

ОПЕРАТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НАУКАСТИНГА ДЛЯ АВИАЦИИ

Юрий Юсупов, директор по научным вопросам, к.ф.-м.н, ООО «НПЦ «Мэп Мейкер»; **Никита Тихоненко**, программист, ООО «НПЦ «Мэп Мейкер»; **Евгений Шульгин**, программист, ООО «НПЦ «Мэп Мейкер»; **Алексей Баданов**, программист, ООО «НПЦ «Мэп Мейкер»

Описывается оперативная технология сверхкраткосрочного (до 6 час) прогноза опасных явлений погоды и метеорологических параметров для авиации на этапе взлета и посадки. Это грозы, видимость, низкая облачность, сильный ветер, обледенение. Результаты прогноза рассчитываются с помощью замешивания (блендинга) данных наблюдений и выходной информации мезомасштабной негидростатической модели. Расчет модели производится ежечасно, используя “горячий старт”, с усвоением данных текущих наблюдений: информации метеорологических радиолокаторов, сетей грозопеленгации, метеорологических станций. Для наукастинга, кроме того, используется прогностическая информация из авиационных телеграмм METAR, SPECI, TAF, GAMET.

1. ВВЕДЕНИЕ

По определению Всемирной метеорологической организации, наукастинг называется детальное описание текущей погоды и прогноз в пределах 2 - 6 часов от срока наблюдения. Развитие наукастинга обусловлено необходимостью получения как можно более точных прогнозов начала, продолжительности и интенсивности явлений погоды в условиях сильной изменчивости атмосферных процессов. Основными объектами наукастинга для авиации являются явления погоды и метеорологические параметры, оказывающие наиболее неблагоприятное воздействие на воздушные суда при взлете и посадке, согласно [17]: ветер, сдвиг ветра, видимость, высота нижней границы облачности, обледенение, зоны активной конвекции, экстремальные температуры, переход температуры через 0°

2. ДАННЫЕ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ НАУКАСТИНГА

Обычной практикой для наукастинга является экстраполяция данных наблюдений, в первую очередь, данных метеорологических радиолокаторов. Несмотря на успехи в точности мезомасштабных гидродинамических прогнозов, их качество, в первые часы, пока отстает от экстраполяции данных предшествующих наблюдений [10]. Это связано с несовершенством гидрометеорологического моде-

лирования, несогласованностью метеорологических полей на начальных этапах расчета модели. Однако, качество прогнозов, выполненных только на основе экстраполяции данных наблюдений, быстро ухудшается, и через 1 – 2 часа становится неприемлемым. В большинстве современных технологий наукастинга экстраполяция данных наблюдений “смешивается” с результатами расчета мезомасштабных гидродинамических моделей, производится, так называемый “блендинг” [19].

Важнейшим звеном для наукастинга, является мезомасштабная негидростатическая модель атмосферы. Для повышения качества прогностической информации, на этапе инициализации происходит усвоение данных наблюдений. В представленной технологии, в настоящий момент усваиваются данные метеорологических станций и станций радиозондирования сети Росгидромета, данные аэродромных наблюдений (METAR, SPECI). Кроме того, происходит усвоение информации метеорологических радиолокаторов и сетей грозопеленгации [12].

Все данные наблюдений, а также все расчеты и прогнозы поступают в реляционную базу данных, оптимизированную для хранения информации на жестких дисках и позволяющую выполнять запросы в режиме реального времени на структурированных больших данных.

2.1. ДАННЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Данные наблюдений, поступающие с метеорологических станций необходимы для усвоения на этапе инициализации гидродинамической модели. В настоящее время построенная технология использует информацию приземных метеорологических станций наблюдательной сети Росгидромета, станций радиозондирования и аэродромных наблюдательных систем (сводки METAR и SPECI), а также информацию с бортов воздушных судов AMDAR [1]. В технологии наукастинга также используются прогнозы, передаваемые в авиационных телеграммах METAR, SPECI (раздел TREND), TAF и GAMET [1].

2.2. СЕТЬ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ

Современные метеорологические радиолокаторы (МРЛ) являются уникальным средством метеорологических наблюдений, которое может обеспечить в режиме реального времени точную информацию о местоположении и характере перемещения зон интенсивных осадков, гроз, града, шквалов. Современные МРЛ имеют радиус обзора 250-300 км и позволяют осуществлять циклические наблюдения с периодичностью от 3 до 15 минут в круглосуточном автоматизированном режиме [3].

Радиолокаторы проводят наблюдения в составе единой радиолокационной сети Росгидромета по единому регламенту и с использованием единого программного обеспечения. Для сбора данных наблюдений, контроля и управления все радиолокаторы подключаются к скоростной сети передачи данных Росгидромета. Информация сети МРЛ доступна для последующей обработки в технологии наукастинга уже на 6 - 8 минутах от срока наблюдения.

2.3. СЕТИ ГРОЗОПЕЛЕНГАЦИИ

Грозопеленгаторы позволяют получать информацию о местоположении источника электромагнитных возмущений в атмосфере и его электромагнитные характеристики. Принцип работы следующий: несколько датчиков сети грозопеленгации фиксируют время приема электромагнитного разряда. Записанные импульсы отправляются на сервер. Сервер обрабатывает данные - вычисляет расстояние до разряда и фиксирует его положение на местности. Точность определения зависит от плотности расположения станций и в среднем составляет 1000 метров [2].

Электрическая активность гроз зависит от интенсивности конвекции. Сравнение информации метеорологических радиолокаторов и грозопеленгаторов позволило установить, что максимум грозовой активности следует за максимумом радиолокационной отражаемости. Наиболее мощные конвективные си-

стемы, которые имеют и наибольшую радиолокационную отражаемость, производят больше грозовых разрядов [6].

Разработанная технология наукастинга может работать с информацией любых известных сетей грозопеленгации – Росгидромета, WWLLN, Earth Network и др.

2.4. СПУТНИКОВАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Мультиспектральный спутниковый анализ сыграл важную роль в понимании свойств конвективных грозовых облаков: измерения на длинах волн в инфракрасном (ИК) диапазоне и комбинации между ними были использованы для оценки стадии развития облаков, высоты и температуры верхней границы облачности [5].

Оценки неустойчивости и влажности наряду с другими характеристиками глубокой влажной конвекции возможно получить с помощью различных методов, применяемых к данным, полученным с помощью ИК-диапазонов анализа спектра радиометров SEVIRI, установленных на спутниках Meteosat Second Generation (MSG) Европейского метеорологического сообщества, а также с помощью российских спутников Electro-L (GOMS-3). В качестве предиктора для диагноза конвекции используется яркостная температура излучения на длине волны 3,9 мкм не более 225 К и не менее 200 К [5].

2.5. МЕЗОМАСШТАБНАЯ ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В качестве мезомасштабной негидростатической гидродинамической модели используется WRF-ARW, которая является свободно распространяемой, созданной в Национальном центре по исследованию атмосферы (NCAR), США версии 4.4.2 [20]. Расчет проводится на 40 вертикальных уровнях, на трех вложенных сетках с горизонтальным разрешением 2 км (54 - 57° с. ш., 35 - 40° в.д.), 6 км (52 - 59° с. ш., 32 - 42° в.д.) и 18 км (40 - 68° с. ш., 12 - 50° в.д.).

Схемы параметризаций физических процессов [20], используемых в данной конфигурации модели указаны в Табл. 1.

Таблица 1.

Параметризация	Схема
Микрофизика облаков	Morrison 2-moment
Коротковолновая радиация	RRTMG
Длинноволновая радиация	RRTMG
Пограничный слой	TKE
Конвекция	Tiedtke
Процессы в почве	Unified Noah
Городской подстилающий слой	SLUCM

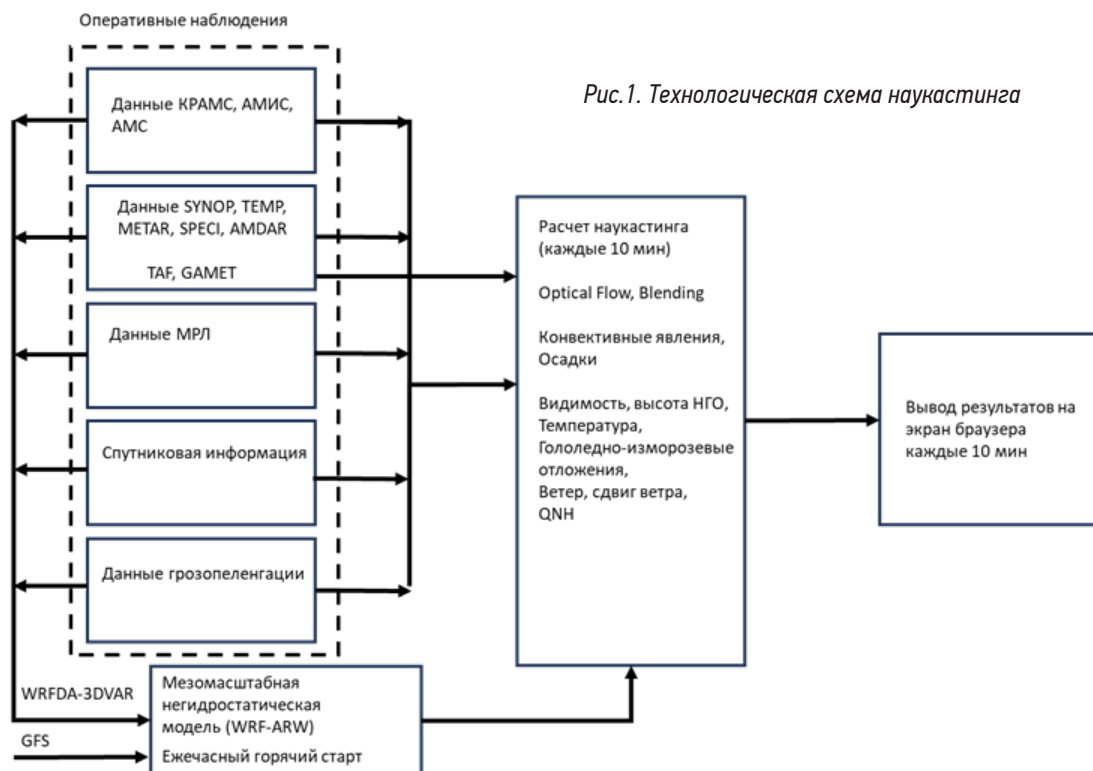


Рис.1. Технологическая схема наукастинга

В качестве начальных и граничных условий используются данные GFS [16] с пространственным разрешением 0.5° . Для получения наиболее точного прогноза применяется метод вариационного анализа WRFDA-3DVAR, позволяющий усваивать данные наблюдений.

Для запуска гидродинамической модели WRF-ARW задействован вычислитель Intel® Xeon® CPU E5 2630 v3 с 256 ядрами, который поддерживает 64 потока, рабочая частота 2,4 GHz. Расчет модели с общей заблаговременностью 24 ч с выдачей прогностической информации с шагом 10 минут занимает 6 минут. Для уменьшения эффекта “spin up” применяется “горячий старт”, когда на этапе инициализации кроме данных наблюдений добавляются прогностические данные, рассчитанные в самой модели WRF-ARW в предшествующие запуски. В представленной технологии время “spin up” составляет около 20 минут.

3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА НАУКАСТИНГА

Метеорологические явления, влияющие на взлет и посадку воздушных судов имеют горизонтальные масштабы от десятков метров до десятков километров. Временные масштабы при этом составляют от нескольких минут до нескольких часов [7]. Поэтому, важно обеспечить усвоение новых данных наблюдений и расчет новых прогнозов в таких временных масштабах. Несмотря на то, что вычислительные возможности в последние годы неуклонно растут, мы пока не можем обеспечить непрерывное усвоение данных измерений моделью. В представленной технологии (Рис.1) процесс инициализации (усвоения) и расчет прогноза происходит ежечасно. Выдача

результатов расчета происходит с шагом 10 минут с максимальной заблаговременностью до 6 часов.

$$V_{c+p} = o_c + w(o_{c+p} - o_c) + (1 - w)(m_{c+p} - m_c), \quad (1)$$

где V_{c+p} – прогнозируемый параметр с заблаговременностью p , o_c – данные наблюдений, o_{c+p} – прогноз, определенный по экстраполяции данных наблюдений, m_c и m_{c+p} – прогноз по информации гидродинамической модели, соответственно в моменты времени c и $c+p$, s_p и r_p – весовые множители, w – весовой множитель, $w = \exp(-t/T)$, где $t = c+p$, T – время, определяющее вклад экстраполяции данных наблюдений ($\cong 60$ минут)

В работе [14] было описано программное средство для производства наукастинга конвективных явлений. Будущее положение зон радиолокационной отражаемости рассчитывалось с использованием полей ветра из глобальных прогностических моделей, с коррекцией скорости и направления перемещения, определенной по экстраполяционному методу. Такой метод прогноза конвективных явлений имеет один существенный недостаток. Часто продолжительность жизни конвективных облаков составляет 30 – 60 минут, поперечный размер – 5 - 20 км. Кроме того, известно [18], что траектория перемещения грозовой ячейки не всегда совпадает с направлением ведущего потока. Таким образом, прогнозы с заблаговременностью уже более часа могут содержать существенные ошибки. Необходимо при прогнозе учитывать эволюцию конвективных процессов, которая рассчитыва-

ется в гидродинамической модели. В числе выходных параметров модели WRF-ARW есть имитация радиолокационной отражаемости. Радиолокационная отражаемость моделируется по прогностическим значениям отношения смеси гидрометеоров на различных уровнях с учетом рассеяния Релея на сферических частицах известной плотности и размеров [14]. Кроме того, в WRF-ARW рассчитываются прогнозы молниевой активности, интенсивности осадков.

Для имитации молниевой активности в модели WRF используется различные схемы параметризации, в которых моделируются микрофизические, динамические и молекулярно-химические процессы. В технологии наукастинга используется схема параметризации молниевой активности PR92 [20].

На первом этапе происходит выявление зон активной конвекции по данным метеорологических радиолокаторов, данных сети грозопеленгации и информации геостационарных спутниковых снимков. Затем происходит перемещение этих зон по траекторным расчетам, в которых участвует алгоритм Optical Flow [21] совместно с информацией о ведущем потоке из гидродинамической модели [14]. Это сделано с целью контроля определения вектора ветра с помощью Optical Flow. Было замечено, что в случае быстропротекающих процессов, когда кардинально меняется положение пикселей на соседних изображениях, вектор ветра определялся с большими ошибками. Поэтому, в представленной технологии на каждом шаге происходит сравнение получившихся векторов с информацией о ведущем потоке из гидродинамической модели. Итоговый вектор ветра определяется путем коррекции скорости и направления ветра ведущего потока, на величины, зависящие от скорости и направления ветра, рассчитанного по алгоритму Optical Flow.

На каждом шаге, кроме того, происходит блендинг с прогностическими данными о радиолокационной отражаемости [15], молниевой активности или интенсивности осадков, полученными в гидродинамической модели. Весовые коэффициенты подобраны таким образом, что в первые полчаса решающий вклад имеет экстраполяция данных наблюдений, в последующие шаги – прогностические данные.

$$V(x, y) = w O_{c+p}(x, y) + (1 - w) M_{c+p}(x, y), \quad (2)$$

где $V(x, y)$ – прогностическое значение вероятности конвективного процесса в точке (x, y) в момент времени $c + p$, $O_{c+p}(x, y)$ – значение в срок наблюдения c , перемещенное в точку (x, y) по траекторным расчетам за время p , $M_{c+p}(x, y)$ – прогноз по гидродинамической модели в точке (x, y) в момент времени $c + p$, w – весовой множитель.

Время, требуемое на ежечасный полный цикл вычислений, который включает в себя прием данных, расчет гидродинамической модели с предварительной инициализацией (усвоением данных наблюдений), последующий блендинг данных наблюдений и прогнозов составляет около 10 минут. По мере поступления новых данных наблюдений, производится блендинг с прогнозами соответствующей заблаговременности. Таким образом таблица (Рис.2) обновляется каждые 10 минут, представляя оператору последнюю информацию о наблюдениях и прогнозы на ближайшие 6 часов с 10-минутным шагом.

При составлении наукастинга используется информация авиационных телеграмм. Телеграммы METAR (передаются каждые полчаса) и SPECI содержат раздел TREND, в котором передается прогноз на ближайшие два часа от срока наблюдения приземного ветра, видимости, явлений погоды и облачности [1]. Телеграммы TAF передают каждые три часа прогнозы с периодом действия 6 или 9 часов. Сводки GAMET передаются каждые 6 часов с периодом действия 6 часов, содержатся прогнозы опасных явлений: гроз, ливней, шквалов, пыльных или песчаных бурь, ухудшения видимости на земле. Если прогноз от этих источников попадает по времени в период составления наукастинга, на экран браузера выводятся прогнозы авиационных телеграмм вместе с рассчитанными прогнозами опасных явлений и метеорологических элементов.

4, РЕЗУЛЬТАТЫ

Оператор, получающий результат расчета наукастинга на экран браузера (Рис.2), предварительно должен определить пункт (пункты) прогноза, указывая географические координаты.

Составляется список необходимых параметров, которые будут отображаться на экране, как данные наблюдений и для которых будет рассчитываться прогноз на ближайшие часы. Согласуются градации (минимумы аэродрома), при достижении которых происходит окрашивание соответствующих ячеек таблицы на Рис.2 в желтый, оранжевый или красный цвет.

Качество прогноза метеопараметров и явлений погоды оценивалось по [9]. В этом разделе мы не приводим оценок всех метеорологических параметров и явлений, поскольку многие оценки были опубликованы ранее, в работах [5, 8, 12-14].

4,1 НЕПРЕРЫВНЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ

К ним относятся температура воздуха, температура точки росы, давление, ветер, относительная влажность. Основной метод проверки качества про-

		Наблюдения		Прогнозы														
		3:30	4:00	4:10	4:20	4:30	4:40	4:50	5:00	5:10	5:20	5:30	5:40	5:50	6:00	6:10	6:20	
Видимость, м	METAR	10000	8000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000			
	TAF			6000														
	WRF			8000	5000	5500	5000	5000	5500	5000	5000	9000	10000	10000	20000	20000	20000	
Явления погоды	METAR	0	0	Дождь	Дождь	Дождь	Дождь	Дождь	Дождь	Дождь	Дождь	Дождь	Дождь	Дождь	Дождь			
	TAF			Дождь														
	МРЛ	0	0	0	Гроза,60	Гроза,60	Гроза,100	Гроза,60	Гроза,30		0	0	0	0	0	0	0	
	Спутник	0	Гроза,30	Гроза,30	Гроза,60	Гроза,100	Гроза,100	Гроза,60	Гроза,60	Гроза,30		0	0	0	0	0	0	
	Грозоп.	0	Гроза,30	Гроза,30	Гроза,60	Гроза,100	Гроза,100	Гроза,30	Гроза,30	Гроза,30	Гроза,30	Гроза,30	Гроза,30		0	0	0	
	WRF			0	Гроза,30	Гроза,30	Гроза,30	Гроза,30	Гроза,30	Гроза,30	Гроза,30	Гроза,30	Гроза,30	Дождь	Дождь	Дождь	Дождь	
Высота НГО, м	METAR	1500	1500	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900			
	TAF								800						800			
	WRF			900	500	700	600	600	600	800	1200	1200	1500	1500	1500	1500	1500	
Гололед, мм	METAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	TAF									0					0			
	WRF																	
Температура, С	METAR	11	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9	10	10			
	TAF								10						10			
	WRF			10	9	8	8	8	8	8	6	8	9	8	8	8	9	
Точка росы, С	METAR	8	8	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7			
	TAF								6						6			
	WRF			6	7	6	6	5	5	4	4	5	6	4	6	6	6	
Ветер 10 м, м/с	METAR		5	7	7	10	12	10	10	10	8	8	8	8	5			
	TAF								15						12			
	WRF			5	5	6	6	8	6	7	8	8	3	3	3	3	3	
QNH, гПа	METAR	1023	1023															
	WRF			1021	1022	1021	1020	1020	1020	1021	1020	1021	1020	1020	1020	1020	1020	
Сдвиг ветра 0-100, м/с WRF			2	3	3	10	12	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	

Рис.2. Вывод результатов наукастинга на экран браузера.

гнозов непрерывных переменных — это вычисление средних абсолютных (MAE) и средних ошибок (ME):

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i), \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i - O_i|, \quad (4)$$

где F_i и O_i представляют прогноз и данные наблюдений соответственно.

Средние абсолютные ошибки с заблаговременностью 6 час представлены в Таблице 2. Проверка качества прогноза этих параметров проводилась в Центральном Федеральном округе за май-сентябрь 2023 г.

Таблица 2.

Метеорологический параметр	MAE
Приземная температура воздуха, °	1,93
Приземная температура точки росы, °	1,94
Давление на уровне моря, гПа	0,76
Модуль скорости ветра на 10 м, м/с	1,64
QNH, гПа	0,92

Важным параметром для воздушных судов является прогноз QNH. QNH – это давление, приведенное к уровню моря в точке измерения. Высотомер воздушного судна, на котором установлено QNH аэродрома, должен показать превышение этого аэродрома относительно моря. Рассчитывается QNH по давлению на уровне станции и давлению по стандартной атмосфере. Сначала рассчитывается высота станции

h с учетом стандартной атмосферы;

$$h = 18400 \left(1 + \frac{t_a}{273,2} \right) \lg \frac{P_a}{P_{st}}, \quad (1)$$

где t_a – температура на поверхности земли по стандартной атмосфере, равная 15°C, P_a – давление на поверхности земли по стандартной атмосфере, равное 1013,2 гПа, P_{st} – давление на уровне станции с соответствующей заблаговременностью.

Определяется разница между истинной высотой станции H_{st} и h .

$$\Delta z = H_{st} - h, \quad (2)$$

Далее, по барометрической формуле Лапласа, подставив в нее давление и температуру воздуха стандартной атмосферы и находим QNH:

$$QNH = 1013,2 \exp \left(-\frac{9,8 \Delta z}{287 \cdot 288,2} \right), \quad (3)$$

4.2 КАТЕГОРИАЛЬНЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ

Переменные, которые не могут быть измерены в непрерывной шкале и поэтому могут быть классифицированы в различные категории, называются категориальными переменными. Это горизонтальная видимость, высота нижней границы облаков, тип осадков, сдвиги ветра. Например, для горизонтальной видимости мы рассматривали 4 категории: 0 – 300 м, 300-600 м, 600-1000 м, более 1000 м. Для высоты нижней границы облачности (НГО) – 5 категорий: 0 – 50, 50 – 150, 150-350, 350 – 1000, более 1000 м.

Обычной оценкой для таких переменных явля-

ется критерий Багрова-Хайдке (HSS) [19], который показывает точность прогноза по сравнению со случайным предсказанием. Он учитывает как количество правильно предсказанных событий, так и количество ошибок. Значения критерия варьируются в диапазоне от -1 до 1. Положительные значения указывают на наличие полезного прогностического сигнала.

$$HSS = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n(F_i, O_i) - \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N N(F_i)N(O_i)}{1 - \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N N(F_i)N(O_i)}, \quad (5)$$

где $N(F_i)$ – число прогнозов, попавших в категорию i , $N(O_i)$ – число наблюдений в категории i , $n(F_i, O_i)$ – число правильно предсказанных прогнозов в категории i .

Согласно [9], можно критерий Багрова-Хайдке записать следующим образом:

$$HSS = \frac{U - U_0}{1 - U_0}, \quad (6)$$

где $U = \frac{n_{11} + n_{22}}{n_{00}}$, $U_0 = \frac{m_1 + m_2}{n_{00}}$ – оправдываемость случайных прогнозов, $(m_1 = \frac{n_{01}n_{10}}{n_{00}}, m_2 = \frac{n_{02}n_{20}}{n_{00}})$, n_{11} – событие прогнозировалось и наблюдалось, n_{12} – событие прогнозировалось, но не наблюдалось, n_{10} – число прогнозов наличия события, n_{21} – событие не прогнозировалось, но наблюдалось, n_{22} – событие не прогнозировалось и не наблюдалось, n_{20} – число прогнозов отсутствия события, n_{01} – число случаев наблюдения события, n_{02} – число случаев наблюдения отсутствия события, n_{00} – общее число прогнозов наличия и отсутствия события.

Критерий Пирси-Обухова (PSS) [9] отвечает на вопрос насколько хорошо прогноз разделяет наличие и отсутствие явления. Изменяется от -1 до 1. При идеальном прогнозе $PSS = 1$.

$$PSS = \frac{n_{11}}{n_{11} + n_{21}} - \frac{n_{12}}{n_{12} + n_{22}}, \quad (7)$$

Прогноз горизонтальной видимости является сложной задачей, с другой стороны – видимость один из важнейших метеорологических параметров для авиации, приводящий к задержкам рейсов, а иногда и к чрезвычайным происшествиям на взлете и посадке [17]. На Рис.3 показаны графики видимости по данным синоптической станции Домодедово (SYNOP), аэродромной наблюдательной системы (METAR) и прогнозы по информации WRF-ARW за 9 марта 2023 г.

Представленный на Рис.3 прогноз рассчитан по сроку за 15:00 ВСВ. Видно, что прогноз видимости хорошо согласуется с данными наблюдений. Сильное

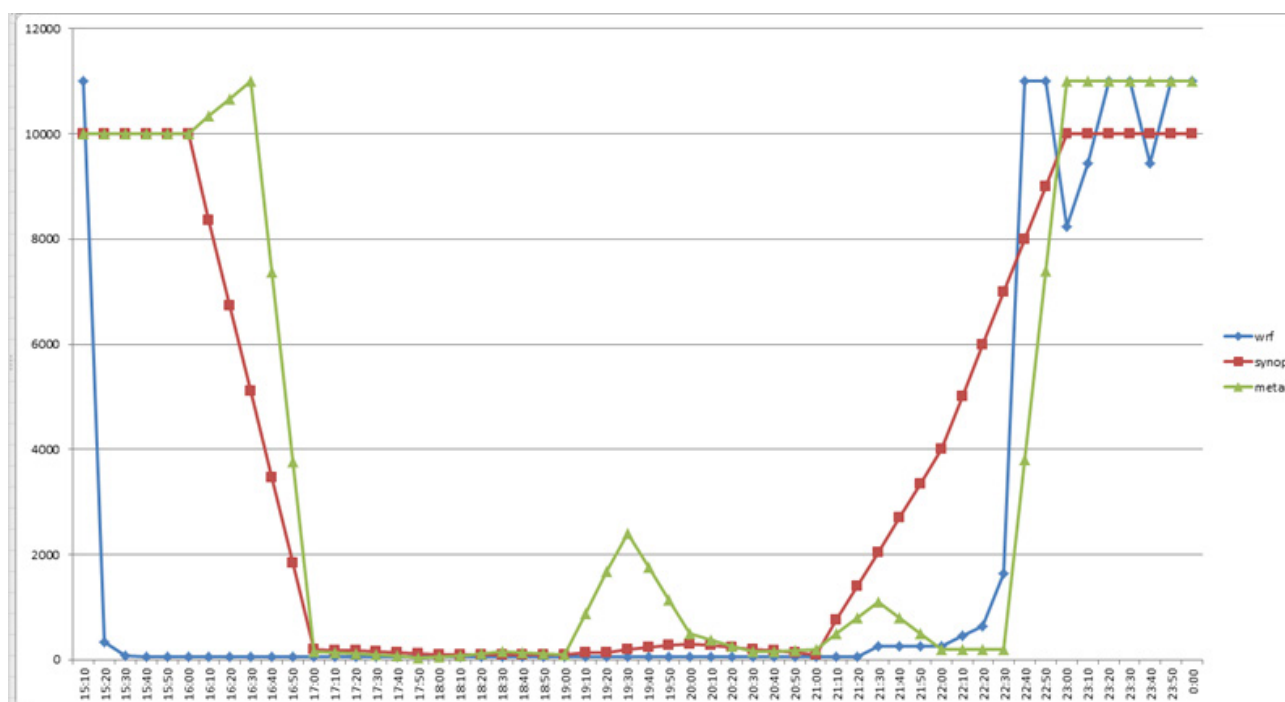


Рис.3. Сравнение прогнозов горизонтальной видимости (м) по данным модели WRF-ARW с наблюдениями SYNOP и METAR за 9.03.2023

ухудшение видимости (150 м) произошло по данным аэродромной наблюдательной системы в 17:00 ВСВ. В 22:30 ВСВ видимость составляла 200 м, затем произошло улучшение видимости. Прогнозы по модели показывали ухудшение видимости (до 100 м) на 1.5 часа раньше, чем это было зафиксировано с помощью наблюдательной системы. Улучшение видимости произошло по расчетам также в 22:30 ВСВ. Заметим, что заблаговременность в этот момент составила 7 часов 30 минут.

Анализ телеграмм METAR 09.03.2023 по данным из аэропорта Домодедово (UDD) показал, что во всех телеграммах с 17:00 и до 22:30 ВСВ прогнозы на ближайшие интервалы в 2 часа содержали в качестве явлений погоды замерзающий туман (FZFG) с видимостью до 200 м. Таким образом, прогностическая информация телеграмм METAR была точнее в начале опасного явления (ухудшения видимости), а прогнозы по модели WRF были точнее в конце.

Проверка качества прогноза видимости с заблаговременностью 1, 2 и 3 часа проводилась по аэропортам Московской зоны по данным METAR за весь 2023 г. Критерии качества Пирси-Обухова и Багрова-Хайдке, рассчитанные для категории 0 - 300 м, приведены в Табл. 3.

Таблица 3.

Заблаговременность прогноза, ч	Критерий Пирси-Обухова. PSS	Критерий Багрова-Хайдке. HSS
1	0,61	0,33
2	0,6	0,22
3	0,62	0,23

Следует заметить, что, к сожалению, во время проверки мы не располагали 10-минутными наблюдениями, а использовали только 30-минутные данные телеграмм METAR. Как видно из графика по Рис. 2. изменения видимости могут достигать 4 - 5 км за 30 минутный интервал. В таком случае, использование формулы (1) может приводить к большим ошибкам. Поэтому важно для повышения качества наукастинга обеспечить получение 10-минутных измерений осо-

бенно таких параметров, как видимость и нижняя граница облаков.

4.3 ЗОНЫ АКТИВНОЙ КОНВЕКЦИИ

Прогноз зон активной конвекции оценивался по [9], путем сравнения с информацией метеорологических радиолокаторов в мае-сентябре 2023 г. зон, выявленных предварительно с помощью МРЛ, сетей грозопеленгации и информации спутниковых снимков. Результаты приведены в Табл. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена оперативная технология наукастинга метеорологических параметров и опасных явлений погоды. Область применения разработанной технологии не ограничивается прогнозами для авиации. Технология построена модульным способом, позволяющим быстро менять прогностические алгоритмы, использовать другие мезомасштабные модели. Также может меняться и состав прогнозируемых параметров.

Наукастинг опасных явлений, связанных с активной конвекцией с использованием не только данных метеорологических радиолокаторов, но и грозопеленгаторов, а также информации геостационарных спутников позволяет решить проблему наукастинга для всей территории России.

Использование для производства наукастинга информации авиационных телеграмм позволяет получить в итоге более точный прогноз, опирающийся не только на данные наблюдений и расчет гидродинамической модели, но и на знания и интуицию опытных метеорологов, имеющих большой опыт составления прогнозов для конкретного аэропорта.

Построенная технология позволяет быстро включать в нее новые данные наблюдений, например, информацию профиломеров, данные содаров и лидаров. В настоящее время ведется работа по усвоению в модели WRF-ARW данных о стратификации температуры в атмосфере по информации, передаваемой с орбитальных спутников, что важно для покрытия арктического побережья России и северного морского пути.

Таблица 4

Источник	Заблаговременность прогноза, час	Критерий Пирси-Обухова PSS	Критерий Багрова-Хайдке HSS
Грозопеленгация	1	0,59	0,33
	2	0,49	0,16
	3	0,36	0,08
МРЛ	1	0,68	0,52
	2	0,54	0,42
	3	0,39	0,28
Спутник	1	0,62	0,39
	2	0,41	0,27
	3	0,37	0,18

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по авиационной метеорологии. – 2008. Международная организация гражданской авиации. 999 University Street, Montréal, Quebec, Canada H3C 5H7, 167 с.
2. Руководящий документ. Использование данных гронопеленгационной системы в практике штормового оповещения. РД 52.04.883-2020, 19 с.
3. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91, 1993, – Гидрометеиздат, Санкт-Петербург, 358 с.
4. Акулиничева А.А. и др. Геоинформационная система «Метео» и состояние её использования в метеослужбах России и стран ближнего зарубежья. // Метеорология и гидрология – 2001 – № 11 – С. 90-98.
5. Баданов А.Ю., Юсупов Ю.И. К вопросу о сравнении диагностики областей глубокой влажной конвекции и сопутствующих метеорологических явлений с использованием спутниковых данных и данных метеорологических радаров. //Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России – 2023 – С. 181-187.
6. Иванова А.Р. Мировой опыт наукастинга грозовой деятельности. //Метеорология и гидрология – 2019 – № 11 – С. 71-83.
7. Иванова А.Р., Шакина Н.П. Перспективы развития наукастинга для метеорологического обеспечения авиации в рамках реализации Глобального аэронавигационного плана (ГАНП). //Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации – 2016 – № 360 – С. 113-134.
8. Игнатов Р.Ю., Рубинштейн К.Г., Юсупов Ю.И. Прогноз максимальной толщины гололедных отложений. //Оптика атмосферы и океана – 2022 – Т. 35. – № 5 – С. 408-413.
9. Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Бундель А.Ю. Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов. – М.: Типография АМА ПРЕСС, 2021 – 94 с.
10. Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Смирнов А.В. Наукастинг метеорологических параметров и опасных явлений: опыт реализации и перспективы развития. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы – 2019 – № 4. – С. 92-111.
11. Кучма М.О. и др. Нейросетевые методы наукастинга осадков: обзор и апробация существующих решений. //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса – 2023 – Т. 20 – № 6. – С. 35–48.
12. Рубинштейн К.Г. и др. Эксперименты по усвоению данных сети гронопеленгации. //Оптика атмосферы и океана – 2019 – Т. 32 – № 11. – С. 936-941.
13. Юсупов Ю.И. Наукастинг в технологии ГИС Метео. //Метеоспектр – 2015 – № 1 – С. 43-50.
14. Юсупов Ю.И. Комплексная система наукастинга для авиации в технологии ГИС Метео. //Метеоспектр – 2016 – № 4. – С. 72 - 80.
15. Cheung P., Li P.W., Wong W.K. Blending of Extrapolated Radar Reflectivity with Simulated Reflectivity from NWP for a Seamless Significant Convection Forecast up to 6 Hours. //17th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology – 2014.
16. Global Forecast System. <https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>; <https://vlab.noaa.gov/web/gfs/documentation>.
17. Gulpe I. et al. A review of high impact weather for aviation meteorology. //Pure and applied geophysics – 2019 – Т. 176 – С. 1869-1921.
18. Holton J.R., Hakim G.J. An introduction to dynamic meteorology. – Academic press, 2012.
19. Isaac G.A. et al. The Canadian Airport Nowcasting System (CAN-Now). //Meteorological Applications – 2014 – Т. 21 – № 1 – С. 30-49.
20. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barker D.M., and Huang X.-Y., 2019: A Description of the Advanced Research WRF Version 4. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR, 145 pp.
21. Woo W., Wong W. Operational application of optical flow techniques to radar-based rainfall nowcasting. // Atmosphere – 2017 – Т. 8. – № 3. – С. 48.