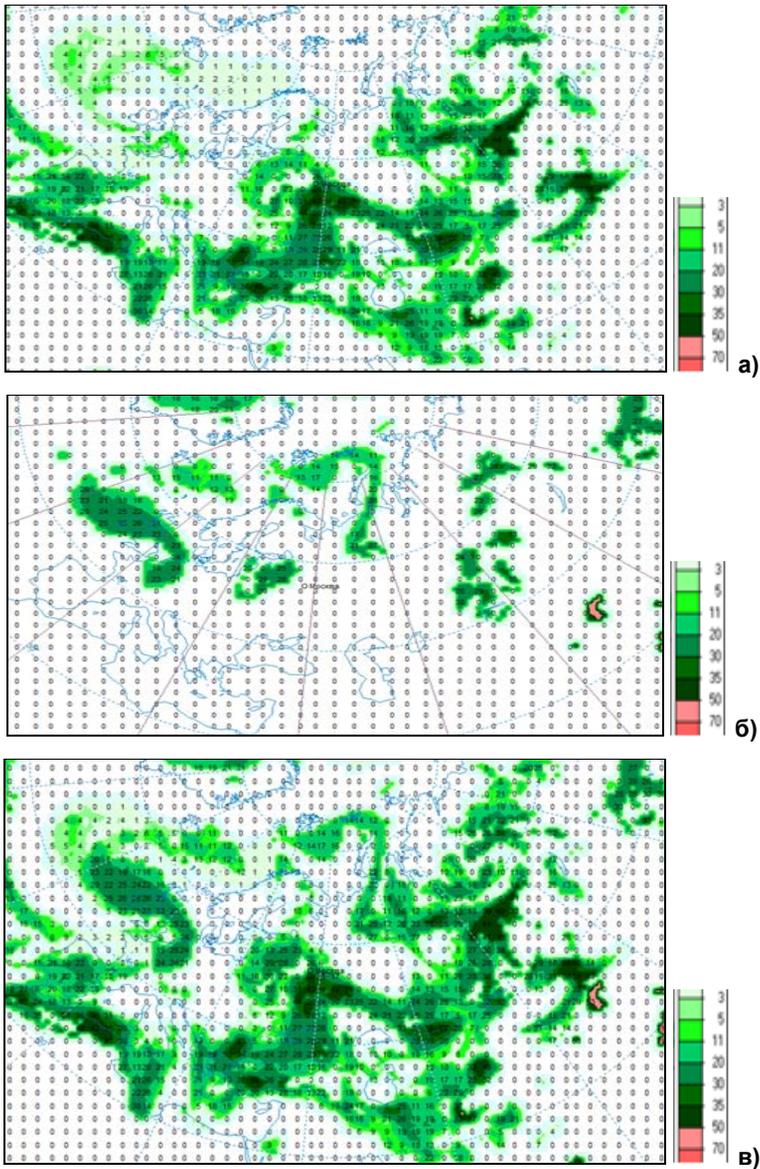
Наибольший запас энергии неустойчивости атмосферы отмечается перед началом развития конвекции [14, 15]. Определение параметров конвекции по данным стратификации атмосферы при уже развитой конвективной облачности, связанной с циклонами и фронтами, не имеет физического смысла, поскольку в таком облаке кривая состояния будет близка к кривой стратификации. В методах прогноза [1–3, 6, 7], рекомендованных ЦМКП Росгидромета к внедрению в оперативную практику, и в [13] максимальная конвективная скорость ( $W_{m\_вл}$ ) в таких случаях рассчитывается по экспериментальной зависимости по значению массовой доли влаги у поверхности земли и мощности конвекции [22]:

$$W_{m\_вл} = \frac{0,23 \cdot 3,79 \cdot \exp\left(\frac{17,13 Td}{Td + 235}\right)}{0,85(H_m - H_k)}, \quad (2)$$

где  $Td$  – температура точки росы у поверхности земли, °С;  $H_m$  и  $H_k$  – высоты верхней и нижней границ кучево-дождевого облака, соответственно, км.

Расчеты по (2) производятся при определенных условиях развития ЗАК, а именно: средних значениях дефицита точки росы  $\overline{d_{8,7}} < 3,0$  °С в слое 850–700 гПа,  $\overline{d_{5,4}} \leq 4,0$  °С в слое 500–400 гПа и дефиците точки росы  $d_4 \leq 3,5$  °С на уровне 400 гПа.

Пример расчета максимальной конвективной скорости по формуле (2) на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России приведен на рис. 1б.



**Рис. 1.** Карты прогноза максимальной конвективной скорости, м/с: по формуле (1) (а); по формуле (2) (б); максимальное значение по (1) и (2) (в) на 15 ч ВСУ 15.06.2012 г. с заблаговременностью 15 ч на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России.

**Fig. 1.** The forecast maps for the maximum convective velocity (m/s): based on (1) (а); based on (2) (б); the maximum value of (1) and (2) (в) for 15.00 UTC on June 15, 2012 with a lead time of 15 hours based on the output data of the regional model of Hydrometcentre of Russia.

Во внедренных в практику автоматизированных методах прогноза опасных конвективных явлений уже более 10 лет используется максимальное из рассчитанных по формулам (1) и (2) значение максимальной конвективной скорости. Пример прогноза результирующего значения максимальной конвективной скорости представлен на рис. 1в.

В исследовании [13] показано, что на выборке размером более 120 тыс. случаев результирующая максимальная скорость конвективных потоков, наибольшая из рассчитанных по (1) и (2), оказалась наиболее информативным предиктором для прогноза шквалов среди 73 рассмотренных предикторов. Причем в список этих предикторов входили и максимальные скорости конвективного потока, по отдельности рассчитанные по (1) и (2).

Практикующий в России синоптик, как правило, имеет возможность рассчитывать максимальные конвективные скорости по аэрологическим данным в лучшем случае два раза в сутки. Конвективные скорости, рассчитанные в рамках гидродинамических моделей, как правило, синоптику не доступны, так как являются внутренним «продуктом» модели и в базы данных выходной продукции не записываются и не передаются на сеть.

В связи с вышесказанным большую роль приобретает расчет максимальной скорости конвективного потока по данным спутниковой информации, зарекомендованный на практике [4, 5, 9, 10, 17, 28], а также по радиолокационным данным [8, 16].

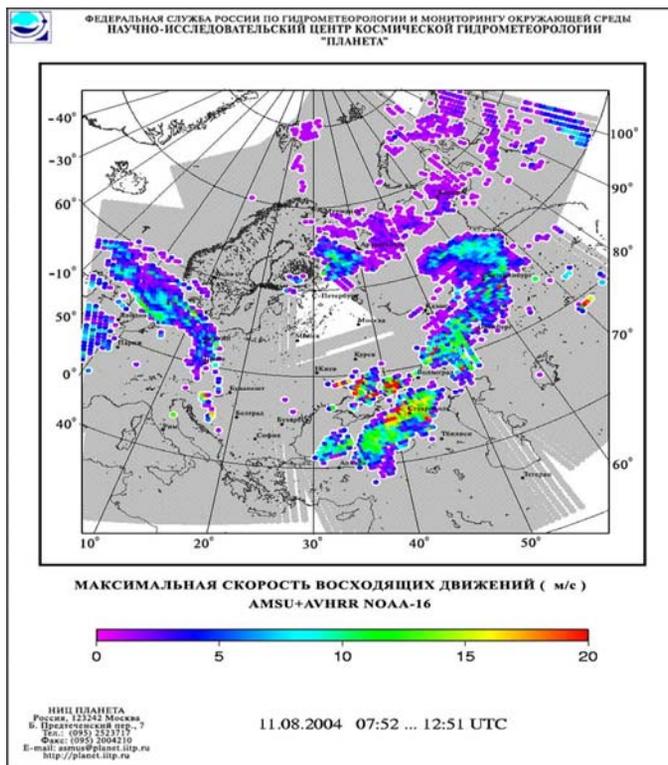
Получена зависимость  $W_m$  от высоты верхней границы кучево-дождевого облака  $H_m$ , км [15, 17, 28]:

$$W_m = kH_m^2. \quad (3)$$

Для кучево-дождевых облаков  $k = 0,18$  при коэффициенте корреляции 0,82; для кучево-дождевых облаков, развивающихся на фоне слоисто-дождевых,  $k = 0,09$  при коэффициенте корреляции 0,78.

Высоту верхней границы облаков можно определить как по данным радиозондирования в невозмущенной атмосфере или по модели конвекции, так и по данным радиолокационных и спутниковых наблюдений. Зависимость, описанная формулой (3), положена в основу расчета  $W_m$  по снимкам облачности с ИСЗ [28], а также по цифровым спутниковым данным [4, 9].

Пример расчета максимальной скорости конвективного потока по цифровым данным спутниковых наблюдений приведен на рис. 2. В настоящее время максимальные скорости конвективного потока рассчитываются в ФГБУ «НИЦ «Планета» на основе и других спутников (Meteosat-10, MTSAT-IR и др.) [5, 10, 11]. Их значение является основополагающим в диагностике опасных конвективных явлений на основе цифровой спутниковой информации. Данные о диагностируемых опасных конвективных явлениях в оперативном режиме (каждые 15 мин) передаются потребителям [11].



**Рис. 2.** Карта рассчитанных максимальных конвективных скоростей (м/с) на 11.08.2004 г., сроки 07.52 ... 12.51, по цифровой спутниковой информации AMSU + AVHRR NOAA-16.

**Fig. 2.** The map of calculated maximum convective velocities (m/s) for August 11, 2004 for the time moments 07:52 ... 12:51 based on AMSU + AVHRR NOAA-16 digital satellite information.

Информация одного метеорологического локатора позволяет анализировать ход только мезомасштабных атмосферных процессов. Это заведомо снижает заблаговременность и точность прогноза опасных конвективных явлений погоды, связанных с прохождением атмосферных фронтов. Сеть метеорологических радиолокаторов расширяет возможность использования радиолокационной информации на синоптическом масштабе. Ранее в результате проведенных исследований разработан комплекс методов диагноза и прогноза опасных конвективных явлений, вошедших в Руководство [28], на основе использования радиолокационных и спутниковых данных наблюдений. Для расчета максимальной скорости конвективного потока по радиолокационным данным определена взаимосвязь  $W_m$  и  $H_m \lg z_m$ , где  $H_m$  – максимальная верхняя граница облака;  $\lg z_m$  – максимальная радиолокационная отражаемость от облака. Коэффициент корреляции между параметрами  $W_m$  и  $\lg z_m$  оказался

низким, а между  $W_m$  и  $H_m \lg z_m$  – высоким (0,82). Уравнение регрессии ( $W_m$  в м/с) имеет вид [8, 15, 28]:

$$W_m = 0,36H_m \lg z_m + 3,52. \quad (4)$$

### **Расчет максимальной скорости конвективных потоков на основе данных ДМРЛ-С**

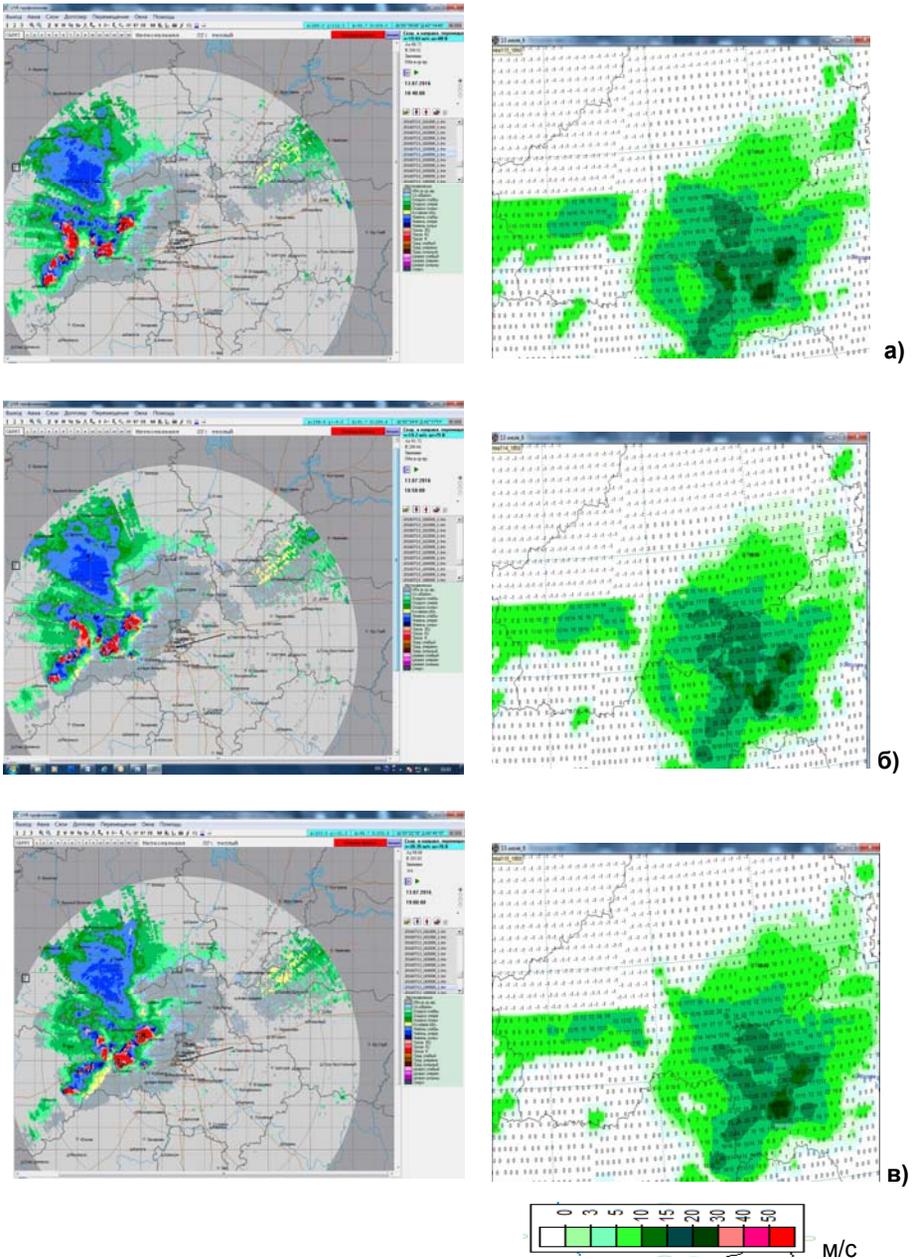
В [8] подробно изложен способ расчета максимальной скорости конвективного потока по данным доплеровских локаторов ДМРЛ-С, в последнее время внедренных в России в производственную практику в процессе расширения радиолокационной сети.

Для расчета используются данные 10-минутных наблюдений. В каждом узле расчетной сетки  $0,05^\circ \times 0,05^\circ$  базы данных DMRL-С, созданной в ФГБУ «Гидрометцентр России», выбирается значение горизонтальной отражаемости на 11 уровнях и находится максимум (максимальная радиолокационная отражаемость ДМРЛ-С,  $dBZ_m$  в  $dBZ$ ). Считывается в узле также значение верхней границы облачности. При этом значение  $H_m$  в формуле (5) берется в километрах. Максимальная конвективная скорость (м/с) рассчитывается следующим образом:

$$W_{m\_ДМРЛ-С} = 1,33[0,038H_m (dBZ_m - 18) + 3,52] + 4,0. \quad (5)$$

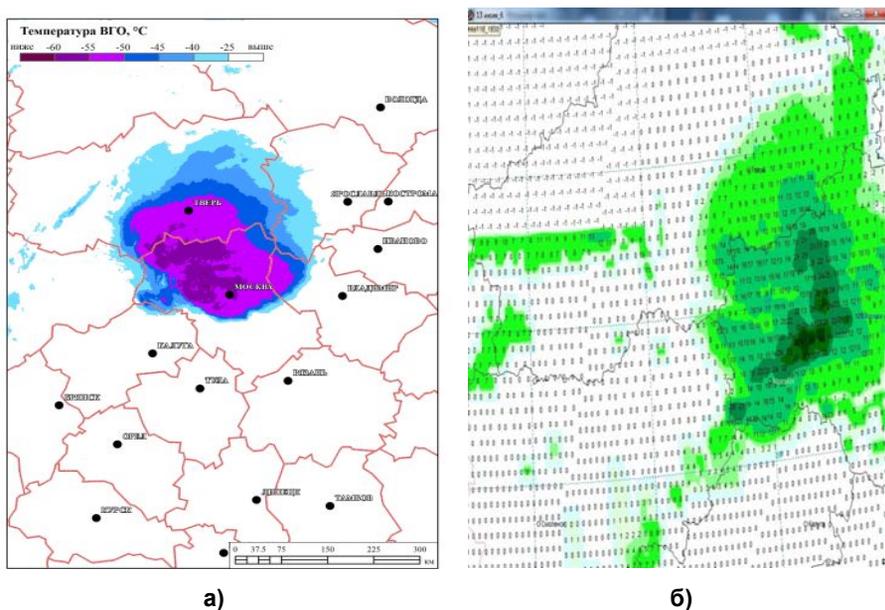
Рассмотрим случай диагностирования максимальной конвективной скорости на примере 13 июля 2016 г. для территории Московской области. На рис. 3 (слева) представлены данные о типах облачности и метеорологических явлениях ДМРЛ-С «Профсоюзная» г. Москвы за сроки наблюдений 18.40, 18.50 и 19.00 ВСВ, а справа – диагностированные предлагаемым алгоритмом [8] значения максимальной конвективной скорости (м/с) за эти же сроки. Значение «-1» на карте максимальных конвективных скоростей означает отсутствие данных ДМРЛ-С. Как видно из рис. 3, дополнительная информация о максимальной конвективной скорости позволяет увидеть более детальную картину развития ЗАК в реальном времени, синхронном с уже имеющейся радиолокационной информацией.

На рис. 4 для сравнения приведены карта радиационной температуры на верхней границе облаков по данным ИСЗ за 19.30 ч ВСВ 13.07.2016 г. (слева) и диагностированные максимальные конвективные скорости по данным ДМРЛ-С за этот же срок (справа). Как видим, анализ в комплексе представленных спутниковых и радиолокационных данных позволяет более детально анализировать ЗАК и более точно сделать выводы относительно интенсивности возможных опасных конвективных явлений. 10-минутная детальность таких данных (а также использование в дополнение данных о верхней границе облачности) позволит отслеживать эволюцию ЗАК.



**Рис. 3.** Данные о типах облачности и метеоявлениях по данным ДМРЛ-С «Профсоюзная» (слева) и диагностированные максимальные конвективные скорости (справа) по данным ДМРЛ-С за сроки 18.40 (а), 18.50 (б) и 19.00 (в) ч ВСВ 13.07.2016 г.

**Fig. 3.** Data on cloud types and weather phenomena according to DMRL-C Profsoyuznaya (on the left) and diagnosed maximum convective velocities (on the right) according to DMRL-C data for (a) 18.40, (б) 18.50, and (в) 19.00 UTC on July 13, 2016.



**Рис. 4.** Температура на верхней границе облачности по данным ИСЗ (а) и диагностированные максимальные конвективные скорости (м/с) по данным ДМРЛ-С (б) за срок 19.30 ВСВ 13.07.2016 г.

**Fig. 4.** The cloud top temperature according to satellite data (a) and the diagnosed maximum convective velocities (m/s) according to DMRL-C data (b) for 19.30 UTC on July 13, 2016.

В настоящее время предлагаемый в [8] алгоритм реализован [27], рассчитанные значения максимальных конвективных скоростей на основе данных ДМРЛ-С с 10-минутным разрешением с шагом сетки  $0,05^\circ \times 0,05^\circ$  по ЕТР с 1.08.2019 г. (в летний период) записываются в базу данных DW Гидрометцентра России один раз в час с небольшой задержкой относительно реального времени. Диагностированные максимальные конвективные скорости по данным ДМРЛ-С использовались при анализе активных конвективных процессов с опасными конвективными явлениями погоды в Центральном регионе ЕТР в летние периоды 2016–2019 гг. Результаты анализа показали, что поле максимальных конвективных скоростей сети ДМРЛ-С с детализацией по площади 4 км и времени 10 мин позволяет уточнить краткосрочный прогноз опасных конвективных явлений погоды, особенно времени и места их возникновения.

Доплеровский локатор измеряет суммарный вертикальный поток воздуха, включая относительную скорость выпадения осадков. Основные движения, обнаруженные локатором, скорее вызваны скоростями падения осадков, чем вертикальными потоками воздуха. Поэтому вертикальные движения, обнаруженные доплеровским локатором, являются не очень эффективным количественным показателем активной конвекции [18]. А максимальные конвективные скорости, оцененные по данным ДМРЛ-С,

позволят дополнить имеющиеся радиолокационные данные эффективным количественным показателем развития зон активной конвекции.

### Заключение

На основе результатов довольно продолжительного периода исследований можно констатировать, что максимальная конвективная скорость является одним из основных параметров атмосферы, характеризующим развитие активной конвекции. Она является предиктором во многих методах диагноза [9, 28] и прогноза опасных конвективных явлений погоды [1–3, 6, 7, 28, 29], поэтому важно иметь как можно более точные и детализированные по времени и пространству данные о ней. Рассчитанные на основе цифровой спутниковой и радиолокационной информации (данных ДМРЛ-С) значения максимальной конвективной скорости помогут синоптику-практику уточнять краткосрочные прогнозы опасных конвективных явлений, в том числе реализованные на данных численных моделей, а также штормовые оповещения. Такие диагностические данные, в отличие от максимальных конвективных скоростей, рассчитанных на основе данных радиозондирования, имеют высокое пространственное разрешение и диагностируются на основе использования данных доплеровских локаторов (ДМРЛ-С) и цифровой спутниковой информации каждые 10 и 15 мин соответственно.

Формула расчета максимальной конвективной скорости (2) позволяет рассчитывать ее при уже развитой конвективной облачности, связанной с циклонами и фронтами, когда определение параметров конвекции по данным стратификации атмосферы не имеет физического смысла, поскольку кривая стратификация в облаке оказывается близка к кривой состояния.

Таким образом, показано, что важный параметр конвекции можно рассчитать на основе использования выходных данных гидродинамических моделей, аэрологической, спутниковой и радиолокационной информации. Если на точность расчета максимальной конвективной скорости на основе модельных данных большое влияние оказывает точность прогноза приземных температуры и влажности, то при использовании радиолокационной и спутниковой информации удастся избежать подобных ошибок за счет данных параметров. Кроме того, поскольку на данный момент автоматизированные методы прогноза опасных конвективных явлений, рекомендованные для использования в практике решениями ЦМКП Росгидромета, внедрены со статусом фоновых или вспомогательных и консультативных, роль диагностированных значений максимальных конвективных скоростей по спутниковым и радиолокационным данным, обладая детальным пространственным и временным разрешением, велика. Они полезны в уточнении прогноза таких явлений, особенно времени и места их осуществления, точность которых невелика при численном прогнозе. Кроме того, возможность расчета максимальной конвективной

скорости на основе цифровой спутниковой информации позволила разработать способ определения параметров атмосферных явлений в районах с облачным покровом [9], реализованный в ФГБУ «НИЦ «Планета» и более десяти лет использующийся на практике [11]. Расчет максимальной конвективной скорости по данным ДМРЛ-С открывает новые возможности при диагностировании опасных конвективных явлений погоды, уточнении их интенсивности. Возможно, данный подход найдет применение и при наукастинге таких явлений.

Выражаю благодарность сотрудникам ФГБУ «Гидрометцентр России»: В.М. Лосеву за предоставленные модельные данные, В.М. Бухарову за помощь в реализации алгоритма расчета максимальной конвективной скорости по данным ДМРЛ-С, В.Д. Жупанову, Д.Я. Прессману и А.Ю. Недачиной за создание базы данных ДМРЛ-С, Ю.В. Алферову за предоставленную возможность визуализации результатов исследований графическим пакетом Изограф, сотруднику ФГБУ «НИЦ «Планета» **М.В. Бухарову** за предоставленную спутниковую информацию.

The author thanks the specialists of Hydrometcentre of Russia V.M. Losev for the access to model data, V.M. Bukharov for assistance in implementing the algorithm for the calculation of the maximum convective velocity based on DMRL-C data, V.D. Zhupanov, D.Ya. Pressman and A.Yu. Nedachina for the organization of the DMRL-C database, Yu.V. Alferov for the opportunity to visualize the results of the studies with the Isograph graphic package and the specialist of RSC Planeta M.V. Bukharov for the access to satellite information.

#### Список литературы

1. Алексеева А.А. Методы прогноза максимального количества осадков в зонах активной конвекции и альтернативного прогноза сильных ливней и шквалов // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2007. Информационный сборник № 34. С. 49-69.
2. Алексеева А.А. Метод прогноза сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2014. № 9. С. 5-15.
3. Алексеева А.А. Прогноз ураганных ветров внетропических циклонов на территории России // Метеорология и гидрология. 2017. № 1. С. 5-15.
4. Алексеева А.А., Бухаров М.В. Распознавание ливней и града по измерениям уходящего теплового излучения земли со спутника NOAA // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. № 1. С. 387-392.
5. Алексеева А.А., Бухаров М.В., Лосев В.М., Соловьев В.И. Диагноз осадков и гроз по измерениям уходящего теплового излучения облачности с геостационарных спутников // Метеорология и гидрология. 2006. № 8. С. 33-42.
6. Алексеева А.А., Глушкова Н.И. Способ прогноза стихийных конвективных гидрометеорологических явлений теплового периода: Патент на изобретение RUS 2162237. Бюлл. изобр. № 2 от 20.01.2001.
7. Алексеева А.А., Лосев В.М. Прогноз сильных летних осадков на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 351. С. 43-63.

8. *Алексеева А.А., Песков Б.Е.* Оценка максимальной скорости конвективного потока, характеристик ливневых осадков и града по радиолокационной информации // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 360. С. 135-148.
9. *Бухаров М.В., Алексеева А.А.* Способ определения параметров атмосферных явлений в районах с облачным покровом: Патент на изобретение RUS 2323459 02.04.2004.
10. *Бухаров М.В., Соловьев В.И., Алексеева А.А., Лосев В.М.* Оценка метеорологических параметров в облачности по спутниковым снимкам // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Вып. 3. Том 1. С. 77-82.
11. *Бухаров М.В., Кухарский А.В., Мисник Л.А.* Автоматизированное рабочее место «Планета-метеобзор» для мониторинга опасных атмосферных явлений, связанных с конвективной облачностью // Метеорология и гидрология. 2008. № 2. С. 64-69.
12. *Быков А.В., Ветров А.Л., Калинин Н.А.* Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 363. С. 101-119.
13. *Васильев Е.В., Алексеева А.А., Песков Б.Е.* Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2009. № 1. С. 5-15.
14. *Глушкова Н.И.* Физические условия формирования мощных кучево-дождевых облаков и явлений, связанных с ними (грозы, града и ливня) // Труды Гидрометцентра СССР. 1974. вып. 136. С. 12-16.
15. *Глушкова Н.И.* Исследование взаимосвязи между различными параметрами облака и атмосферы при выпадении ливней и града // Труды Гидрометцентра СССР. 1978. Вып. 201. С. 38-46.
16. *Глушкова Н.И.* Об усовершенствовании прогнозов ливневых осадков и размера града с использованием радиолокационных данных // Труды Гидрометцентра СССР. 1978, Вып. 201. С. 51-56.
17. *Глушкова Н.И.* Прогноз осадков по данным спутниковых и радиолокационных наблюдений // Труды Гидрометцентра СССР. 1985. Вып. 266. С. 21-33.
18. *Дональдсон Р.Дж., Чмела А.К.* Распределение средней вертикальной скорости в грозе и ее вариации. Проблемы радиолокационной метеорологии // Сборник статей из трудов двенадцатой и тринадцатой конференций по радиолокационной метеорологии: Пер. с англ. Л.: Гидрометеониздат, 1971. 187 с. С. 46-54.
19. *Калинин Н.А.* Мониторинг, моделирование и прогноз состояния атмосферы в умеренных широтах. Пермь: Пермский государственный университет, 2015. 308 с.
20. *Лебедева Н.В.* Построение модели конвекции и расчет количества ливневых осадков // Труды ЦИП. 1954. Вып. 31 (58). С. 3-30.
21. *Лосев В.М.* Региональная гидродинамическая модель прогноза Гидрометцентра России // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада лтд, 2010. С. 36-58.
22. *Отчет* о выполнении научно-исследовательской работы Государственного научного центра Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. Моделирование региональных процессов и развитие методов прогнозов неблагоприятных гидрометеорологических явлений. № гос. регистрации 01200212070, Москва, 2002.
23. *Переходцева Э.В.* Прогноз сильных шквалов и смерчей в летний период 2009 года на основе статистических моделей // Труды Гидрометцентра России. 2010. Вып. 344. С. 265-279.
24. *Переходцева Э.В.* О гидродинамико-статистическом прогнозе до двух суток явлений сильного ветра и сильных осадков для территории Северного Кавказа // Труды Гидрометцентра России. 2012. Вып. 347. С. 101-111.
25. *Песков Б.Е.* Исследование условий развития гроз и шквалов с помощью диагностических диаграмм вероятности и индексов неустойчивости // Труды Гидрометцентра СССР. 1967. Вып. 13. С. 21-31.
26. *Петерсен С.* Анализ и прогноз погоды. Л.: Гидрометеониздат, 1961. 652 с.
27. Программа расчета максимальных скоростей конвективных движений по данным сети доплеровских локаторов ДМРЛ-С: Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2019662109 от 17.09.2019.

28. РД 52.27.339-93. Руководство по диагнозу и прогнозу осадков, града и шквалов (опасных и стихийных) по данным МРЛ и ИСЗ. М.: Росгидромет, 1996. 180 с.
29. *Руководство* по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 702 с.
30. *Спрыгин А.А., Прохареня М.И.* Диагноз и прогноз конвективных структур с опасными явлениями по данным моделирования и дистанционного зондирования над территорией Беларуси и Центральной России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3 (369). С. 6-22.
31. *Сулаквелидзе Г.К., Глушкова Н.И., Федченко Л.М.* Прогноз гроз, града и ливневых осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 188 с.
32. *Халтинер Дж.* Динамическая и физическая метеорология. Л., Гидрометеиздат, 1961. 435 с.
33. *Шишкин Н.С.* Облака, осадки и грозовое электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 351 с.
34. *Шметер С.М., Силаева В.И.* Вертикальные потоки внутри кучево-дождевых облаков // Метеорология и гидрология. 1966. № 10. С. 7-13.
35. *Bjerknes J.* Saturated-adiabatic ascent of air through dry-adiabatically descending environment // Q. J. Roy. Met. Soc. 1938. Vol. 64, no. 275.

### References

1. *Alekseeva A.A.* Metody prognoza maksimal'nogo kolichestva osadkov v zonah aktivnoi konvekcii i alternativnogo prognoza sil'nyh livnei i shkvalov. *Rezul'taty ispytaniya novyh i usovershenstvovannykh tekhnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. Informacionnyi sbornik*, 2006, vol. 34, pp. 49-69 [in Russ.].
2. *Alekseeva A.A.* A method of forecasting severe squalls. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 39, no. 9, pp. 569-576. DOI: 10.3103/S1068373914090015.
3. *Alekseeva A.A.* Forecasting hurricane winds in extratropical cyclones in Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 1, pp. 1-8. DOI: 10.3103/S1068373917010010.
4. *Alekseeva A.A., Bukharov M.V.* Raspoznavanie livney i grada po izmereniyam uhodyashchego teplovogo izlucheniya zemli so sputnika NOAA. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space]*, 2004, no. 1, pp. 387-392 [in Russ.].
5. *Alekseeva A.A., Bukharov M.V., Losev V.M., and Solov'ev V.I.* Diagnosis of Precipitation and Thunderstorms from Measurements of Outgoing Heat Radiation of a Cloud Cover from Geostationary Satellites. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2006, vol. 31, no. 8, pp. 20-26.
6. *Alekseeva A.A., Glushkova N.I.* Sposob prognoza stihyinykh konvektivnykh gidrometeorologicheskikh yavleniy teplogo perioda: Patent na izobretenie RUS 2162237. *Byull. izobr.* № 2 ot 20.01.2001 [in Russ.].
7. *Alekseeva A. A.* Forecast of heavy summer precipitation based on the output of a regional model of the Hydrometcenter of Russia. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2014, vol. 351, pp. 43-63 [in Russ.].
8. *Alekseeva A.A., Peskov B.E.* Assessment of the maximum speed of convective flow, characteristics of heavy rain and hail using radar information. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 360, pp. 135-148 [in Russ.].
9. *Bukharov M.V., Alekseeva A.A.* Sposob opredeleniya parametrov atmosferynykh yavleniy v rayonah s oblachnym pokrovom [Method for determining parameters of atmospheric phenomena in areas with cloud cover. Patent na izobretenie RUS 2323459 02.04.2004 [in Russ.].
10. *Bukharov M.V., Solov'ev V.I., Alekseeva A.A., Losev V.M.* *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space]*, 2006, no. 3, Vol. 1, pp. 77-82 [in Russ.].
11. *Bukharov M.V., Kukharskii A.V., Misnik L.A.* Automated work place "Planeta-Meteoobzor" for monitoring hazardous weather associated with convective clouds. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2008, vol. 33, pp. 102-105. DOI: 10.3103/S1068373908020064.

12. Bykov A.V., Vetrov A.L., Kalinin N.A. The forecast of dangerous convective phenomena in the Perm Krai with use of global prognostic models. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometeorological Centre of Russia]*, 2017, vol. 363, pp. 101-119. [in Russ.].

13. Vasil'ev E.V., Alekseeva A.A., Peskov B.E. Conditions for formation and short-range forecasting of severe squalls. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2009, vol. 34, no. 1, pp. 1-7. DOI: 10.3103/S1068373909010014.

14. Glushkova N.I. Fizicheskie usloviya formirovaniya moshchnykh kuchevo-dozhdnykh oblakov i yavleniy, svyazannykh s nimi (groz, grada i livny). *Trudy Gidromettsentra SSSR [Proceedings of the Hydrometeorological Centre of the USSR]*, 1974, vol. 136, pp. 12-16 [in Russ.].

15. Glushkova N.I. Issledovanie vzaimosvyazi mezhdru razlichnymi parametrami oblaka i atmosfery pri vypadenii livney i grada. *Trudy Gidromettsentra SSSR [Proceedings of the Hydrometeorological Centre of the USSR]*, 1978, vol. 201, pp. 38-46 [in Russ.].

16. Glushkova N.I. Ob usovershenstvovanii prognozov livnykh osadkov i razmera grada s ispol'zovaniem radiolokatsionnykh dannykh. *Trudy Gidromettsentra SSSR [Proceedings of the Hydrometeorological Centre of the USSR]*, 1978, vol. 201, pp. 51-56 [in Russ.].

17. Glushkova N.I. Prognoz osadkov po dannym sputnikovyykh i radiolokatsionnykh nablyudeniyy. *Trudy Gidromettsentra SSSR [Proceedings of the Hydrometeorological Centre of the USSR]*, 1985, vol. 266, pp. 21-33 [in Russ.].

18. Donaldson R.J.Jr., Chmela A.C. Distribution of Vertical Velocity Mean and Variance in a Thunderstorm. *Proc. 13th Radar Meteorology Conf.*, Montreal, 1968, pp. 492-497.

19. Kalinin N.A. Monitoring, modelirovaniye i prognoz sostoyaniya atmosfery v umerennykh shiroтах. Perm': Perm State University, 2015, 308 p. [in Russ.].

20. Lebedeva N.V. Postroyeniye modeli konveksii i raschet kolichestva livnykh osadkov. *Trudy CIP*, 1954, vol. 31, no. 58, pp. 3-30 [in Russ.].

21. Losev V.M. Regional'naya gidrodinamicheskaya model' prognoza Gidromettsentra Rossii. *80 let Gidromettsentru Rossii*. Moscow, Triada LTD publ., 2010, pp. 36-58 [in Russ.].

22. Otchet o vypolnenii nauchno-issledovatel'skoy raboty Gosudarstvennogo nauchnogo centra Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo centra Rossiyskoy Federatsii. Modelirovaniye regional'nykh processov i razvitiye metodov prognozov neblagopriyatnykh gidrometeorologicheskikh yavleniy. № gos. registratsii 01200212070, Moscow, 2002 [in Russ.].

23. Perekhodtseva E.V. Prognoz sil'nykh shkvalov i smerchey v letniy period 2009 goda na osnove statisticheskikh modeley. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometeorological Centre of Russia]*, 2010, vol. 344, pp. 265-279 [in Russ.].

24. Perekhodtseva E.V. On the hydrodynamic-statistical forecast of strong wind and heavy precipitation phenomena for two days ahead over the North Caucasus territory. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometeorological Centre of Russia]*, 2012, vol. 347, pp. 101-111 [in Russ.].

25. Peskov B.E. Issledovanie usloviy razvitiya groz i shkvalov s pomoshch'yu diagnosticheskikh diagramm veroyatnosti i indeksov neustoychivosti. *Trudy Gidromettsentra SSSR [Proceedings of the Hydrometeorological Centre of the USSR]*, 1967, vol. 13, pp. 21-31 [in Russ.].

26. Petersen S. Analiz i prognoz pogody [Analysis and weather forecast]. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1961, 652 p. [in Russ.].

27. Programma rascheta maksimal'nykh skorostey konvektivnykh dvizheniy po dannym seti doplerovskikh lokatorov DMRL-S: Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy EVM № 2019662109 ot 17.09.2019 [in Russ.].

28. RD 52.27.339-93. Rukovodstvo po diagnozu i prognozu opasnykh i osobo opasnykh osadkov, grada i shkvalov po dannym meteorologicheskikh radiolokatorov Iiskusstvennykh sputnikov Zemli. Moscow, ROSGIDROMET, 1996, 181 p. [in Russ.].

29. Rukovodstvo po kratkosrochnym prognozam pogody. Chast' 1. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1986, 702 p. [in Russ.].

30. Sprygin A.A., Prokharenaya M.I. Diagnosis and forecasting of convective structures accompanied by severe weather events based on model and remote sensing data over the territory of Belarus and central Russia. *Gidrometeorologicheskkiye issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, vol. 369, no. 3, pp. 2-22 [in Russ.].

31. *Sulakvelidze G.K., Glushkova N.I., Fedchenko L.M.* Prognoz groz, grada i livnevnyh osadkov. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1970, 188 p. [in Russ.].
32. *Haltiner J.* Dinamicheskaya i fizicheskaya meteorologiya [Dynamic and physical meteorology]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1961, 435 p. [in Russ.].
33. *Shishkin N.S.* Oblaka, osadki i grozovoe elektrichestvo. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1964, 351 p. [in Russ.].
34. *Shmeter S.M., Silaeva V.I.* Vertikal'nye potoki vnutri kuchevo-dozhdevykh oblakov *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. *Meteorol. Hydrol.*], 1966, no. 10, pp. 7-13 [in Russ.].
35. *Bjerknes J.* Saturated-adiabatic ascent of air through dry-adiabatically descending environment. *Q. J. Roy. Met. Soc.*, 1938, vol. 64, no. 275.

*Поступила в редакцию 18.03.2019 г.*

*Received by the editor 18.03.2019.*