

УДК 551.509.325:551.591.2

Комбинированный метод прогноза дальности видимости и тумана

Г.А. Зароченцев^{1,2}, К.Г. Рубинштейн^{2,3}

*¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
г. Москва, Россия;*

*²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

*³Институт проблем безопасного развития атомной
энергетики РАН, г. Москва, Россия
xztv@mail.com*

В статье рассматривается возможность численного прогноза тумана и дальности видимости при помощи нескольких методов, основанных на выходной продукции модели WRF-ARW с различными схемами микрофизики, а также сравнение их результатов с данными учащенных аэродромных наблюдений на московских аэродромах. Предложенный авторами комбинированный метод прогноза дальности видимости с использованием в качестве начальных данных Era-Interim и модифицированной схемы Томпсона микрофизики облаков показал в среднем лучший результат прогноза видимости, чем другие рассматриваемые методы.

Ключевые слова: туманы, метеорологическая видимость, мезомасштабное моделирование, перенос влаги в приземном слое, METAR

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-1-113-129>

A combined method for the visibility range and fog prediction

G.A. Zarochentsev^{1,2}, K.G. Rubinstein^{2,3}

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;

²Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

*³The Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
xztv@mail.com*

The paper describes a possibility of the numerical prediction of fog and visibility using several methods based on the output data of the WRF-ARW model with various microphysical schemes, as well as a comparison of their results with the data of frequent observations at the Moscow aerodromes. The combined method for the visibility range prediction proposed by the authors and using the ERA-Interim as initial data and the modified Thompson scheme of cloud microphysics demonstrated a better visibility prediction result than the other analyzed methods.

Keywords: fog, visibility, mesoscale modeling, surface moisture transfer, METAR

Введение

В общем смысле туманом называют дисперсионную среду, образованную капельками воды, ледяными кристаллами или их смесью определенной концентрации, в совокупности снижающей значение

горизонтальной дальности видимости вблизи поверхности земли до 1 км и менее хотя бы в одном направлении [12]. Образование туманов является следствием двух процессов в приземной атмосфере: увеличения абсолютной влажности воздуха и уменьшения температуры [8]. На их продолжительность большое влияние оказывает радиационный фактор, влажность подстилающей поверхности и ландшафтные особенности территории.

Конденсация водяного пара начинается, когда воздух насыщен влагой, относительная влажность равна 100 % или превышает это значение [30], однако в реальной атмосфере всегда содержатся примеси различного происхождения (аэрозоли, частицы пыли, песка), поэтому возможно начало конденсации при значении влажности, не достигающем насыщения [5, 9], например туман в аэропорту Лос-Анжелеса наблюдался при влажности выше 90 % [22].

Существует ряд синоптических методов прогноза тумана, которые основываются на анализе наличия и перемещения центров антициклонов и теплых фронтов, анализе изменения суточного хода температуры с учетом ландшафтных и метеорологических особенностей для конкретных регионов [1, 5, 7, 10], однако данные методы не дают прогноза видимости.

Одним из возможных способов прогноза тумана является прогноз значения горизонтальной (или метеорологической) дальности видимости. Если прогнозируется значение видимости менее 1 км, соответственно, прогнозируется и туман. Ухудшение видимости до 1 км возможно также вследствие образования песчаных бурь и интенсивных снегопадов, однако в рамках данной работы рассматриваются территории, на которых в исследуемых временных интервалах данные явления не наблюдались.

Существует несколько численных методов прогноза дальности видимости, использующих в качестве входных параметров значения влажности атмосферы, температуры воздуха, точки росы, скорости ветра и других метеорологических параметров. В [4] производится сравнение нескольких численных методов прогноза тумана, из которых хочется отметить следующие два.

1. Метод SW99, разработанный сотрудниками Национального центра атмосферных исследований (NCAR) США [27], является исследовательским элементом пост-процессинга глобального прогноза погоды. Он основан на принципе, что яркость объекта, достигающая положения наблюдателя, является суммой собственной яркости объекта, ослабленной по закону Бугера – Ламберта – Бера при прохождении через поглощающую среду, которой в данном случае являются гидрометеоры (капельки воды, снежинки и кристаллики льда), и яркости слоя среды между объектом и точкой наблюдения. В качестве показателя ослабления β используется сумма степенных функций массовых концентраций гидрометеоров: водных частиц (C_{cw} , г/м³), дождевых капель (C_{rw} , г/м³), кристаллов льда (C_{ci} , г/м³) и снега (C_{sn} , г/м³), пороговое значение яркостного контраста

ε_p принимается равным 0,05. Весовые множители подобраны в соответствии с [18, 20, 24, 26]:

$$L = \frac{-\ln \varepsilon_p}{\beta}; \quad \beta = 144,7C_{cw}^{0,88} + 1,1C_{rw}^{0,75} + 163,9C_{ci} + 10,4C_{sn}^{0,78}. \quad (3)$$

2. «Дискриминантный метод», разработанный сотрудниками МГУ им. М.В. Ломоносова и Гидрометцентра России [4] на основе анализа данных о туманах с 12 метеорологических станций сети Московской области за 2000–2013 гг. Метод расчета дальности видимости основан на использовании дискриминантной функции двух аргументов: относительной влажности RH и скорости ветра W_{10} . Функция стремится к нулю при значении влажности, превышающем 97,5 %, и при скорости ветра от 0 до 3,5 м/с:

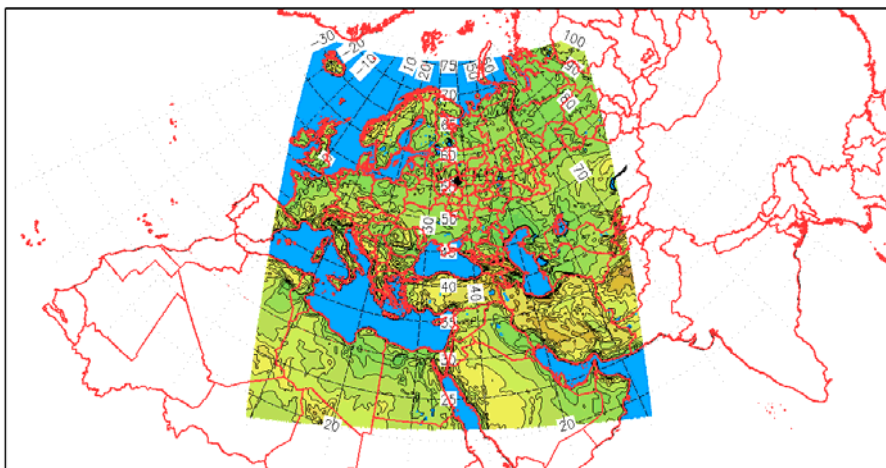
$$L = 5,5 \left(\frac{1}{2} - \frac{\arctg(RH - 99,5)}{\pi} \right) \left(\frac{1}{2} + \frac{\arctg(W_{10} - 3,5)}{\pi} \right). \quad (4)$$

В [4] сравнение указанных методов производилось с данными наблюдений европейской синоптической сети из-за ее высокой пространственной дискретности. Однако определение метеорологической дальности видимости на метеостанциях и постах осуществляется визуальным способом, поэтому фактически происходит оценивание попадания в интервал «менее 1000 м» и «более 1000 м», что является не совсем корректным подходом, поскольку возможны ошибки при оценке качества прогноза: например, наблюдателем был зарегистрирован туман при реальной дальности видимости в 1050 м, или прогноз дает значение 1100 м при реально наблюдавшемся тумане, что при использовавшейся в [4] методике оценивания считается за некорректный прогноз.

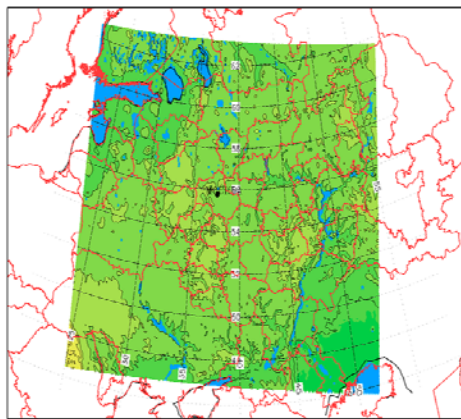
Еще одним источником данных наблюдений за погодой и дальностью видимости являются данные METAR – регулярное сообщение о погоде для авиации. Согласно [6], в аэропортах обязательна организация метеонаблюдений за основными параметрами атмосферного воздуха, а также метеорологической дальностью видимости. Наблюдения проводятся круглосуточно или только в период полетов с интервалом в 15–30 мин.

В настоящей работе будет произведено сравнение численных методов прогноза видимости (3) и (4) с использованием данных наблюдений METAR за дальностью видимости аэродромов Московского аэроузла (если передавалось значение для каждой ВПП, использовалось наименьшее значение). Для прогноза дальности видимости с помощью «дискриминантного метода» и метода SW99 и их последующей оценки требуется знание таких метеорологических полей, как относительная влажность воздуха у поверхности земли, скорость ветра на 10 м, массовая концентрация влаги в нижнем слое атмосферы. Для получения необходимой информации о данных характеристиках, а также о других характеристиках пограничного слоя атмосферы, таких как тепловые потоки, устойчивость

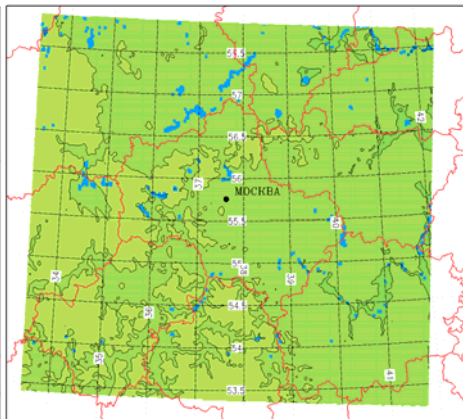
атмосферы в приземном слое, была использована гидродинамическая мезомасштабная модель WRF-ARW [25]. Использовалась модель версии 3.9.1.1 с горизонтальным разрешением 18 км (320×340 точек), а также вложенными сетками с разрешением 6 км и 2 км (330×300 и 270×240 точек соответственно) для более детализированного описания мезомасштабных процессов и учета географических особенностей рассматриваемого региона, и 41 уровнем по вертикали. Исследуемые области представлены на рис. 1.



а)



б)



в)

Рис. 1. Карты расчетных областей экспериментов: область № 1, разрешение 18×18 км, 320×340 точек (а); область № 2, разрешение 6×6 км, 330×300 точек (б); область № 3, разрешение 2×2 км, 270×240 точек.

Fig. 1. Maps of calculated experimental areas: area № 1, resolution 18×18 km, 320×340 points (a); area № 2, resolution 6×6 km, 330×300 points (b); area № 3, resolution 2×2 km, 270×240 points.

Проведенные ранее работы [2, 11] по оптимизации модели WRF-ARW для наиболее успешного прогнозирования метеорологических процессов в приземном слое, а именно – турбулентного режима, процессов обмена нижнего слоя атмосферы теплом и влагой с поверхностью и процессов образования и выпадения осадков, дают следующую наиболее оптимальную конфигурацию для запуска модели в средних широтах.

1. Для описания процессов, связанных с конвекцией, используется схема Грелла [14], которая представляет собой ансамбль параметризаций Аракавы – Шуберта и Куо, улучшенных при помощи учета в модели влажных нисходящих потоков воздуха.

2. Для описания длинноволновой и коротковолновой радиации используется модель RRTMG [17], которая является модификацией модели RRTM (Rapid Radiative Transfer Model), в которой используется К-распределение для эффективного и точного расчета тепловых потоков и скоростей нагрева. Модель RRTMG включает метод Монте-Карло для описания изменчивости подсеточных облачных процессов. Эффективные радиусы облачных частиц неявно описываются через значение температуры, а также долю влаги в фазе снега и льда.

3. Характеристики атмосферы приземного и пограничного слоя описываются моделью MYNN [21], основанной на теории подобия Монина – Обухова. В модели MYNN вводится уточненная формулировка турбулентного масштаба длины, который увеличивается при уменьшении параметра устойчивости атмосферы, а также учитывается влияние плавучести при описании ковариации давления и градиента температуры.

4. Для описания процессов взаимодействия почвы и атмосферы используется модель NOAH-LSM [15]. Она учитывает возможность существования мозаичного снежного покрова, учитывает процессы старения снега (плотность снега представлена как функция от времени). Мозаичность учитывается в параметризации NOAH при расчете альбедо и при расчете коэффициента теплопроводности. Берутся соответствующие величины с весом доли заснеженной поверхности и доли зеленой растительности. Присутствие численного описания растительности позволяет с большей степенью точности описывать влажностный режим приземного слоя. Теплообмен снежного покрова с атмосферой, сублимация и таяние на верхней и нижней границе снега рассчитываются, исходя из уравнения баланса поверхности.

5. Для параметризации микрофизических процессов используется схема Гомпсона [28]. Она описывает взаимные фазовые переходы между всеми видами гидрометеоров (водяным паром, водой в облаках, дождем, льдом, снегом и ледяной крупой).

Но, согласно [3], выбор модели микрофизики облаков Гомпсона обусловлен лучшим качеством прогноза осадков и температуры на территории Центрального федерального округа России, однако оценки качества прогноза гидрометеоров водных капель не производилось. Модель

Томпсона является не единственной современной моделью микрофизики облаков, учитывающей взаимный переход между различными типами гидрометеоров, поэтому в настоящей работе в первую очередь производится сравнение нескольких самых современных моделей микрофизики облаков в модели WRF-ARW для ответа на вопрос: какая из них дает наилучший прогноз влажности в приземном слое атмосферы.

В большинстве региональные модели в настоящее время описывают стабильные облачные процессы с помощью некоторого типа микрофизики: используются уравнения для смешанной фазы и описывается эволюция пяти типов гидрометеоров: облачных капель, дождевых капель, ледяных кристаллов, снежных частиц и крупы. В модели WRF-ARW существует несколько численных схем микрофизики облаков, однако в рамках данной работы будет рассмотрено четыре следующих схемы, наиболее часто используемые в других работах.

1. Модель Томпсона [28] (далее обозначается как Th.) является двухмоментной и описывает облачные частицы и дождевые капли, частицы льда, снега, ледяной крупы и включает водность облаков. Дождевые капли и снежные частицы распределены согласно распределению Маршалла – Пальмера [20], частицы ледяной крупы – согласно гамма-распределению. В данной модели описываются следующие процессы:

- а) образование ледяных облачных частиц под действием нуклеации;
- б) образование облачных кристаллов вследствие гетерогенного и гомогенного замерзания облачных капель. Увеличение концентрации облачных кристаллов вследствие их дробления при столкновении и десублимации водяного пара;
- в) описывается таяние и сублимация снега, а также переход облачных кристаллов в снег под действием отложения, аккреции и агрегации;
- г) учитывается переход облачной воды в капли дождя, а также испарение дождевых капель.

2. Модифицированная схема Томпсона [29] (далее обозначается как Th. Aero), учитывающая влияние аэрозолей на образование облачных капель и ледяных кристаллов. Эта модель также является двухмоментной. В данной модели детально описываются следующие процессы:

- а) зарождение облачных капель и образование кристаллов льда вследствие влияния атмосферного аэрозоля как ядер конденсации;
- б) увеличение образования облачных капель меньшего размера и уменьшение интенсивности выпадения осадков;
- в) образование капель меньшего размера приводит к увеличению альbedo облаков и изменению эффекта влияния длинноволновой радиации.

3. Модель WDM6 [19] также является двухмоментной. Это модификация модели WMD3, в которой при положительной температуре существовали только водяной пар, облачные и дождевые капли, а при отрицательной – крупа, частицы льда и снега. В модели WDM6 возможно

существование гидрометеоров в смешанной фазе одновременно, а также есть расчет концентрации облачных ядер конденсации. Распределение облачных капель и ледяных кристаллов считается монодисперсным, частицы снега и дождя распределены согласно распределению Маршалла – Пальмера. Детально описываются следующие процессы:

- а) образование и рост облачных капель под действием водяного пара или испарения;
- б) укрупнение частиц снега за счет десублимации водяного пара;
- в) испарение жидких осадков, однородное замерзание и таяние облаков и осадков.

4. Модель Purde Lin [13] (далее обозначается как Lin) является одномоментной и описывает облачные и дождевые капли, частицы снега и ледяной крупы. При этом предполагается, что гидрометеоры имеют сферическую форму, а дождевые капли, частицы снега и ледяной крупы отличаются только плотностью. В модели описываются следующие процессы:

а) образование, таяние и переход в капельную структуру при положительных температурах ледяных кристаллов, рост ледяной фазы облаков вследствие десублимации облачной воды, однородное замерзание облачной воды и превращение ее в лед;

б) процессы, связанные с образованием (испарением) дождевых капель, включают автоконверсию облачных капель в дождевые, аккрецию каплями дождя облачных капель, аккрецию частиц льда дождевыми каплями, аккрецию дождевых капель облачными каплями, испарение дождевых капель;

в) процессы, приводящие к образованию (вымыванию) снега, включают в себя автоконверсию облачных капель в частицы снега, аккрецию частиц снега дождевыми каплями, аккрецию дождевых капель снежными частицами, аккрецию облачных капель снежными частицами, обзертание частиц снега, отложение водяного пара на частицах снега и испарение и таяние частиц снега.

В качестве начальных и граничных условий для запуска модели в данной работе используются данные расчета глобальной модели GFS (разрешение 0,25 градуса), предоставляемые Национальным центром по прогнозированию окружающей среды США (NCEP) и ERA-Interim (разрешение 0,75 градуса), выпускаемые Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). В качестве исследуемых временных периодов были выбраны такие интервалы, в которых согласно данным наблюдений с синоптических станций, входящих в исследуемую область, не менее 5–10 % станций зарегистрировали туман или сильное падение значения дальности видимости. Анализ данных наблюдений показал наиболее благоприятные временные интервалы для анализа, заблаговременность прогнозов составила 3 дня:

- 25 февраля – 4 марта 2015 г. – 40 случаев тумана, 951 случай отсутствия тумана в аэропортах Москвы;

- 2–9 сентября 2015 г. – 43 случаев тумана, 953 случая отсутствия тумана в аэропортах Москвы;
- 23–30 ноября 2015 г. – 54 случаев тумана, 969 случая отсутствия тумана в аэропортах Москвы;
- 1–8 апреля 2017 г. – 42 случая тумана, 963 случая отсутствия тумана в аэропортах Москвы.

Для прогноза тумана и дальности видимости с использованием формул (3) и (4) важно определить такую конфигурацию модели, которая дает наиболее точный результат прогноза приземных характеристик атмосферного воздуха, таких как значение относительной влажности, температуры, точки росы, скорости ветра. Поэтому чем точнее прогноз данных величин, тем выше точность прогноза горизонтальной дальности видимости и, соответственно, выше точность прогноза тумана. Для оценки качества прогноза были выбраны следующие временные интервалы с заблаговременностью прогноза 3 дня: 24–27 октября 2015 г. и 5–8 февраля 2017 г. В табл. 1 представлены оценки качества прогноза значения приземной относительной влажности, температуры и скорости ветра. Это усредненные значения по всей области прогноза области № 1, представляющие абсолютную ошибку значений относительной влажности, температуры и скорости ветра по модельным данным и по данным наблюдений на метеорологических станциях, входящих в область № 2 (6×6 км). Здесь и далее для получения модельных характеристик в точке наблюдения использовалась билинейная интерполяция по 4 ближайшим узлам на модельной сетке. Эксперименты были запущены на различных начальных данных, также была использована схема с дополнительным усвоением начальных данных наблюдений с метеорологических станций 3DVAR [23].

Из табл. 1 видно, что наименьшие средние ошибки получаются при использовании начальных данных ERA-Interim (ECMWF) и модели микрофизики Томпсона, дополненной влиянием атмосферного аэрозоля на процессы формирования облаков. Однако данных оценок недостаточно для утверждения о том, что выбранная схема является оптимальной для решения поставленной задачи, поскольку возможна ситуация, в которой в одной части области ошибка положительна, а в другой – отрицательна, и результирующее значение будет стремиться к нулю, поэтому для Москвы и Московской области (область № 3) было проведено более детальное сравнение качества прогнозируемых характеристик в зависимости от выбранной конфигурации модели WRF-ARW, а также пространственного разрешения модели.

На рис. 2 и 3 представлен пример сравнения данных наблюдений и прогноза температуры и точки росы по модели WRF-ARW с использованием различных моделей микрофизики облаков и пространственного разрешения для аэропорта Шереметьево. Видно, что различия данных прогнозов и данных наблюдений не слишком существенны при изменении параметризации микрофизики в первые сутки прогноза.

Таблица 1. Оценки качества прогноза приземных характеристик воздуха с использованием различных начальных данных в модели WRF-ARW (заблаговременность 3 дня)

Table 1. Estimates of the prediction quality of surface air characteristics using different initial data in the WRF-ARW model (forecast lead time is 7 days)

Исследуемые данные / Величина	Данные GFS				Данные ECMWF			
	Lin	Th.	Th. Aero	WDM6	Lin	Th.	Th. Aero	WDM6
24–27 октября 2015 г.								
Относительн. влажность	10,45	10,61	10,51	10,66	9,84	9,87	9,8	9,92
Температура	3,81	3,82	3,78	3,84	3,81	3,82	3,77	3,84
Скорость ветра	2,04	2,05	2,05	2,05	2,03	2,03	2,03	2,03
5–8 февраля 2017 г.								
Относительн. влажность	8,33	8,39	8,23	8,57	8,34	8,36	7,25	8,53
Температура	2,97	2,96	2,91	2,94	3,42	3,49	3,55	3,8
Скорость ветра	2,43	2,48	2,43	2,45	2,48	2,47	2,36	2,43

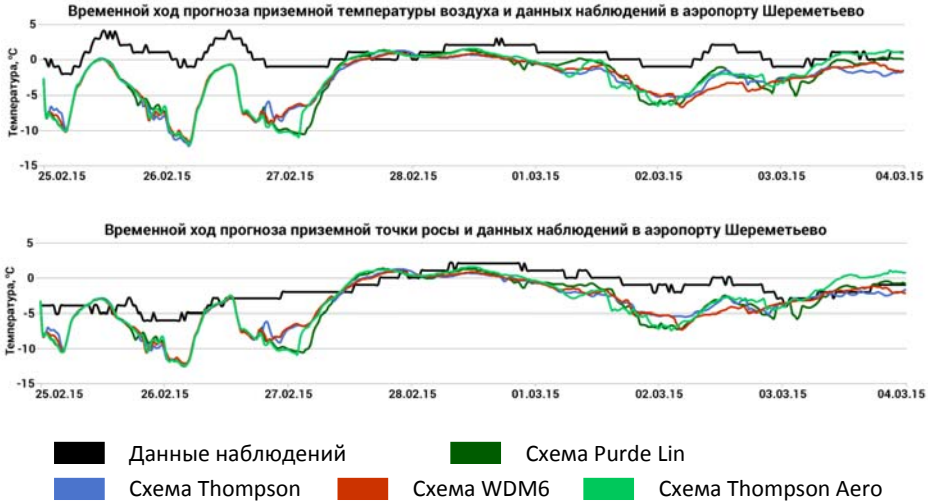


Рис. 2. Временной ход прогноза приземной температуры и точки росы по модели WRF-ARW с использованием различных моделей микрофизики облаков и данных наблюдений в аэропорту Шереметьево.

Fig. 2. The time course of the prediction of surface temperature and dew point according to the WRF-ARW model using various models of cloud microphysics and observational data at Sheremetyevo Airport.

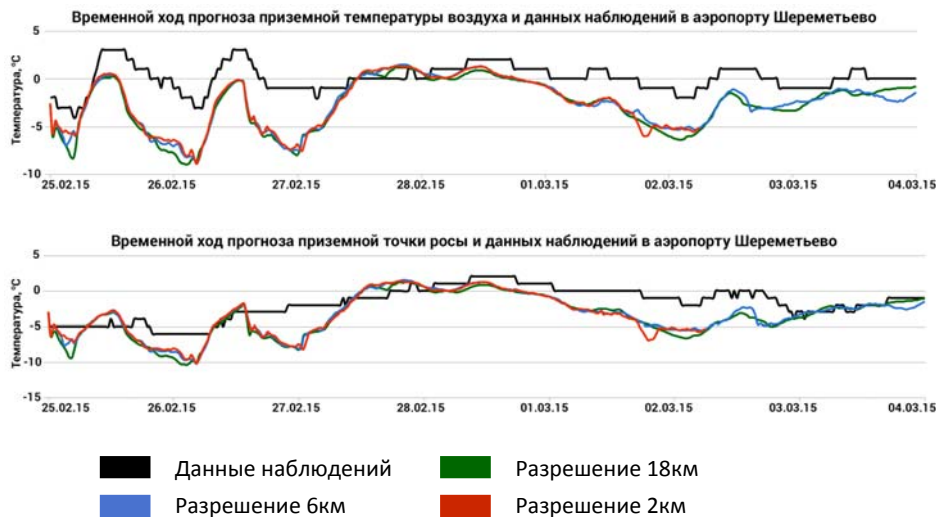


Рис. 3. Временной ход прогноза приземной температуры и точки росы по модели WRF-ARW с использованием различного пространственного шага и данных наблюдений в аэропорту Шереметьево
Fig. 3. The time course of the prediction of surface temperature and dew point according to the WRF-ARW model using different spatial resolution and observational data at Sheremetyevo Airport.

В табл. 2 представлены значения относительных ошибок температуры и точки росы, а также коэффициенты корреляции между модельными данными и данными наблюдений для аэропорта Шереметьево с использованием начальных данных ERA-Interim в модели WRF-ARW. Значения полученных ошибок хорошо согласуются с другими работами [2, 11] по оценке качества прогноза температуры и точки росы в модели WRF-ARW и показывают, что значения этих ошибок не слишком велики для дальнейшей работы с данными прогноза.

Таблица 2. Оценки качества прогноза приземной температуры воздуха и точки росы с использованием начальных данных ERA-Interim (заблаговременность 3 дня)

Table 2. Estimates of the prediction quality of air temperature and dew point using the initial data ERA-Interim (forecast lead time is 3 days)

Величина / Разрешение	Температура воздуха				Точка росы			
	Lin	Th.	Th. Aero	WDM6	Lin	Th.	Th. Aero	WDM6
18 км	-3,23	-3,49	-3,0	-3,40	-1,95	-1,92	-1,63	-1,94
	0,58	0,58	0,53	0,53	0,74	0,79	0,72	0,77
6 км	-3,58	-3,63	-3,43	-3,63	-2,23	-2,08	-1,99	-2,11
	0,58	0,53	0,55	0,51	0,75	0,8	0,73	0,78
2 км	-3,40	-3,64	-3,69	-3,72	-2,07	-2,06	-1,93	-2,19
	0,59	0,61	0,61	0,58	0,75	0,81	0,81	0,80

Таким образом, на основании произведенных оценок качества прогнозируемых величин в модели WRF-ARW с использованием различных начальных данных, различных параметризаций микрофизики и с использованием различного пространственного шага при расчете, наиболее точный результат прогноза приземных характеристик воздуха получается при использовании начальных данных ERA-Interim и модифицированной схемы Томпсона. Варьирование пространственного шага не приводит к существенному улучшению описания данных характеристик, поэтому использование пространственного шага 18 км является оптимальным для решения данной задачи. Эксперименты с дополнительным усвоением начальных данных наблюдений (3DVAR) также не показали никакого улучшения описания прогнозируемых величин.

Была произведена оценка «дискриминантного метода» и метода SW99 по данным наблюдений за дальностью видимости в аэропортах Московского региона. Коэффициенты корреляции составили 0,44 для метода SW99 и 0,52 для «дискриминантного метода» для случая 25 февраля – 4 марта 2015 г. и 0,26 и 0,81 для случая 1–8 апреля 2017 г. соответственно. Поэтому авторами работы был разработан комплексный метод прогноза дальности видимости, являющийся комбинацией «дискриминантного метода» и метода SW99. Значение видимости по методу SW99 усредняется за 6 ч и затем выбирается наименьшее из двух значений согласно формуле (8):

$$L_1 = \frac{-\ln \varepsilon_p}{\beta}; \quad \beta = 144,7C_{cw}^{0,88} + 1,1C_{rw}^{0,75} + 163,9C_{ci} + 10,4C_{sn}^{0,78}. \quad (5)$$

$$L_2 = 5,0 \left(2 - \frac{\arctg(RH - 99,5)}{\pi} \right) \left(\frac{1}{2} + \frac{\arctg(W_{10} - 3,5)}{\pi} \right) - 1,9. \quad (6)$$

$$\langle L \rangle = \frac{1}{6} \sum_{t=3}^3 L_1(t). \quad (7)$$

$$L = \begin{cases} \langle L \rangle, \langle L \rangle > 8 \text{ км} \\ L_2, \langle L \rangle \leq 8 \text{ км} \end{cases}. \quad (8)$$

Для корректного прогноза видимости с использованием гидрометеоров необходимо учитывать «spin up» модели, поскольку в начальный момент времени их концентрации равны нулю и лишь спустя некоторое время модельного расчета они начинают образовываться из атмосферной влаги, внося дисбаланс в процессы, описываемые моделью. Как правило, время, необходимое для стабилизации гидродинамической мезомасштабной модели WRF-ARW, достигает 6–9 ч, однако анализ выходной продукции модели WRF-ARW в аэропортах Московской области показал, что улучшение качества оценок прогноза влажности наступает только спустя минимум 24 ч модельного расчета, что, например, видно на рис. 2

и рис. 3, поэтому в оценках качества прогноза дальности видимости первые 24 ч не учитывались. С этим фактом связан выбор исследуемых дат и заблаговременности прогноза. В рамках данной работы также была сделана попытка определить оптимальный временной интервал для численного прогноза дальности видимости.

На рис. 4 представлен пример сравнения прогноза дальности видимости по модели SW99 и по модифицированному «дискриминантному методу» для аэропорта Шереметьево для случаев 25 февраля – 4 марта 2015 г. и 1–8 апреля 2017 г. Методы определяют начало и конец интервала ухудшения видимости с одинаковым сдвигом в 2–3 ч, однако по модели SW99 значение видимости стремится к нулю, в то время как прогноз по модифицированному «дискриминантному методу» соответствует видимости по данным наблюдений.



Рис. 4. Временной ход прогноза дальности видимости по модели SW99 и «дискриминантному методу» и данных наблюдений в аэропорту Шереметьево.
Fig. 4. The time course of the visibility forecast according to the SW99 model and the discriminant method and in comparison with the observational data at Sheremetyevo Airport.

В табл. 3 представлены абсолютная ошибка и коэффициенты корреляции модели SW99, модифицированного «дискриминантного метода» и данных наблюдений для аэропортов Шереметьево, Внуково и Домодедово (Жуковский и Остафьево не были включены из-за нерегулярности или отсутствия отправляемых данных) с различной заблаговременностью прогноза. Для всех аэропортов для заблаговременности 6–12 часов оба метода показали схожие оценки, в то время как для заблаговременности

24 и 36 ч абсолютная ошибка ниже для модифицированного «дискриминантного метода». Заблаговременности больше 36 ч не были включены в результаты работы, так как оценки показывают неудовлетворительное качество прогноза на таких временных интервалах.

Таблица 3. Абсолютная ошибка и коэффициенты корреляции (в скобках) прогноза дальности видимости по модели SW99 и модифицированному «дискриминантному методу» и данных наблюдений в Московских аэропортах

Table 3. Absolute error and the correlation coefficients (in brackets) of the visibility forecast according to the SW99 model and the modified discriminant method and observational data at Moscow airports

Исследуемая точка / Интервал оценки (заблаговременность)		Шереметьево		Внуково		Домодедово	
		SW99	«Дискр. метод»	SW99	«Дискр. метод»	SW99	«Дискр. метод»
25.02 – 04.03.2015	6 ч	0 (1)	0 (1)	0 (1)	0 (1)	0 (1)	0 (1)
	12 ч	0 (1)	0 (1)	0 (1)	0 (1)	0 (1)	0 (1)
	24 ч	1297 (0.84)	2075 (0.71)	916 (0.53)	656 (0.71)	1231 (0.29)	717 (0.71)
	36 ч	2282 (0.84)	2633 (0.76)	1783 (0.65)	933 (0.86)	2348 (0.52)	1170 (0.73)
02.09 – 09.09.2015	6 ч	0 (1)	0 (1)	0 (1)	0 (1)	0 (1)	0 (1)
	12 ч	0 (1)	0 (1)	0 (1)	0 (1)	0 (1)	0 (1)
	24 ч	876 (-0.11)	876 (-0.27)	1367 (0.01)	1385 (- 0.24)	492 (-0.07)	492 (-0.19)
	36 ч	2476 (0.03)	2440 (0.26)	2017 (-0.06)	2032 (- 0.3)	1284 (-0.10)	1284 (-0.29)
23.11 – 30.11.2015	6 ч	4433 (- 0.25)	3869 (-0.41)	4470 (0.15)	4080 (0.19)	860 (0.45)	979 (0.41)
	12 ч	4885 (-0.58)	4474 (-0.52)	2668 (0.36)	2490 (0.42)	758 (-0.08)	763 (0.09)
	24 ч	2578 (-0.08)	2702 (0.02)	1482 (0.21)	1420 (0.42)	499 (-0.06)	522 (0.08)
	36 ч	2143 (-0.04)	2219 (0.07)	2307 (0.06)	2206 (0.24)	849 (-0.08)	864 (-0.09)
01.04 – 08.04.2017	6 ч	2872 (0.40)	2895 (-0.88)	1583 (-0.52)	1468 (-0.43)	618 (-0.16)	357 (0.45)
	12 ч	3375 (0.29)	2302 (0.29)	3033 (-0.64)	2975 (-0.57)	1350 (-0.19)	1220 (-0.29)
	24 ч	4800 (0.08)	3486 (0.21)	2851 (0.76)	2546 (0.76)	1550 (0.85)	1761 (0.81)
	36 ч	3959 (0.38)	2997 (0.49)	3067 (0.73)	2702 (0.77)	1854 (0.83)	2037 (0.78)

Подведем итоги работы. В рамках данной работы был произведен анализ качества прогноза приземных характеристик атмосферного воздуха в модели WRF-ARW с использованием различных начальных данных и различных схем микрофизики облаков. Наиболее оптимальный результат прогноза получается с использованием начальных данных Eta-Interim и модифицированной схемы Томпсона микрофизики облаков, учитывающей влияние атмосферного аэрозоля на нуклеацию водяных частиц. Предложенный авторами комбинированный метод прогноза дальности видимости показал в среднем результат прогноза видимости на 150–250 м лучше, чем оригинальный метод SW99.

Список литературы

1. *Бабенко З.Е.* Условия образования тумана и методика его прогноза в отдельных районах Средней Азии: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Ташкент: Среднеазиатский региональный научно-исследовательский институт им. В.А. Бугаева, 1984.
2. *Бычкова В.И., Игнатов Р.Ю., Рубинштейн К.Г.* Анализ тепловых потоков на поверхности по расчетам модели WRF-ARW в полярных областях // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. № 20. С. 42-55.
3. *Бычкова В.И., Рубинштейн К.Г., Игнатов Р.Ю.* Описание снежноледовых процессов моделью WRF-ARW / Труды международного IX Северного конгресса «Российский Север: перспективы, долгосрочные прогнозы, управление рисками». Архангельск: Изд-во Северного государственного медицинского ун-та, 2013. С. 22-28.
4. *Зароченцев Г.А., Рубинштейн К.Г., Бычкова В.И., Игнатов Р.Ю., Юсупов Ю.И.* Сравнение нескольких численных методов прогноза туманов // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 12. С. 981-987.
5. *Зверев А.С.* Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 706 с.
6. *Кирюхин В.И.* Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации СССР (МНО ГА-90). Л.: Гидрометеиздат, 1990. 104 с.
7. *Ключникова Л.А.* К вопросу об образовании адвективных туманов // Труды ГГО. 1956. № 60. С. 122.
8. *Матвеев Л.Т.* Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 674 с.
9. *Петерсен С.* Анализ и прогноз погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1961.
10. *Петренко Н.В.* Усовершенствование методики прогноза адвективного тумана и видимости в этом тумане // Труды Гидрометцентра СССР. 1975. Вып. 162. С. 34-45.
11. *Смирнова М.М.* Влияние данных измерений содаров и температурных профилей на качество численного прогноза характеристик атмосферного пограничного слоя: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. МГУ им. М.В. Ломоносова, 2014.
12. *Хромов С.П., Мамонтова Л.И.* Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 568 с.
13. *Chen S.H., Sun W.Y.* A one-dimensional time dependent cloud model // Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II. 2002. Vol. 80, no. 1. P. 99-118.
14. *Grell G.A., Kuo Y.H., Pasch R.J.* Semiprognostic tests of cumulus parameterization schemes in the middle latitudes // Mon. Wea. Rev. 1991. Vol. 119, no. 1. P. 5-31.
15. *Ek M.B., Mitchell K.E., Lin Y., Rogers E., Grunmann P., Koren V., Gayno G., Tarpley J.D.* Implementation of NOAA land surface model advances in the NCEP operational mesoscale Eta model // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108, no. 22. P. 8851.
16. *Houghton H.G., Radford W.H.* On the measurement of drop size and liquid water content in fogs and clouds. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution, 1938. 31 p.
17. *Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shephard M.W., Clough S.A., Collins W.D.* Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2008. Vol. 113, no. D13.

18. Kunkel B.A. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models // *J. Clim. App. Meteorol.* 1984. Vol. 23, no. 1. P. 34-41.
19. Lim K.S., Hong S.Y. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models // *Mon. Wea. Rev.* 2010. Vol. 138, no. 5. P. 1587-1612.
20. Marshall J.S., Palmer W.M. The distribution of raindrops with size // *J. Meteorol.* 1948. Vol. 5 P. 165-166.
21. Nakanishi M., Niino H. Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer // *Journal of the Meteorological Society of Japan.* 2009. Vol. 87, no. 5. P. 895-912.
22. Neiburger M., Wurtele M.G. On the nature and size of particles in haze, fog, and stratus of the Los Angeles region // *Chem. Rev.* 1949. Vol. 44, no. 2. P. 321-335.
23. Parrish D.F., Derber J.C. The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system // *Mon. Wea. Rev.* 1992. Vol. 120, no. 8. P. 1747-1763.
24. Rutledge S.A., Hobbs P. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. VIII: A model for the "seeder-feeder" process in warm-frontal rainbands // *J. Atm. Sci.* 1983. Vol. 40, no. 5. P. 1185-1206.
25. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Wang W., Powers J.G. A description of the advanced research WRF version 2. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research. Boulder, Colorado, USA, 2005. N NCAR/TN-468+STR. DOI: 10.5065/D68S4MVH.
26. Stallabrass J.R. Measurements of the concentration of falling snow. Preprints, Snow Property Measurements Workshop, Lake Louise, AB, Canada, National Research Council of Canada, 1985. P. 389-410.
27. Stoelinga M.T., Warner T.T. Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an East Coast winter precipitation event // *J. Appl. Meteorol.* 1999. Vol. 38, no. 4. P. 385-404.
28. Thompson G., Rasmussen R.M., Manning K. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I // *Phys. Sci.* 2004. P. 74-86.
29. Thompson G., Eidhammer T. A study of aerosol impacts on clouds and precipitation development in a large winter cyclone // *J. Atm. Sci.* 2014. Vol. 71, no. 10. P. 3636-3658.
30. Wilson C.T.R. XI. Condensation of water vapour in the presence of dust-free air and other gases // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character.* 1897. No. 189. P. 265-307.

References

1. Babenko Z.E. Usloviya obrazovaniya tumana i metodika ego prognoza v otdel'nyh rayonah Sredney Azii: avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk. Tashket, Sredneaziatskiy regional'nyy nauchno-issledovatel'skiy institut im. V.A. Bugaeva, 1984 [in Russ.].
2. Buichkova V.I., Ignatov R.Yu., Rubinstein K.G.. The analysis of the surface heat flux using the results of simulations with the wrf-arf model in the polar regions. *Uchenye zapiski RGG-MU [Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University]*, 2011, no. 20, pp. 42-55 [in Russ.].
3. Bychkova V.I., Rubinshteyn K.G., Ignatov R.Yu. Opisanie snezhnoledovyh protsessov model'yu WRF-ARW / Trudy mezhdunarodnogo IX Severnogo kongressa «Rossiyskiy Sever: perspektivy, dolgosrochnye prognozy, upravlenie riskami». Arhangel'sk, Izd-vo Severnogo gosudarstvennogo meditsinskogo un-ta, 2013, pp. 22-28 [in Russ.].
4. Zarochentsev G.A., Rubinstein K.G., Bychkova V.I., Ignatov R.Yu. and Yusupov Yu.I. Comparison of Several Numerical Methods for Fog Prediction. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2019, vol. 32, no. 02, pp. 193-201.
5. Zverev A.S. Sinopticheskaya meteorologiya. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1977, 706 p. [in Russ.].

6. Kiryuhin V.I. Nastavlenie po meteorologicheskomu obespecheniyu grazhdanskoj aviacii SSSR (MNO GA-90). Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1990, 104 p. [in Russ.].
7. Klyuchnikova L.A. K voprosu ob obrazovanii advektivnyh tumanov. *Trudy GGO [Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory]*, 1956, no. 60, 122 p. [in Russ.].
8. Matveev L.T. Fizika atmosfery. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1965, 674 p. [in Russ.].
9. Petersen S. Analiz i prognoz pogody. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1961 [in Russ.].
10. Petrenko N.V. Uovershenstvovanie metodiki prognoza advektivnogo tumana i vidimosti v etom tumane. *Trudy Gidromettsentra SSSR [Proceedings of the Hydrometcentre of the USSR]*, 1975, vol. 162, pp. 34-45 [in Russ.].
11. Smirnova M.M. Vliyanie dannyh izmereniy sodarov i temperaturnyh profilemerov na kachestvo chislennogo prognoza harakteristik atmosfernogo pogrannichnogo sloya: avtoref. dis. kand. fiz.-mat. nauk. Moscow, Lomonosov Moscow State University, 2014 [in Russ.].
12. Hromov S. P., Mamontova L. I. Meteorologicheskii slovar'. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1974, 568 p. [in Russ.].
13. Chen S.H., Sun W.Y. A one-dimensional time dependent cloud model. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II.*, 2002, vol. 80, no. 1, pp. 99-118.
14. Grell G.A., Kuo Y.H., Pasch R.J. Semiprognostic tests of cumulus parameterization schemes in the middle latitudes. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, vol. 119, no. 1, pp. 5-31.
15. Ek M.B., Mitchell K.E., Lin Y., Rogers E., Grunmann P., Koren V., Gayno G., Tarpley J.D. Implementation of NOAA land surface model advances in the NCEP operational mesoscale Eta model. *J. Geophys. Res.*, 2003, vol. 108, no. 22, pp. 8851.
16. Houghton H.G., Radford W.H. On the measurement of drop size and liquid water content in fogs and clouds. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution, 1938, 31 p.
17. Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shephard M.W., Clough S.A., Collins W.D. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, vol. 113, no. D13.
18. Kunkel B.A. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models. *J. Clim. App. Meteorol.*, 1984, vol. 23, no. 1, pp. 34-41.
19. Lim K.S., Hong S.Y. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Mon. Wea. Rev.*, 2010, vol. 138, no. 5, pp. 1587-1612.
20. Marshall J.S., Palmer W.M. The distribution of raindrops with size. *J. Meteorol.*, 1948, vol. 5, pp. 165-166.
21. Nakanishi M., Niino H. Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2009, vol. 87, no. 5, pp. 895-912.
22. Neuberger M., Wurtele M.G. On the nature and size of particles in haze, fog, and stratus of the Los Angeles region. *Chem. Rev.*, 1949, vol. 44, no. 2, pp. 321-335.
23. Parrish D.F., Derber J.C. The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, 1992, vol. 120, no. 8, pp. 1747-1763.
24. Rutledge S.A., Hobbs P. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. VIII: A model for the "seeder-feeder" process in warm-frontal rainbands. *J. Atm. Sci.*, 1983, vol. 40, no. 5, pp. 1185-1206.
25. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Wang W., Powers J.G. A description of the advanced research WRF version 2. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research. Boulder; Colorado, USA, 2005, N NCAR/TN-468+STR. DOI: 10.5065/D68S4MVH.
26. Stallabrass J.R. Measurements of the concentration of falling snow. Preprints, Snow Property Measurements Workshop, Lake Louise, AB, Canada, National Research Council of Canada, 1985, pp. 389-410.

27. *Stoelinga M.T., Warner T.T.* Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an East Coast winter precipitation event. *J. Appl. Meteorol.*, 1999, vol. 38, no. 4, pp. 385-404.

28. *Thompson G., Rasmussen R.M., Manning K.* Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I. *Phys. Sci.*, 2004, pp. 74-86.

29. *Thompson G., Eidhammer T.* A study of aerosol impacts on clouds and precipitation development in a large winter cyclone. *J. Atm. Sci.*, 2014, vol. 71, no. 10, pp. 3636-3658.

30. *Wilson C.T.R.* XI. Condensation of water vapour in the presence of dust-free air and other gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 1897, no. 189, pp. 265-307.

Поступила в редакцию 07.06.2019 г.

Received by the editor 07.06.2019.