

Качество современных численных прогнозов видимости

Г.А. Зароченцев¹, К.Г. Рубинштейн^{1,2*}

¹Гидрометцентр России

123242, г. Москва, пер. Большой Предтеченский, 11–13

²Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН
115191, г. Москва, ул. Большая Тульская, 52

Поступила в редакцию 3.03.2021 г.

Представлены оценки численных прогнозов видимости в атмосфере. В качестве эталонов видимости использовались сводки METAR по 786 аэропортам Европы и центральной части России за период с 1 февраля по 1 августа 2020 г. Оценки обобщались в трех диапазонах: плохая (0–1500 м), удовлетворительная (1500–3000 м) и хорошая (3000 м и более) видимость для отдельных регионов западной Европы и европейской территории России. Показано, что прогноз плохой видимости до 36–48 ч всеми рассматриваемыми методами может быть удовлетворительным, однако оправдываемость прогноза на больший срок заметно ниже. Прогноз с помощью метода, представленного в настоящей работе, показывает высокую оправдываемость для плохой видимости в большинстве регионов. Остальные методы, возможно, позволяют прогнозировать хорошую видимость.

Ключевые слова: туманы, метеорологическая видимость, мезомасштабное моделирование, перенос влаги в приземном слое; fog, meteorological visibility, mesoscale modeling, transfer of moisture in the surface layer.

Введение

Видимость — свойство воздуха, играющее важную роль при любом перемещении (пешем, конном, автомобильном, авиационном). Причем чем выше скорость перемещения, тем важнее видимость и прогноз ее ухудшения. Ежегодно аэропорты несут многомиллионные убытки в результате задержек авиарейсов из-за образования на взлетно-посадочной полосе туманов, а сотни людей страдают в дорожно-транспортных происшествиях, вызванных ухудшением видимости на дороге. Большой доли этих потерь можно избежать при наличии надежного прогноза видимости.

На дальность видимости в воздухе влияет ряд атмосферных процессов. Это все виды атмосферных осадков, в первую очередь снегопад и град, а также загрязнение воздуха аэрозолями и образование туманов. Здесь и далее под дальностью видимости подразумевается дальность видимости черного предмета с угловыми размерами не менее 0,3° на фоне неба в светлое время суток [1]. Надежный прогноз дальности видимости — чрезвычайно сложная задача. Оценка качества прогноза дальности видимости также вызывает определенные трудности [2]. До недавнего времени дальность видимости оценивалась только субъективно — наблюдателями на станциях.

Несмотря на то что численные методы прогноза погоды активно развиваются с середины прошлого века, на сегодняшний день не существует физической модели, позволяющей точно и надежно описать

процесс ухудшения видимости, в частности появление тумана и его эволюцию с учетом его генезиса и географических и ландшафтных особенностей региона. Тем не менее ввиду актуальности проблемы попытки прогноза этих явлений предпринимаются рядом исследователей.

Существующие расчетные методы прогноза тумана показывают относительно низкую оправдываемость [3] в связи с недостаточно хорошим прогнозом влагосодержания нижних слоев атмосферы в численных прогностических моделях.

В настоящей работе будет впервые, насколько мы знаем, проведена масштабная объективная оценка численного прогноза туманов по данным измерений для большой территории за длительный срок. Здесь и далее под прогнозом тумана будет подразумеваться прогноз дальности видимости менее 1000 м [1].

Численные методы прогноза дальности видимости

Численные методы прогноза дальности видимости можно условно разделить на три категории:

1) эмпирические методы, использующие в качестве входных параметров прогнозируемые значения влажности приземной атмосферы, температуры воздуха у земли, скорости ветра, а также другие метеорологические параметры и эмпирические зависимости от них для расчета видимости, характерные для конкретных регионов;

2) более общие физические методы, основанные на прогнозе концентрации гидрометеоров в приземной атмосфере;

* Григорий Алексеевич Зароченцев (xztv@mail.ru);
Константин Григорьевич Рубинштейн (k.g.rubin@gmail.com).

3) комбинированные методы, объединяющие первую и вторую категории.

В [3] приведены результаты сравнения пяти численных методов прогноза тумана, в одном из которых для прогноза используется только концентрация гидрометеоров (метод 2-го типа), а остальные (один из которых разрабатывается авторами настоящей работы) используют другие атмосферные характеристики и эмпирические связи между ними (1-й тип).

В настоящей работе мы остановимся на оценках физических методов численного прогноза видимости 2-го типа, использующих концентрацию гидрометеоров в качестве ключевых параметров.

Основной способ вычисления дальности видимости в атмосфере — формулы Кошмидера [4], в которых он связал коэффициент ослабления светового пучка в атмосфере со значением дальности видимости. Рассеивающую и поглощающую среду представляют гидрометеоры (капельки воды, снежинки и кристаллики льда, крупы) и различные аэрозоли. В приближении горизонтально-однородной среды, если каждый элемент объема рассеивает свет одинаково и коэффициент экстинкции (ослабления) постоянен на всем пути светового пучка, дальность видимости

$$L = \frac{-\ln \varepsilon_p}{\beta}, \quad (1)$$

где ε_p — пороговый яркостный контраст (в настоящее время принято значение 0,05); β — коэффициент ослабления света атмосферой.

Все приведенные ниже способы расчета дальности видимости основаны на этой формуле. Главные различия методов заключаются в способе вычисления суммарного коэффициента ослабления, а также в дополнительных критериях, ограничивающих значение дальности видимости при определенных условиях.

Оценку проведем для следующих численных методов прогноза дальности видимости.

1. Метод SW99, разработанный сотрудниками Национального центра атмосферных исследований (NCAR) США [5].

Авторы работы [5] объединили результаты предыдущих исследований связи дальности видимости при различных метеоусловиях (туман, снегопад, дождь и т.д.) с соответствующей концентрацией гидрометеоров [6–9] в одну универсальную формулу

$$L_{SW99} = \frac{-\ln \varepsilon_p}{\beta};$$

$$\beta = 144,7C_{cw}^{0,88} + 1,1C_{rw}^{0,75} + 163,9C_{ci} + 10,4C_{sn}^{0,78}. \quad (2)$$

Здесь коэффициент ослабления β определяется как 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); $\varepsilon_p = 0,02$.

2. Дополненная модель SW99, которая используется в глобальной модели прогноза погоды (UPP — Unified Post Processor). В ней производится коррекция значения видимости из модели SW99 в зависи-

мости от времени суток, а также вычисляется значение видимости с учетом относительной влажности воздуха [10]:

$$L_{RH} = 60 \exp \left[-2,5 \min \left(0,8; \frac{RH_b}{100} - 0,15 \right) \right], \quad (3)$$

где RH_b — максимальное значение относительной влажности между двумя соседними приземными модельными уровнями. Итоговое значение дальности видимости вычисляется как минимальное значение из L_{SW99} и L_{RH} в узлах модельной сетки.

3. В модели Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) в расчете коэффициента ослабления β_{tot} учитывается не только концентрация гидрометеоров, но также влияние аэрозолей $\beta_{aerosol}$. Коэффициент ослабления чистого воздуха β_{air} не имеет практического значения, согласно [11], и считается эквивалентом максимальной дальности видимости 100 км, которая может быть диагностирована. Для длин волн видимого диапазона на высоте 10–20 м в приближении постоянного значения фона

$$L_{ECMWF} = \frac{-\ln \varepsilon_p}{\beta_{tot}}; \quad \beta_{tot} = \beta_{air} + \beta_{aerosol} + \beta_{cloud} + \beta_{precip};$$

$$\beta_{air} = \frac{-\ln \varepsilon_p}{10^5}; \quad (4)$$

$$\beta_{aerosol} = \beta_{seasalt} + \beta_{dust} + \beta_{blackcarbon} + \beta_{organic} + \beta_{sulphates} + \beta_{background}; \quad (5)$$

$$\beta_{cloud} + \beta_{precip} = \beta_{liq} + \beta_{ice} + \beta_{rain} + \beta_{snow}. \quad (6)$$

Данные о концентрациях аэрозолей берутся из сезонной климатологии.

4. Комбинированный дискриминантный метод (CDM), разработанный авторами настоящей работы и детально описанный в [12]. В нем используются значения приземной влажности воздуха и скорости ветра для расчета дальности видимости:

$$L_{DM} = 5,0 \left(2 - \frac{\arctg(RH - 99,5)}{\pi} \right) \times \left(\frac{1}{2} + \frac{\arctg(W_{10} - 3,5)}{\pi} \right) - 1,9. \quad (7)$$

где W_{10} — скорость ветра на 10 м.

Значение горизонтальной дальности видимости по методу SW99 усредняется за 3 ч:

$$\langle L \rangle = \frac{1}{3} \sum_{t=-1,5}^{1,5} L_{SW99}(t), \quad (8)$$

а затем выбирается наименьшее из двух значений по формуле

$$L_{CDM} = \begin{cases} \langle L \rangle, & \langle L \rangle > 6100 \text{ м;} \\ \min(L_{DM}, 6100), & \langle L \rangle \leq 6100 \text{ м.} \end{cases} \quad (9)$$

Такой критерий был подобран эмпирически при сравнении прогнозных данных и наблюдений в трех аэропортах московского узла (Внуково, Шереметьево и Домодедово).

5. Поскольку значительное уменьшение видимости вследствие различных погодных явлений, например туманов, — относительно редкое событие для большинства регионов (наблюдается в среднем менее чем в 5% случаев), для оценки описанных выше методов (что будет показано далее) нами в рамках настоящей работы была введена *идеализированная «константная модель»* (const), в которой дальность видимости принимает постоянное значение независимо от приземных характеристик атмосферного воздуха, например 10 км:

$$L_{\text{CONST}} = \text{const.} \quad (10)$$

Существуют и другие методы прогнозирования туманов и видимости, на которых в настоящей работе мы не останавливаемся.

Расчет метеорологических данных для численного прогноза дальности видимости

Современные гидродинамические модели прогноза погоды используют пространственное разрешение от нескольких десятков километров до сотен метров, что заметно превышает средний размер конвективных облаков и не позволяет детально описывать образование, слияние и осаждение молекулярных кластеров. Поэтому для описания перемещения и эволюции туманов используются полуэмпирические параметризации, в которых, прежде всего, необходимо знание концентраций гидрометеоров вблизи земли. В современных микрофизических моделях облаков используют уравнения для определения концентрации смешанной фазы влаги и описывают эволюцию по крайней мере пяти типов гидрометеоров: облачные капли, дождевые капли, ледяные кристаллы, снежные частицы и крупа.

Важная проблема прогноза концентраций гидрометеоров — отсутствие начальных данных, поскольку их регулярные измерения не производятся. В качестве начального значения в моделях используют различные приближения, например их концентрации в первый момент времени принимают равными нулю, а в последующие моменты времени гидрометеоры начинают образовываться в результате перераспределения атмосферной влаги.

Основным источником значений дальности видимости являются данные METAR (регулярные сообщения о погоде для авиации). Согласно [13] 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. Поскольку сводки METAR иногда содержат дополнительную информацию о дальности видимости (например, значение вдоль каждой из взлетно-посадочных полос, если в аэропорту их несколько), то в дальнейшем под дальностью видимости из сводок METAR мы подразумеваем среднее из всех передаваемых значений.

В нашей работе произведено сравнение результатов пяти численных методов прогноза видимости с измерениями дальности видимости из сводок METAR для всех аэродромов, приведенных на рис. 1, а.

Результаты четырех из пяти методов прогноза видимости были взяты из метеорологических данных, полученных с помощью региональной численной модели WRF-ARW [14].

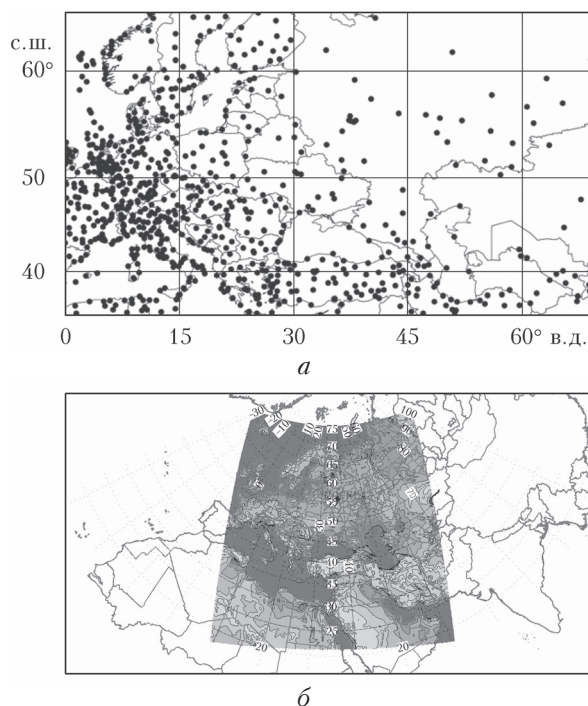


Рис. 1. Карты: а — расположения аэропортов с измерениями дальности видимости, использованными для оценок; б — расчетной области модели WRF-ARW с пространственным разрешением 18 км

Прогнозы видимости по методике ECMWF рассчитывались на основе метеорологических данных, полученных с помощью модели ECMWF.

Для расчетов использовалась модель WRF-ARW версии 3.9.1.1 с горизонтальным разрешением 18 км (320 × 340 точек) и 41 уровнем по вертикали. Область прогноза показана на рис. 1, б.

Для описания конвекции в модели WRF-ARW используется схема [15]. Для описания длинноволновой и коротковолновой радиации — схема RRTMG [16]. Характеристики атмосферы приземного и пограничного слоев описываются схемой MYNN [17], основанной на теории подобия Монина–Обухова.

Для описания процессов взаимодействия почвы и атмосферы используется схема NOAH-LSM [18]. Она учитывает возможность существования мозаичного снежного покрова, процессы старения снега (плотность снега представлена как функция от времени). Мозаичность используется в параметризации NOAH при расчете альбедо и коэффициента теплопроводности. Она подразумевает, что соответствующие величины берутся с весом доли заснеженной поверхности и доли растительности без снега.

Для параметризации микрофизических процессов в облаках используется схема Томпсона [19]. Она описывает концентрацию и взаимодействие облачных частиц и дождевых капель, частиц льда, снега, ледяной крупы и включает водность облаков. Дождевые капли и снежные частицы распределены согласно закону Маршалла–Пальмора [9], частицы ледяной крупы подчиняются гамма-распределению.

В качестве начальных и граничных условий в прогнозах WRF-ARW используются данные GFS (Global Forecast System – система глобального прогноза США) с пространственным разрешением 0,25°.

В модели ECMWF описание конвективных процессов происходит согласно работе [20], в которой учитывается глубокая, средняя и мелкая конвекция. Для описания длинно- и коротковолновых радиационных процессов используется подход McICA (Monte Carlo Independent Column Approximation) [21], в основе которого лежит модель RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) [16, 22]; в нем также применяется метод Монте-Карло при описании облачности и влиянии этого метода на радиационные поля. Характеристики приземного и пограничного слоев описываются в рамках теории подобия Монина–Обухова. Для описания процесса взаимодействия атмосферы и почвы используется схема TESSEL [23–25], в которой граница раздела сред разбивается на несколько подслоев (tiles) (шесть для границы «воздух – земля» и два – «вода – земля»), каждый из которых имеет свои собственные физические характеристики, корректирующие описание процессов передачи тепла, испарения и т.д.

Для описания микрофизических процессов в облаках применяется схема IFS [26–28]. Облачные процессы и крупномасштабные осадки описываются с помощью уравнений переноса жидкой воды, ледяных, дождевых и снежных частиц.

Анализ результатов численных прогнозов видимости

Поскольку все оцениваемые нами методы прогноза видимости используют значение массовой концентрации гидрометеоров в знаменателях дробных функций (2)–(4), (9), то при его стремлении к нулю величина дальности видимости будет стремиться к бесконечности. В данных измерений дальность видимости очень редко превышает 10 000 м, поэтому при оценивании качества прогноза нами было введено пороговое значение видимости в 10 000 м, при превышении которого значение видимости автоматически приравнивалось к этой константе.

В область исследования (рис. 2) попало 786 аэропортов, которые регулярно передают сводки METAR. Интервал исследования составил 183 дня, с 1 февраля по 1 августа 2020 г. Прогнозы по модели WRF-ARW рассчитывались до 72 ч, для модели ECMWF – до 144 ч ежедневно от 00:00 UTC.

Предварительный анализ прогнозов показал, что качество оценок прогноза влажности улучшается спустя 3 ч модельного расчета, поэтому в оценках

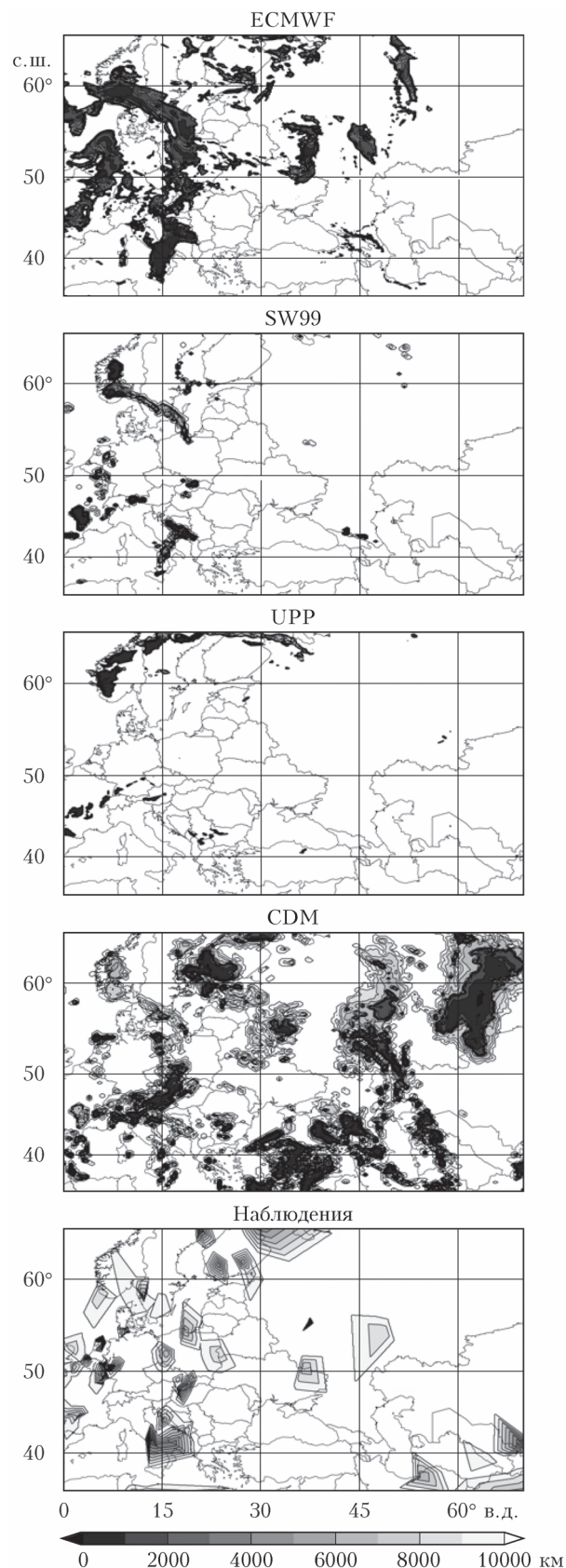


Рис. 2. Карты примеров прогноза дальности видимости по четырем схемам (прогноз от 00:00 UTC 5 июня 2020 г.) и видимость по наблюдениям на 12:00 UTC 5 июня 2020 г. в рассматриваемой области

качества прогноза дальности видимости первые 3 ч не учитывались (так называемый «spin up» модели).

Для примера сравним конкретные прогнозы дальности видимости всеми методами с данными наблюдений (рис. 2). Поскольку наблюдения проводятся в нерегулярных точках расположения аэропортов, была сделана регулярная сетка, на которую были интерполированы значения видимости в точках наблюдений, точки нанесены на карту.

На рис. 2 заметно, что падение видимости наблюдалось в основном на юго-востоке, юго-западе и севере области, а также в центральной части Европы и на севере европейской части России. Прогноз ухудшения видимости по схеме ECMWF довольно хорошо совпадает с наблюдениями в центральной части Европы, в северной части России, в районе Италии и Скандинавии, но уменьшение видимости в районе Каспийского, Черного и Белого морей предсказано не было. Регион ухудшения видимости по прогнозу методом SW99 в районе Италии хорошо совпадает с наблюдениями, как и в западной Европе и Скандинавии, но ухудшение видимости в России и вблизи Каспийского моря этим методом не предсказано. С помощью метода UPP получился слегка завышенный прогноз ухудшения видимости в центральной части Европы и Скандинавии, отсутствует уменьшение видимости в других регионах. Ухудшение видимости, предсказанное методом CDM, практически во всех регионах совпадает с результатами наблюдений, но при этом занижена дальность видимости в других областях.

Рис. 2 позволяет сделать следующие выводы: во-первых, прогнозы видимости можно объективно оценивать по сводкам METAR в регионах с аэропортами; во-вторых, для каждого метода есть области вполне удовлетворительного прогноза дальности видимости, а также области неудачных прогнозов. Анализ того, насколько области успешных/неуспешных прогнозов устойчивы, насколько целесообразно доверять прогнозам видимости по приведенным выше схемам и каким образом их совершенствовать, является основной задачей нашей работы.

В качестве предварительного анализа было изучено изменение со временем прогноза дальности видимости в двух близко расположенных аэропортах: Домодедово на юге Москвы и Шереметьево на севере. Расстояние между ними (70 км) примерно соответствует 3–4 ячейкам сети расчетов прогнозов. Анализ показал, что, во-первых, все модели позволяют предсказывать сильное ухудшение видимости, точность которого еще будет обсуждаться далее, а во-вторых, после 36 ч прогноз видимости по всем схемам заметно отличается от наблюдений. Возможно, масштаб прогноза явления во всех моделях был больше, чем реальный масштаб самого явления.

Поэтому для обобщения нашего представления об уровне прогнозирования ухудшения дальности видимости были вычислены распространенные характеристики качества прогноза — среднеквадратичное отклонение (СКО) и относительная ошибка прогнозируемого значения дальности видимости по сравнению с данными наблюдений. Предварительно значе-

ние прогнозов билинейно интерполировалось по четырем ближайшим узлам модельной сетки в точки с координатами аэропортов. Полученные значения усреднялись за весь интервал (183 сут) и по всем аэропортам (786 аэропортов) для различных заблаговременностей прогноза. Полученные оценки приведены на рис. 3, а.

Из анализа рис. 3, а следует, во-первых, что обе характеристики имеют явно выраженный суточный ход. В ночное время качество прогноза изменения видимости заметно снижается. Значения СКО и относительной ошибки для всех методов (за исключением CDM) практически совпадают, однако наименьшие значения показывает модель CONST. Нами также был посчитан коэффициент корреляции между прогнозируемым значением дальности видимости и данными наблюдений для всех представленных в работе моделей (по аналогии с СКО и относительной ошибкой), который показал для модели CONST значение, близкое к единице, а для остальных — близкое к нулю (или отрицательное), однако на рис. 3 эти данные мы приводить не стали.

Из сказанного выше можно сделать вывод, что фактически изменение видимости можно интерпретировать как случайный процесс, для которого прогноз отсутствия явления точнее, чем прогноз наличия: за весь срок во всей области всего в 0,96% моментов времени наблюдалось падение видимости ниже 1500 м (49 790 из 5 258 858 случаев наблюдений). Поэтому нам кажется логичнее не оценивать численное значение прогноза видимости, а разбить весь диапазон возможных значений на несколько интервалов и оценивать попадание наблюдаемого и прогнозируемого значений в один и тот же интервал.

Для количественной характеристики степени редкости наблюдения заметного ухудшения видимости на рис. 4, а приведена гистограмма. На ней представлено распределение частоты наблюдений дальности видимости, нормированной на общее число случаев, исследованных в работе. При построении распределения были исключены случаи видимости 10000 м и выше, так как они составляют 90,46% всех наблюдений. Видно, что в результатах наблюдений за видимостью в аэропортах преобладают высокие значения видимости, однако есть небольшой пик порядка 0,4% с видимостью ~500 м, который явно наблюдается чаще, чем любая другая величина вплоть до 4000 м. В связи с этим нами был проведен более детальный анализ предыдущих характеристик прогноза (СКО и относительной ошибки) в зависимости от значения наблюдаемой видимости. Интервал видимости был разделен на два: видимость ниже 1500 м, которая представляет опасность для транспорта и навигации и которую прогнозировать важнее всего, и видимость выше 1500 м, которая уже не так опасна. Результаты оценок для выбранных интервалов приведены на рис. 3, б, в.

Из анализа рис. 3, б, в следует, что, во-первых, исключение случаев видимости менее 1500 м практически не влияет на распределение характеристик качества прогнозов в зависимости от заблаговременности. Для этого интервала значения характеристик

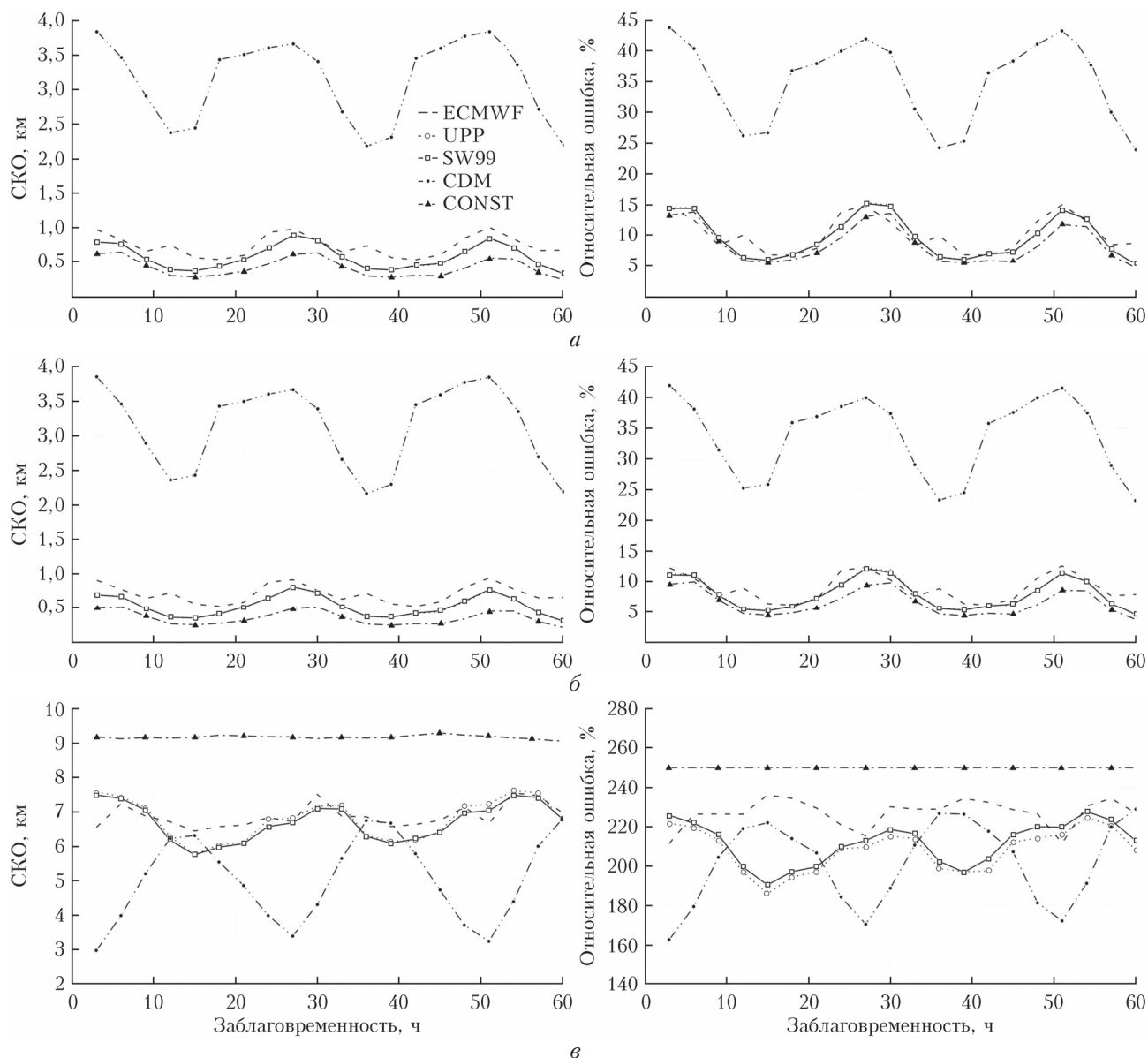


Рис. 3. СКО (слева) прогнозируемой дальности видимости от наблюдений и относительная ошибка (справа) прогноза в зависимости от его заблаговременности: *a* — весь интервал видимости; *б* — видимость > 1500 м; *в* — видимость < 1500 м

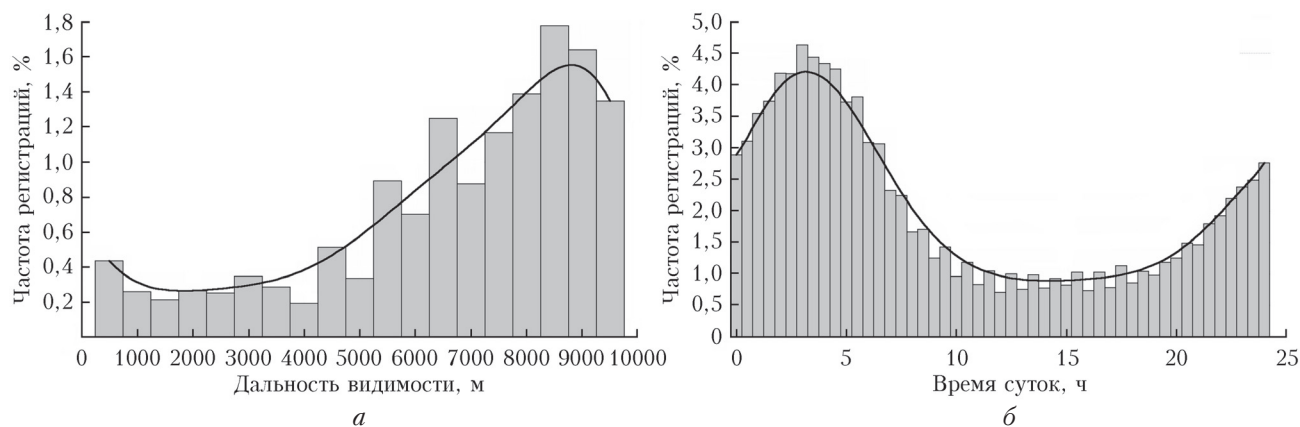


Рис. 4. Распределение: *a* — случаев изменения видимости; *б* — частоты регистрации видимости < 1500 м в зависимости от времени суток

остаются практически идентичными на протяжении всего срока прогноза, и показатели всех моделей, за исключением CDM, близки к методу прогноза постоянной видимости — CONST. Во-вторых, в интервале до 1500 м оценки ухудшаются с увеличением заблаговременности прогноза. Характеристики имеют выраженный суточный ход с периодом, близким к 24 ч. Для методов SW99 и UPP минимум СКО и относительной ошибки приходится на дневные часы, а максимум — на ночные; для методов ECMWF и CDM — наоборот. Мы полагаем, это связано с тем, что наибольшее число случаев сильного ухудшения видимости (1500 м и менее) приходится на ночные и утренние часы (до восхода солнца), что в точности соответствует условиям образования радиационных туманов. Для подтверждения нашей гипотезы проанализируем гистограмму на рис. 4, б, которая показывает распределение числа случаев ухудшения видимости до 1500 м и менее в зависимости от времени суток во всех аэропортах. Из диаграммы видно, что частота регистрации коррелирует с суточным периодом значений СКО и относительной ошибки: экстремумы на рис. 4 в 03:00–04:00 и 11:00–18:00 совпадают по времени с локальными максимумами и минимумами на рис. 3. При этом, например, коэффициент корреляции частоты регистрации плохой видимости и относительной ошибки (за первые 24 часа) для модели ECMWF составляет –0,58, для CDM — –0,94, для моделей SW99 и UPP — 0,84.

Заметное уменьшение видимости вследствие образования туманов может быть локальным и непродолжительным. Вполне возможна ситуация, при которой ухудшение видимости было предсказано с небольшим сдвигом во времени и пространстве. Мы предприняли попытку учета возможных пространственного и временного сдвигов при расчете оценки прогноза видимости. Для этого вокруг каждого аэропорта был определен круг радиусом 0,2°, что примерно соответствует пространственному шагу моделей, т.е. учитывается фазовый сдвиг прогноза на шаг модели во все стороны вокруг аэропортов, а также

среднее значение видимости за трехчасовой интервал вместо мгновенной величины. В пространственно-временной области вычислялись среднее и минимальное значения видимости, которые сравнивались с данными наблюдений.

Из рис. 4, а видно, что распределение результатов наблюдений изменения видимости имеет два локальных максимума в районе 500 и 3000 м, что, скорее всего, связано с особенностями измерительной аппаратуры (видимость наблюдается с помощью трансмиссометров или вручную). На этом основании было выделено три важных интервала значений видимости: до 1500 м (плохая видимость), от 1500 до 3000 м (средняя видимость) и выше 3000 м (хорошая видимость). При расчете качества прогноза видимости мы считали, что если значения прогнозируемой и наблюдаемой видимости оказывались в одном интервале, то прогноз успешен, иначе — неуспешен. Для всех моментов времени и каждого аэропорта была рассчитана оправдываемость (отношение числа корректно прогнозируемых случаев к общему числу событий) для указанных интервалов, затем это значение было усреднено за полгода.

На рис. 5 (цв. вкладка) представлена карта значений средней оправдываемости для всех аэропортов при расчете минимального значения видимости в пространственно-временной области. Можно видеть, что все методы прогноза позволяют получить относительно высокую оправдываемость в диапазоне хорошей видимости (интервал 3000 м и выше). Метод CONST в этих оценках не учитывался, так как, очевидно, он покажет практически 100% оправдываемость в интервале 3000 м и выше и нулевую в остальных интервалах.

Обобщающие оценки оправдываемости прогноза различными методами для различных регионов приведены в таблице.

Из таблицы следует, что наиболее высокие величины оправдываемости практически по всем регионам получены методом CDM в наиболее важных диапазонах видимости: 0–1500 и 1500–3000 м, в то

Среднее по времени и по регионам значение оправдываемости (в %) прогноза дальности видимости в зависимости от рассматриваемого интервала

Регион	Модель	Минимальное/среднее в области 0,2°		
		< 1500 м	1500–3000 м	> 3000 м
1	2	3	4	5
Вся область	ECMWF	22,79/2,56	18,33/5,55	84,81/94,07
	SW99	30,62/11,37	20,19/10,38	91,09/95,24
	UPP	30,74/11,35	20,31/10,35	91,10/95,25
	CDM	60,73/33,61	37,62/24,16	58,38/76,57
Западная Европа	ECMWF	24,79/2,02	19,56/5,87	84,39/94,65
	SW99	18,74/5,47	11,58/4,30	93,73/96,53
	UPP	18,38/5,47	11,51/4,25	93,83/96,56
	CDM	70,15/34,60	41,47/24,98	52,47/73,96
Восточная Европа	ECMWF	23,03/2,41	18,12/5,18	86,11/94,57
	SW99	23,16/4,95	16,07/6,18	92,28/95,66
	UPP	23,47/5,08	16,77/6,18	92,31/95,68
	CDM	69,04/36,97	41,55/27,08	57,20/75,08
Скандинавия	ECMWF	22,23/3,17	21,00/8,02	84,69/92,68
	SW99	25,97/9,20	18,61/8,88	91,46/94,92
	UPP	25,93/9,34	18,69/8,76	91,57/94,93
	CDM	69,29/45,56	44,73/30,60	64,09/77,90

1	2	3	4	5
Балканы	ECMWF	38,09/3,96	30,74/4,44	75,23/93,44
	SW99	35,38/16,52	25,84/13,41	90,26/93,60
	UPP	35,61/16,91	25,94/13,47	76,63/93,61
	CDM	32,66/13,81	24,84/11,69	53,75/76,63
Центральная Россия	ECMWF	12,58/1,50	10,38/3,15	88,74/94,59
	SW99	51,24/21,99	31,07/19,05	87,93/94,08
	UPP	51,90/21,53	31,21/19,05	87,77/94,08
	CDM	53,72/31,51	31,89/24,15	63,51/77,46
Кавказ и Ближний Восток	ECMWF	30,16/0,00	18,77/6,14	75,43/93,22
	SW99	6,28/0,36	4,93/4,84	90,09/96,50
	UPP	5,57/0,36	4,58/4,57	90,14/96,49
	CDM	64,63/10,59	36,68/12,98	46,11/81,44

Примечание. Полужирным выделены рекордные значения для каждого диапазона.

время как в диапазоне 3000–10000 м лучшую оправдываемость показывают методы SW99 и UPP.

Заключение

Получены количественные объективные оценки пяти методов численного прогноза видимости в атмосфере и метода постоянной видимости с использованием сводок METAR для 786 аэропортов Европы и центральной части России за период с 1 февраля по 1 августа 2020 г.

Были обобщены оценки видимости в трех диапазонах — плохая, удовлетворительная и хорошая — для различных регионов Европы и России.

На основе анализа полученных результатов были сделаны следующие выводы.

1. Численный прогноз плохой видимости в аэропортах до 36–48 ч, сделанный любым из четырех методов, может быть удовлетворительным. Оправдываемость прогноза на больший срок заметно падает.

2. Наиболее оптимальным критерием оценивания видимости является поинтервальное сравнение, при котором оцениваются не абсолютные значения видимости, а попадание прогнозируемого значения в заданный интервал.

3. Все испытанные методы показывают относительно высокую оправдываемость прогноза видимости в разных диапазонах и в регионах, кроме горных. Следовательно, в будущем с их помощью возможно создать комплексный метод, сохраняющий достоинства каждого и уменьшающий количество ложных тревог.

4. Показано, что с помощью метода CDM можно получить высокую оправдываемость прогнозов плохой видимости для большинства регионов, в то время как остальные методы значительно лучше прогнозируют хорошую видимость.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № A19-05-00047).

1. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеониздат, 1974. 569 с.

2. Bang C.H., Lee J.W., Hong S.Y. Predictability experiments of fog and visibility in local airports over Korea using the WRF model // J. KOSAE. 2008. V. 24, N E2. P. 92–101.

3. Зароченцев Г.А., Рубинштейн К.Г., Бычкова В.И., Игнатов Р.Ю., Юсупов Ю.И. Сравнение нескольких численных методов прогноза туманов // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 12. С. 981–987; Zarochentsev G.A., Rubinstein K.G., Bychkova V.I., Ignatov R.Yu., Yusupov Yu.I. Comparison of several numerical methods of fog forecasting // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 2. P. 193–201.

4. Koschmieder H. Theorie der horizontalen sichtweite // Beitr. Phys. Frei. Atmos. 1924. V. 12. P. 171–181.

5. 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. V. 38, N 4. P. 385–404.

6. Kunkel B.A. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models // J. Clim. Appl. Meteorol. 1984. V. 23, N 1. P. 34–41.

7. 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. Atmos. Sci. 1983. V. 40, N 5. P. 1185–1206.

8. Stallabrass J.R. Snow property measurement workshop // Proc. National Research Council Associate Committee on Geotechnical Research Canada. 1985. N 140. P. 389–410.

9. Marshall J.S., Palmer W.M. The distribution of raindrops with size // J. Meteorol. 1948. V. 5. P. 165–166.

10. Bieringer P.E., Donovan M., Robasky F., Clark D.A., Hurst J. A characterization of NWP ceiling and visibility forecasts for the terminal airspace // 12th Conf. Aviation, Range, and Aerospace Meteorology. Atlanta, GA. 2006. 14 p.

11. Clark P.A., Harcourt S.A., Macpherson B., Mathison C.T., Cusack S., Naylor M. Prediction of visibility and aerosol within the operational Met Office Unified Model. I: Model formulation and variational assimilation // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2008. V. 134, N 636. P. 1801–1816.

12. Зароченцев Г.А., Рубинштейн К.Г. Комбинированный метод прогноза дальности видимости и тумана // Гидрометеорол. иссл. и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 113–129.

13. Кирюхин В.И. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации СССР (МНО ГА-90). Л.: Гидрометеониздат, 1990. 104 с.
14. 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/TN468+STR. DOI: 10.5065/D68S4MVH.
15. Grell G.A., Kuo Y.H., Pasch R.J. Semiprognostic tests of cumulus parameterization schemes in the middle latitudes // *Mon. Weather Rev.* 1991. V. 119, N 1. P. 5–31.
16. 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 // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2008. V. 113, N D13. P. 1–8.
17. Nakanishi M., Niino H. Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer // *J. Meteorol. Soc. Jap. Ser. II.* 2009. V. 87, N 5. P. 895–912.
18. 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, V. 108, N 22, P. 8851.
19. Thompson G., Rasmussen R.M., Manning K. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis // *Mon. Weather Rev.* 2004. V. 132, N 2. P. 519–542.
20. Tiedtke M. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models // *Mon. Weather Rev.* 1989. V. 117, N 8. P. 1779–1800.
21. Morcrette J.-J., Barker H., Cole J., Iacono M., Pinus R. Impact of a new radiation package, McRad, in the ECMWF Integrated Forecasting System // *Mon. Weather Rev.* 2008. V. 136. P. 4773–4798.
22. Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono M.J., Clough S.A. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102D. P. 16663–16682.
23. Viterbo P., Beljaars A.C.M. An improved land surface parameterization scheme in the ECMWF model and its validation // *J. Clim.* 1995. V. 11. P. 2716–2748.
24. Viterbo P., Beljaars A.C.M., Mahouf J.-F., Teixeira J. The representation of soil moisture freezing and its impact on the stable boundary layer // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 1999. V. 125. P. 2401–2426.
25. Van den Hurk B.J.J.M., Viterbo P., Beljaars A.C.M., Betts A.K. Offline validation of the ERA40 surface scheme // *ECMWF Tech. Memo.* 2000. N 295. P. 1–43.
26. Tiedtke M. Representation of clouds in large-scale models // *Mon. Weather Rev.* 1993. V. 121. P. 3040–3061.
27. Forbes R., Tompkins A. An improved representation of cloud and precipitation // *ECMWF Newsletter.* 2011. V 129, N 129. P. 13–18.
28. Forbes R.M., Tompkins A.M., Untch A. A new prognostic bulk microphysics scheme for the IFS // *ECMWF Tech. Memoranda.* 2011. P. 22.

G.A. Zarochentsev, K.G. Rubinstein. The quality of modern numerical visibility forecast methods.

The paper presents estimates of recent numerical visibility forecast methods in the atmosphere. METAR reports for 786 airports in Europe and central Russia for the period 01.02.2020–01.08.2020 were used as visibility standards. The estimates were summarized in three ranges: poor visibility (0–1500 m), satisfactory (1500–3000), and good (3000 or more) for certain regions of Western Europe and the European territory of Russia. It is shown that the forecast of poor visibility by all the considered methods for up to 36–48 hours can be satisfactory. For a longer period, the accuracy drops noticeably, and the forecast using the method presented by the authors shows high accuracy for low visibility in most regions. The rest of the methods make it possible to predict good visibility.

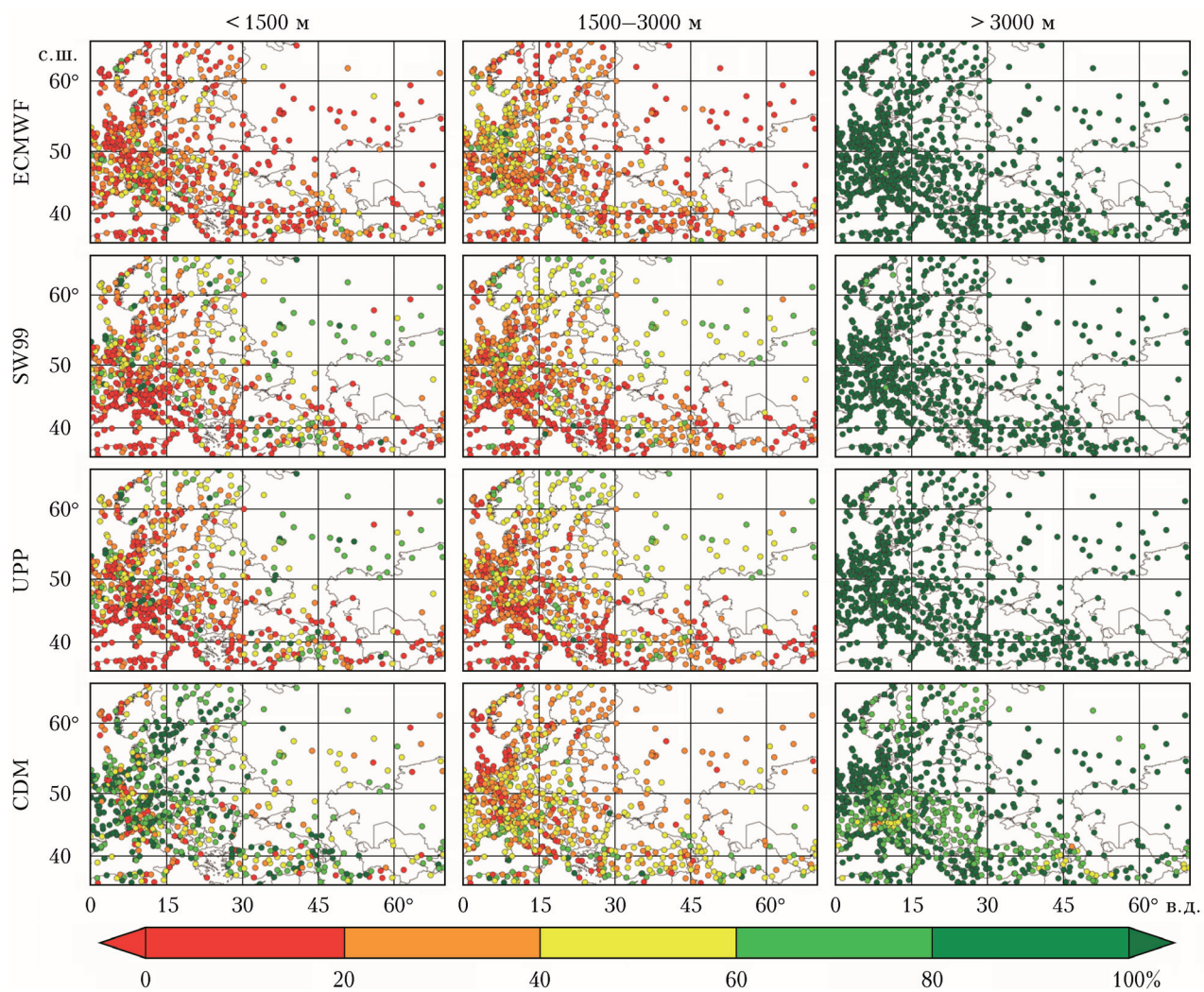


Рис. 5. Карты значений средней оправдываемости прогноза дальности видимости во всех аэропортах в зависимости от интервала видимости для метода минимального значения