



Серия «Науки о Земле»
2024. Т. 50. С. 112–125
Онлайн-доступ к журналу:
<http://izvestiageo.isu.ru>

ИЗВЕСТИЯ
Иркутского
государственного
университета

Научная статья

УДК 551.50

<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.50.112>

Мониторинг метеорологических условий полетов государственной авиации по спутниковым данным

И. П. Расторгуев, И. З. Денег, А. И. Расторгуева*

Военно-воздушная академия, г. Воронеж, Россия

Аннотация. Разработана методика восполнения дефицитных данных за счет расширенного использования регулярной продукции отечественных производителей вторичных (прошедших тематическую обработку) спутниковых данных. На основе требований нормативных документов определен комплекс критериальных значений метеорологических величин и значений характеристик явлений погоды, ограничивающих или исключающих возможность применения государственной авиации. Сделан вывод, что большинство параметров атмосферы, требуемых для обеспечения полетов, представлено в образцах продукции специализированных отечественных организаций. Проведена сравнительная проверка прошедших обработку спутниковых данных с фактическими метеорологическими условиями. Адекватность выпускаемой тематической продукции по результатам проверки показала приемлемые показатели по точности, информативности и периодичности для практического использования при метеорологическом обеспечении государственной авиации. Не освещенным оказался вопрос с дальностью видимости. Разработана методика комплексного использования спутниковой информационной продукции и ее интерпретации в метеорологические условия полетов, применительно к решению задач государственной авиации. Для автоматизации реализации представленной методики разработана компьютерная программа.

Ключевые слова: метеорологические условия полетов, государственная авиация, метеорологические космические аппараты, спутниковая информация, анализ и прогноз погоды.

Для цитирования: Расторгуев И. П., Денег И. З., Расторгуева А. И. Мониторинг метеорологических условий полетов государственной авиации по спутниковым данным // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2024. Т. 50. С. 112–125. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.50.112>

Original article

Monitoring of Meteorological Conditions of State Aviation Flights Using Satellite Data

I. P. Rastorguev, I. Z. Denega, A. I. Rastorgueva*

Air Force Academy, Voronezh, Russian Federation

Abstract. There is a tendency for flights of all types of aircraft to depend on meteorological conditions. Meteorological support for state aviation requires an even larger volume of actual and expected weather data. In some cases, data from the terrestrial meteorological and aerological network may be completely or partially unavailable. In this case, it is advisable to use satellite data. For their effective use, methods of meteorological interpretation of data from space should be developed. These meth-

© Расторгуев И. П., Денег И. З., Расторгуева А. И., 2024

* Полные сведения об авторах см. на последней странице статьи.
For complete information about the authors, see the last page of the article.

ods should take into account the specifics of the aviation consumer of information. A methodology for the integrated use of regular thematic products and its adaptation to the tasks of state aviation is proposed. All meteorological factors limiting or excluding the use of State aviation have been identified. Samples of information products of developers of satellite meteorological maps are studied. Based on the comparison of influencing factors and thematic satellite products, a methodology for monitoring meteorological flight conditions has been developed. The verification of the methodology on the actual material showed acceptable for practical use in meteorological support of state aviation. A computer program has been developed to automate the implementation of the presented methodology.

Keywords: meteorological flight conditions, state aviation, meteorological spacecraft, satellite information, weather analysis and forecast.

For citation: Rastorguev I.P., Denega I.Z., Rastorgueva A.I. Monitoring of Meteorological Conditions of State Aviation Flights Using Satellite Data. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2024, vol. 50, pp. 112–125. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.50.112> (in Russian)

Введение

Организация и проведение полетов воздушных судов государственной авиации существенно отличаются от деятельности гражданской и экспериментальной авиации. Это в полной мере касается и метеорологического обеспечения.

Порядок производства полетов государственной авиации Российской Федерации определяется Федеральными авиационными правилами производства полетов государственной авиации (ФАППП ГА).

Метеорологические условия полетов в соответствии с ФАППП ГА определяются как «совокупность метеорологических элементов и явлений, наблюдаемых в районе или на маршруте полета, оказывающих влияние на выполнение полетного задания».

В зависимости от степени сложности метеорологические условия подразделяются на простые (ПМУ) и сложные (СМУ). В сложных выделяется градация «установленный минимум погоды» (УМП) – предельные метеорологические условия – наименьшие значения дальности видимости (ДВ) и высоты нижней границы облаков (ВНГО), при которых возможно осуществление полета или его отдельных элементов. Условия, не соответствующие установленному минимуму, являются нелетными. К нелетным условиям относятся также все ситуации с наличием опасных для авиации явлений погоды. Конкретные значения ВНГО и ДВ определяются для каждого аэродрома, для конкретного типа воздушного судна и персонально для летчика (командира экипажа). Дифференциация производится также по времени суток. Диапазон значений ВНГО и ДВ (и их сочетания), отнесенных к СМУ, может изменяться в значительных пределах: от 200 до 800 м по нижней границе облаков и от 2 до 6 км по видимости. Нижним пределом значений минимума погоды на категорированных аэродромах для государственной авиации, являются значения 30 м по облачности и 400 м – по видимости.

К опасным явлениям погоды (ОЯ) или значениям метеорологических элементов, которые угрожают безопасности полетов или сохранению авиационной техники, относятся (могут относиться в зависимости от особенностей выполнения полетного задания): кучево-дождевая облачность и связанные с ней грозовая деятельность, град, шквалы; гололедно-изморозевые яв-

ления; сильные обледенение, болтанка, сдвиг ветра; пыльная (песчаная) буря, туман, густые дымки, ухудшающие видимость ниже установленных значений; а также составляющие ветра (встречная, боковая, попутная), превышающие установленные ограничения.

Установленные ограничения постоянно находятся в динамике в зависимости от фактической натренированности летных экипажей. В соответствии с физико-географическими особенностями местности определяются дополнительные требования к информации о фактических и ожидаемых метеорологических условиях (например, в горах, над водной или пустынной местностью, в районе населенных пунктов).

Как правило, в полетах государственной авиации участвуют экипажи с различным минимумом погоды, нередко на различных типах воздушных судов (с отличающимися ограничениями по ВНГО, ДВ, составляющим ветра, допустимой интенсивностью обледенения). Масштабы географического пространства, задействованного в производстве полетов, могут варьировать от десятков до тысяч километров в горизонтальной плоскости, и от приземного слоя до стратосферы – по вертикали.

Требования к точности определения фактических и прогностических значений метеовеличин и характеристик явлений погоды определяются заблаговременностью, с которой предоставляется метеоинформация, и условиями выполнения авиационных задач. Предельные временные рамки информирования об ожидаемых изменениях погоды составляют до 30 минут (при формировании опасных явлений погоды и приравненных к ним значений метеовеличин).

Еще одной особенностью метеорологического обеспечения государственной авиации является необходимость получения информации о погоде в малоосвещенных в метеорологическом отношении местностях.

В условиях недоступности или ограничения данных с наземной и аэрологической сетей наблюдений первостепенное значение приобретает специализированная спутниковая информация.

Исходя из изложенного целью исследования, было определено создание методики мониторинга метеорологических условий полетов государственной авиации по спутниковым данным.

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

- определение перечня потенциально доступной специализированной спутниковой информации, полезной для метеорологического обеспечения авиации;
- подбор аэросиноптического материала и тематической спутниковой продукции отечественных и зарубежных производителей;
- проведение сравнения дешифрованных спутниковых данных с фактическими данными наземных наблюдений;
- проведение анализа достаточности спутниковой тематической продукции по критериям точности, дискретности и полноты информации;

- разработка частных методик получения данных с цифровых и аналоговых снимков метеорологических космических материалов, дополняющих регулярные тематические данные;
- разработка алгоритма оценки метеорологических условий по спутниковым данным, адаптированного к специфике государственной авиации;
- исследование предпосылок к свехкраткосрочному прогнозированию метеорологических условий по спутниковым данным;
- разработка компьютерной программы для автоматизированной реализации представленной методики;
- разработка рекомендаций по практическому использованию результатов исследования.

Состояние исследуемой проблемы

Более 100 лет с момента формирования первых воздухоплавательных подразделений в Российской империи метеорология способствует обеспечению безопасности и эффективности применения авиации. Все это время активно разрабатывались методы авиационной, синоптической, динамической, статистической, радиолокационной, спутниковой и других подразделений метеорологической науки.

Современные подходы к метеорологическому обеспечению авиации освещены в многочисленных работах отечественных и зарубежных авторов [Болелов, 2018; Шакина, Иванова, 2016; Wolfson, Clark, 2006]. Значительное внимание исследователей и практиков обращено на развитие и внедрение методов космической метеорологии для решения задач анализа и прогноза метеорологических условий полетов [Космический мониторинг ... , 2019; Бухаров, Бухаров, 2020; Волкова, 2023; Transforming satellite data ... , 2017; Kerdraon, Le Glaue, 2019]. В вопросах применения космических методов в метеорологии наибольшее внимание уделяется определению характера облачности [Dim, Takamura, 2013; Classification of clouds ... , 2016; Pavlonis, 2010; Comparison of cloud ... , 2018] и осадков [Huffman, Levizzani, Kidd, 2020.].

Особое место уделяется современным методам исследования и программному обеспечению дешифрирования спутниковых данных о погоде [Блощинский, Крамарева, Шамилова, 2024; Sadeghi, Asanjan, Faridzad, 2019; Veillette, Samsi, Mattioli, 2020; Филей, Андреев, Шамилова, 2024].

В меньшей степени затрагиваются вопросы анализа и прогноза высоты нижней границы облаков [Ellrod, Gultepe, 2007], туманов [Gultepe, Pagowski, Reid, 2007], наличия обледенения в облаках [Determining the Flight Icing..., 2012] и турбулентности [Нерушев, Ивангородский, 2019]. Ряд работ посвящен непосредственно безопасности полетов в метеорологическом отношении [Применение карт ... , 2012; Шакина, Горлач, Скриптунова, 2021]. В наибольшей степени остается открытым вопрос о восстановлении и краткосрочном прогнозе параметров дальности видимости в приземном слое атмосферы по спутниковым данным.

Несмотря на значительное количество исследований в области авиационной метеорологии и, в частности, по внедрению технологий метеорологи-

ческой интерпретации данных специализированных космических аппаратов, прослеживаются следующие существенные аспекты:

– рассматриваемые подходы не учитывают специфику государственной авиации;

– не рассматривается мониторинг метеорологических условий полетов в комплексе всех влияющих факторов.

Из этого вытекает необходимость разработки методики анализа и краткосрочного прогноза комплексного влияния метеорологических факторов на эффективность и безопасность летной работы применительно к выполнению авиационных задач государственной авиации. Для решения этой задачи проведено специальное исследование.

Упрощенно ожидаемый конечный результат исследования должен дать ответы на следующие вопросы.

1. Есть ли соответствующие метеорологические условия для производства полетов или выполнения отдельных задач (летная – нелетная погода)?

2. При положительном ответе на первый вопрос требуется уточнение – условия соответствуют ПМУ или СМУ. От этого зависят технологические аспекты выполнения полетных заданий.

3. В сложных метеорологических условиях важно: будут ли параметры атмосферы соответствовать предельно возможным значениям – минимуму погоды. При УМП вводятся дополнительные ограничения.

Используемые материалы и методы исследования

Получение исходных спутниковых данных в ведомственных метеорологических подразделениях возможно по двум направлениям: готовые тематические карты на специализированных сайтах и получение спутниковых снимков с использованием специализированных комплексов приема спутниковых данных, без тематической обработки.

В данной работе использовался только первый подход, второй выделен в отдельную задачу.

В качестве спутниковых данных использовалась информационная продукция НИЦ «Планета» (рис. 1).

Для оценки синоптической обстановки и ее динамики использовались также обзорные снимки полярно-орбитальных и геостационарных спутников с интервалом от 15 мин до 2–3 ч и карты нефоскопического анализа. При необходимости использовались материалы Европейской организации по эксплуатации метеорологических спутников (EUMETSAT).

Аэросиноптический материал был представлен приземными кольцевыми картами с дискретностью в 3 ч и картами барической топографии на стандартных изобарических поверхностях до АТ₃₀₀ за два срока.

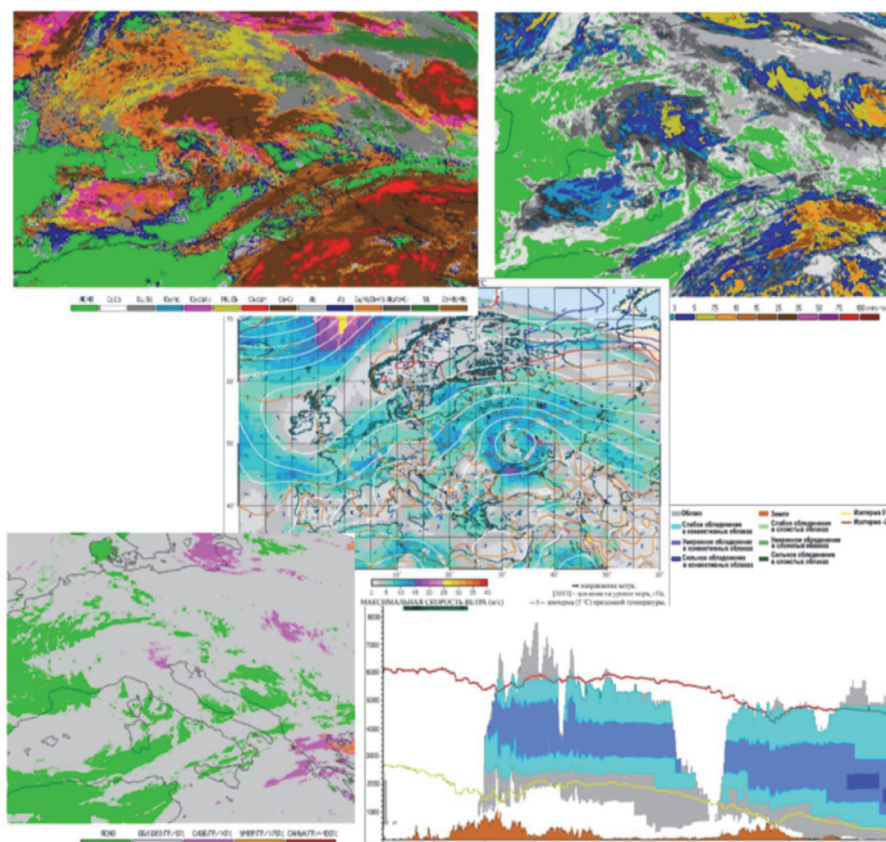


Рис. 1. Примеры тематических спутниковых карт

За эталонные данные принимались результаты полчасовых наземных наблюдений аэропортов и ведомственных аэродромов с дискретностью 15–60 мин с учетом срочных изменений.

Рассматривалась территория условно ограниченная 30–45° в. д. и 50–60° с. ш. (рис. 2). Всего исследовались данные по 14 пунктам. Исходные данные охватывали период выборочно с 2020 г. по март 2024 г., спутниковые данные – по мере ввода в эксплуатацию конкретного космического аппарата (например, Арктика-М № 1 только с октября 2023 г.).

По каждому пункту было отработано от 120 до 820 комплексов исходных данных. Необходимо отметить, что полные комплекты данных были представлены только в 44 % случаев от рассмотренных.

В архивную выборку включались также случаи с неполными данными (с отсутствием не более двух наименований). Это вызвано, во-первых, необходимостью сохранения уникальных или редких ситуаций, а во-вторых, соответствием таких случаев реальной практике метеорологического обеспечения, когда невозможно обеспечить весь комплекс исходных данных.

При проведении исследования использовались физико-статистический, графоаналитический методы и метод экспертных оценок.

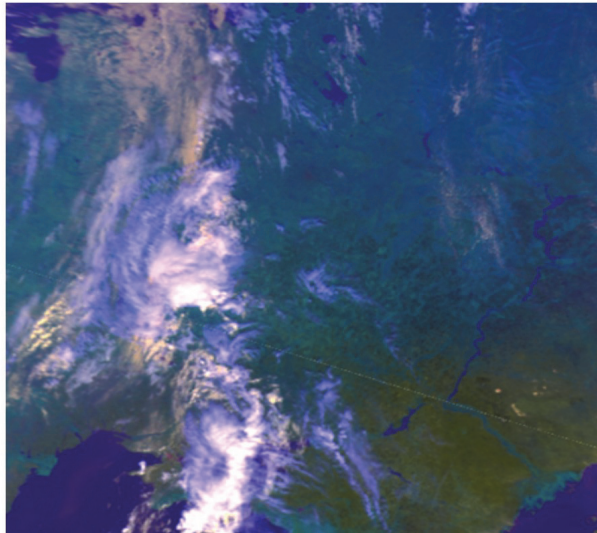


Рис. 2. Исследуемый район

При разработке методики мониторинга метеорологических условий полетов принимались граничные условия по априорной информации – решение задач должно осуществляться исключительно по спутниковым данным. Изначально данные ограничивались регулярной информационной продукцией отечественных производителей. В дальнейшем дополнялись результатами реализации авторских частных алгоритмов получения дополнительной информации по данным метеорологических космических аппаратов.

Данные с тематических карт, как правило, предварительно адаптировались к задачам исследования. В некоторых случаях информация использовалась в первоначальном виде: системы облачности, грозы и др. При определении ряда характеристик метеорологических условий использовались сведения с нескольких карт, в том числе с поправками.

Так, данные о максимальных порывах ветра пересчитывались в попутную V_P , боковую V_B и встречную V_B составляющие, относительно направления конкретной взлетно-посадочной полосы (с обоими направлениями курсов взлета-посадки).

Гололедные явления определялись по данным о фазе осадков и температуре поверхности.

Дальность видимости ассоциировалась с данными о фазе и интенсивности осадков, а в зимнее время и со значениями максимальных порывов ветра.

Результаты и их обсуждение

Схематично предлагаемая методика определения метеорологических условий полетов государственной авиации по спутниковым данным представлена на рис. 3.

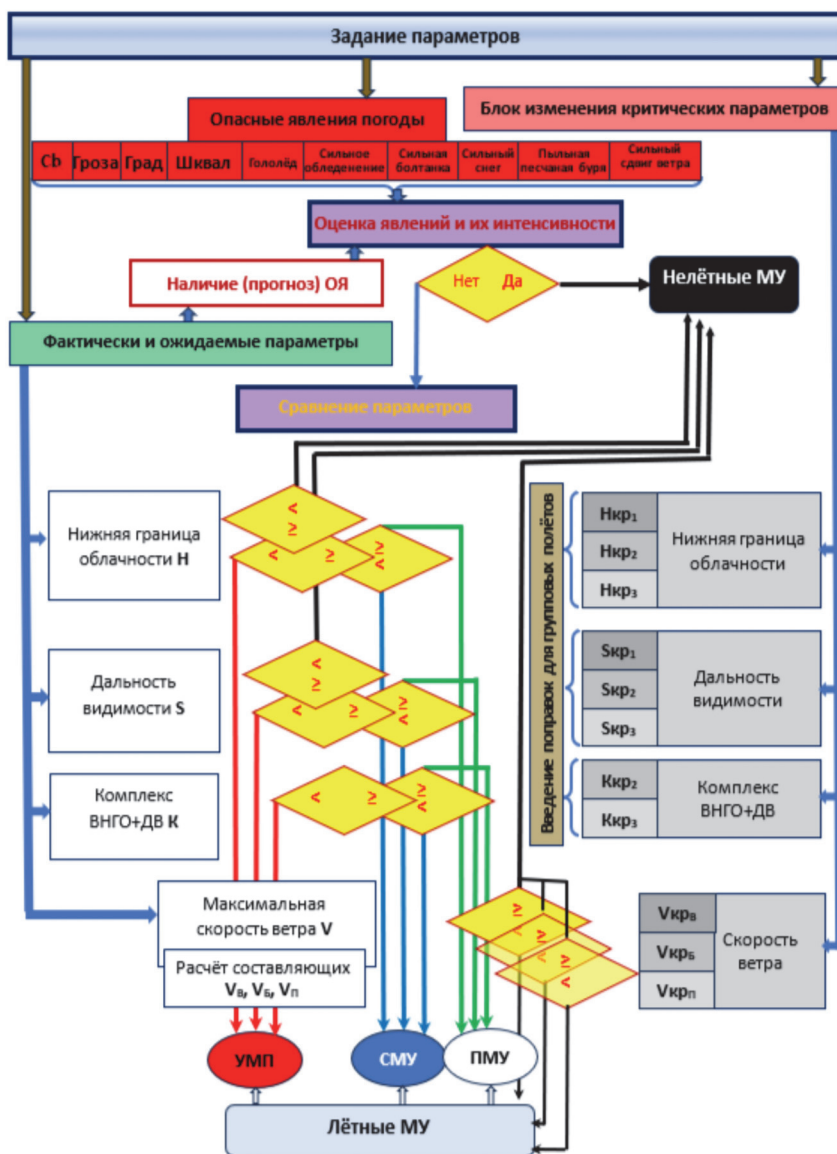


Рис. 3. Схема методики определения метеорологических условий полетов государственной авиации по спутниковым данным

Для оценки видимости под низкой слоистой облачностью и в туманах дополнительно были построены регрессионные уравнения, в качестве предикторов использовались значения яркостных температур на верхней границе облачности (тумана) и подстилающей поверхности над открытыми участками, а также данные о водозапасае и характеристиках ветра (в зимний период в зоне атмосферных фронтов и в неустойчивых воздушных массах). Пример уравнения для определения дальности видимости в холодный период года по пункту Воронеж:

$$S = 0,45\Delta T_{я} - 0,21R + 0,18,$$

где R , $\Delta T_{я}$ – стандартизированные значения водозапаса и разности яркостных температур на верхней границе слоистой облачности (тумана) и подстилающей поверхности.

Однако и после этих процедур именно видимость и нижняя граница облачности остались основными источниками ошибочной классификации. Только для градаций видимости от 6 км и более значения оправдываемости классификации составили до 90 %.

Результаты определения отдельных характеристик метеорологических условий полетов по тематическим спутниковым картам представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты классификации характеристик метеорологических условий полетов, %

Характеристика метеорологических условий	Пределы правильной классификации
Форма (сочетание форм) облачности	74–86
Опасные конвективные явления	79–89
Параметры облачности	65–77
Видимость	63–90
Параметры приземного ветра	72–92
Условия в облаках (обледенение, турбулентность)	66–87
Гололедные явления	64–76
Степень сложности погоды	56–88

Всего рассмотрено 1970 случаев, в том числе с летними метеорологическими условиями – 1724, с нелетными – 246 (12,5 %). Соотношение случаев летной и нелетной погоды для различных пунктов на рассматриваемой территории по климатическим данным существенно отличается и зависит от времени года. В целом выборочное соотношение этих двух градаций отражает их естественную повторяемость.

По результатам определения «летности» погоды (табл. 2) получены приемлемые для практических целей результаты (≈ 80 –86 % правильной классификации).

Детализированные характеристики классификации степеней сложности метеорологических условий приведены в табл. 3.

Таблица 2

Результаты классификации летных/нелетных метеорологических условий полетов

Фактически	Определено			
	Летная	Нелетная	Всего	Правильно, %
Летная	1480	244	1724	85,8
Нелетная	50	196	246	79,7
Всего	1530	440	1970	85,1

Таблица 3

Результаты классификации степеней сложности метеорологических условий полетов

Фактически	Определено				
	Нелетная	УМП	СМУ	ПМУ	Правильно, %
УМП	25	102	45	4	58,0
СМУ	19	104	502	101	69,1
ПМУ	6	40	73	703	85,5

Необходимо отметить, что при определении степеней сложности метеорологических условий условно принимались следующие границы между градациями: нелетная погода – нижняя граница облачности менее 100 м и (или) значение дальности видимости менее 1000 м; УМП – ВНГО от 100 до 200 м и (или) ДВ от 1000 до 2000 м; СМУ – ВНГО 300–500 м и (или) ДВ 2–4 км; ПМУ – отсутствие облачности менее 500 м и дальность видимости более 4 км. Все случаи с наличием опасных явлений отнесены к нелетным метеорологическим условиям.

При «рабочих» условиях повторяемости фактических метеоусловий по градациям распределились следующим образом: ПМУ – 822 случая, СМУ – 726, УМП – 176. Правильная классификация по всем случаям составила 75,8 %. Но эти достаточно высокие значения получены преимущественно за счет правильной диагностики простых метеорологических условий. Если рассмотреть повторяемости правильного определения других степеней сложности погоды, то результаты окажутся не столь высокими, а в случае с установленным минимумом погоды (58 %) и вовсе малоинформативными для практического использования.

По трем пунктам, находящимся в специфических физико-географических условиях (предгорье, побережье, выраженная антропогенная нагрузка), правильная классификация степени сложности погоды составила менее 65 %. Из этого следует необходимость разработки дополнительных процедур для адаптации представленной методики к специфическим местным природным условиям.

После получения результатов восстановления степени сложности текущих метеорологических условий исследовались возможности определения их эволюции на 2–6 ч. В основу подхода был положен метод экстраполяции. Для наиболее сложных синоптических ситуаций (прохождение атмосферных фронтов, случаи циклогенеза и регенерации циклонов, ярко выраженных местных физико-географических особенностей) разрабатывались частные методики эволюции синоптических объектов и связанных с ними метеорологических условий [Акимов, Расторгуев, Неижмак, 2020; Расторгуев, Акимов, Божко, 2022].

Результаты оправдываемости на сроки до 2–3 ч оказались соизмеримыми с показателями диагностических выводов. При заблаговременности более 3 ч начинает сказываться нелинейность тренда и показатели по большинству пунктов снижаются на 15–20 %. Для решения задачи сверхкраткосрочного прогноза метеорологических условий полетов государственной авиации разрабатывается методика на основе нейросетевых технологий по оригинальным данным с штатных комплексов приема и обработки специализированной спутниковой информации.

На завершающем этапе исследования разработанная методика была реализована в программном продукте для автоматизированного проведения расчетов.

Заключение

Проведено исследование возможности комплексного использования регулярной тематической продукции метеорологических космических аппаратов и ее адаптации к задачам государственной авиации.

Систематизированы метеорологические факторы, ограничивающие или исключающие применение государственной авиации, и исследованы образцы информационной продукции разработчиков спутниковых метеорологических карт.

На основе сопоставления влияющих факторов и тематической спутниковой продукции разработана методика мониторинга метеорологических условий полетов.

Проверка методики на фактическом материале показала результаты, приемлемые для практического использования при метеорологическом обеспечении государственной авиации. Разработаны рекомендации специалистам метеорологической службы по практическому использованию результатов исследования. Для автоматизации реализации представленной методики разработана компьютерная программа.

Список литературы

Акимов Л. М., Расторгуев И. П., Неижмак А. Н. Диагноз и прогноз циклогенеза по данным спутникового зондирования атмосферы // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 2 (376). С. 60–78.

Космический мониторинг опасных природных явлений на территории России / В. В. Асмус, Г. М. Иоффе, Л. С. Крамарева [и др.] // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 20–32.

Блощинский В. Д., Крамарева Л. С., Шаилова Ю. А. Детектирование облачного покрова с использованием нейронной сети по данным прибора МСУ-ГС космического аппарата «Арктика-М» № 1 // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37, № 2 (421). С. 99–104.

Болелов Э. А. Метеорологическое обеспечение полетов гражданской авиации: проблемы и пути их решения // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2018. Т. 21, № 5. С. 117–129.

Бухаров М. В., Бухаров В. М. Анализ быстро растущей мезомасштабной системы глубокой конвекции по картам спутникового диагноза // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 2 (376). С. 23–38.

Волкова Е. В. О классификации типов облачности пороговым методом по спутниковым ИК-данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 1. С. 271–286.

Нерушев А. Ф., Ивангородский Р. В. Определение зон турбулентности в верхней тропосфере на основе спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 1. С. 205–215.

Применение карт спутникового диагноза для анализа метеорологических условий в районе авиационного происшествия / М. В. Бухаров, Н. С. Миронова, В. М. Лосев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 3. С. 285–292. URL: http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2012t3/285-292.pdf

Расторгуев И. П., Акимов Л. М., Божко А. С. Исследование многолетней динамики пространственно-временного распределения облачных систем по данным специализированных космических аппаратов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2022. № 2. С. 78–88.

Филей А. А., Андреев А. И., Шаилова Ю. А. Программный комплекс восстановления параметров облачности по спутниковым данным ВПО-СД. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 1. С. 106–121.

Шакина Н. П., Горлач И. А., Скриптунова Е. Н. Использование спутниковых данных о конвективной облачности для анализа летных происшествий и их предупреждения // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 94–101.

Шакина Н. П., Иванова А. Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М. : Триада лтд, 2016. 312 с.

Classification of clouds in satellite imagery using adaptive fuzzy sparse representation / W. Jin, F. Gong, X. Zeng, R. Fu // *Sensors*. 2016. Vol. 16, N 12. Art. N 2153. <https://doi.org/10.3390/s16122153>

Comparison of cloud type classification with split-window algorithm based on different infrared band combinations of Himawari-8 satellite / B. Purbantoro, J. Aminuddin, N. Manago [et al.] // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 11 (24). Art. N 2944. <https://doi.org/10.3390/rs11242944>

Determining the Flight Icing Threat to aircraft with single-layer cloud parameters derived from operational satellite data / W. L. Jr. Smith, P. Minnis, C. Fleegeer [et al.] // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2012. Vol. 51. P. 1794–1810.

Dim J. R., Takamura T. Alternative approach for satellite cloud classification: edge gradient application // *Advances in Meteorology*. 2013. Art. ID 584816. URL: <https://www.hindawi.com/journals/amete/2013/584816> (date of access: 03.03.2024)

Ellrod G. P., Gultepe I. Inferring low cloud base heights at night for aviation using satellite infrared and surface temperature data // *Pure and Applied Geophysics*. 2007. Vol. 164. P. 1193–1205.

Gulpepe I., Pagowski M., Reid J. Using surface data to validate a satellite-based fog detection scheme // *Weather and Forecasting*. 2007. Vol. 22. P. 444–456.

Huffman G. J., Levizzani V., Kidd C. Integrated multi-satellite retrievals for the global precipitation measurement (GPM) mission (IMERG) // *Satellite Precipitation Measurement*. 2020. Vol. 67. P. 343–353. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9_19

Kerdraon G., Le Glaue H. EUMETSAT NWC SAF Report to Nowcasting and very short-range forecasting. Scientific and validation report for the cloud product processors of the NWC/GEO/NWC/CDOP3/GEOCMS/SCI/VR/Cloud. Iss. 1. Rev. 1. Apr. 10, 2019. 51 p.

Pavolonis M. J. GOES-R Advanced Baseline Imager (ABI) Algorithm Theoretical Basis Document for Cloud Type and Cloud Phase. 2010. 86 p. URL: https://www.star.nesdis.noaa.gov/goesr/docs/ATBD/Cloud_Phase.pdf (date of access: 07.04.2024).

Sadeghi M., Asanjan A. A., Faridzad M. PERSIANN-CNN: Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks – convolutional neural networks // *J. Hydrometeorology*. 2019. Vol. 20. P. 2273–2289. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0110.1>

Transforming satellite data into weather forecasts / E. Berndt, A. Molthan, W. Vaughan, K. Fuell // *Geophysics*. 2017. Vol. 98. <https://doi.org/10.1029/2017EO064449>

Veillette M., Samsi S., Mattioli C. Sevir: A storm event imagery dataset for deep learning applications in radar and satellite meteorology // *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2020. Vol. 33. P. 22009–22019.

Wolfson M., Clark D. Advanced aviation weather forecasts. Lincoln laboratory journal. 2006. Vol. 1. P. 31–58.

References

Akimov L.M., Rastorguev I.P., Neizhmak A.N. Diagnostika i prognoz tsiklogeneza po dannym sputnikovogo zondirovaniya atmosfery [Diagnosis and prognosis of cyclogenesis based on satellite sensing of the atmosphere]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological research and forecasts], 2020, no. 2 (376), pp. 60-78. (in Russian)

Asmus V.V., Ioffe G.M., Kramareva L.S., Krovotyntsev V.A., Milekhin O.E., So-lov'eva I.A. Kosmicheskii monitoring opasnykh prirodnykh yavlenii na territorii Rossii. [Space monitoring of natural hazards in Russia]. *Meteorologiya i gidrologiya*. [Meteorology and hydrology] 2019. no 11. pp. 20-32. (in Russian)

Bloshchinskii V.D., Kramareva L.S., Shamilova Yu.A. Detektirovanie oblachnogo pokrova s ispolzovaniem neironnoi seti po dannym pribora MSU-GS kosmicheskogo apparata "Arktika-M" N 1 [Cloud cover detection using a neural network based on the data of the MSU-GS device of the Arktika-M spacecraft No. 1] *Optika atmosfery i okeana*. [Optics of the atmosphere and ocean], 2024. vol. 37, no. 2, (421). pp. 99-104. (in Russian)

Bolelov E. A. Meteorologicheskoe obespechenie poletov grazhdanskoi aviatsii: problemy i puti ikh resheniya [Meteorological support of civil aviation flights: problems and solutions]. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii* [Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation], 2018, vol. 21, no. 5, pp. 117-129. (in Russian)

Bukharov M.V., Bukharov V.M. Analiz bystro rastushchei mezomasshtabnoi sistemy glubokoi konveksii po kartam sputnikovogo diagnoza [Analysis of a rapidly growing mesoscale deep convection system based on satellite diagnosis maps]. *Gidrometeorologicheskie is-sledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological research and forecasts], 2020, no. 2 (376), pp. 23-38. (in Russian)

Volkova E.V. O klassifikatsii tipov oblachnosti porogovym metodom po sputnikovym IK-dannym [On the classification of cloud types by the threshold method based on satellite IR data]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2023, vol. 20, no. 1. pp. 271-286. (in Russian)

Nerushev A.F., Ivangorodskii R.V. Opredelenie zon turbulentnosti v verkhnei troposfere na osnove sputnikovyykh izmerenii [Determination of turbulence zones in the upper troposphere based on satellite measurements]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2019, vol. 16, no. 1. pp. 205-215. (in Russian)

Bukharov M.V., Mironova N.S., Losev V.M., Bukharov V.M., Misnik L.A. Prime-nenie kart sputnikovogo diagnoza dlya analiza meteorologicheskikh uslovii v raione aviatsionnogo proissh-estviya [The use of satellite diagnosis maps for the analysis of meteorological conditions in the area of an aviation accident]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2012, vol. 9, no. 3, pp. 285-292. Available at: http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2012t3/285-292.pdf (in Russian)

Rastorguev I.P., Akimov L.M., Bozhko A.S. Issledovanie mnogoletnei dinami-ki prostranstvenno-vremennogo raspredeleniya oblachnykh sistem po dannym spetsializirovannykh kosmicheskikh apparatov [Investigation of the long-term dynamics of the spatial and temporal distribution of cloud systems based on data from specialized spacecraft]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo uni-versiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya* [Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geography. Geo-ecology], 2022, no. 2, pp. 78-88. (in Russian)

Filei A.A., Andreev A.I., Shamilova Yu.A. Programnyi kompleks vosstanovleniya parametrov oblachnosti po sputnikovym dannym VPO-SD [Software package for restoring cloud parameters based on satellite data VPO-SD]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2024, vol. 21, no. 1. pp. 106-121. (in Russian)

Shakina N.P., Gorlach I.A., Skriptunova E.N. Ispolzovanie sputnikovyykh dan-nykh o konvektivnoi oblachnosti dlya analiza letnykh proissheshtyiv i ikh preduprezhdeniya [The use of satellite data on convective clouds for the analysis of flight accidents and their prevention]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 2021, no. 12, pp. 94-101. (in Russian)

Shakina N.P., Ivanova A.R. *Prognozirovanie meteorologicheskikh uslovii dlya aviatsii*. [Forecasting meteorological conditions for aviation]. Moscow, Triada Ltd. Publ., 2016, 312 p. (in Russian)

Berndt E., Molthan A., Vaughan W., Fuell K. Transforming satellite data into weather forecasts. *Geophys.*, 2017, vol. 98. <https://doi.org/10.1029/2017EO064449> (date of access: 03.03.2024).

Dim J.R., Takamura T. Alternative approach for satellite cloud classification: edge gradient application. *Advances in Meteorology*, 2013, Art. ID 584816. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/amete/2013/584816> (date of access: 03.03.2024).

Ellrod G.P., Gultepe I. Inferring low cloud base heights at night for aviation using satellite infrared and surface temperature data. *Pure and Applied Geophysics*, 2007, pp. 164, 1193-1205.

Gulpepe I., Pagowski M., Reid J. Using surface data to validate a satellite-based fog detection scheme. *Weather and Forecasting*, 2007, vol. 22, pp. 444-456.

Huffman G. J., Levizzani V., Kidd C. [et al.] Integrated multi-satellite retrievals for the global precipitation measurement (GPM) mission (IMERG). *Satellite Precipitation Measurement*, 2020, vol. 67. pp. 343-353. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9_19

Jin W., Gong F., Zeng X., Fu R. Classification of clouds in satellite imagery using adaptive fuzzy sparse representation. *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 12, art. no. 2153. <https://doi.org/10.3390/s16122153>

Kerdran G., Le Glaue H. EUMETSAT NWC SAF Report to Nowcasting and very short-range forecasting. *Scientific and validation report for the cloud product processors of the NWC/GEO/NWC/CDOP3/GEOCMS/SCI/VR/Cloud*, 2019, iss. 1, rev. 1, pp. 51.

Pavolonis M. J. GOES-R Advanced Baseline Imager (ABI) Algorithm Theoretical Basis Document for Cloud Type and Cloud Phase, 2010, pp 86. Available at: https://www.star.nesdis.noaa.gov/goesr/docs/ATBD/Cloud_Phase.pdf (date of access: 03.03.2024).

Purbantoro B., Aminuddin J., Manago N. et al. Comparison of cloud type classification with split-window algorithm based on different infrared band combinations of Himawari-8 satellite. *Remote Sensing*, 2018, vol. 11 (24), art. no. 2944. <https://doi.org/10.3390/rs11242944>

Sadeghi M., Asanjan A.A., Faridzad M. et al. PERSIANN-CNN: Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks – convolutional neural networks. *J. Hydrometeorology*, 2019, vol. 20, pp. 2273-2289. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0110.1>.

Smith W. L. Jr., Minnis P., Fleegeer C. et al. Determining the Flight Icing Threat to aircraft with single-layer cloud parameters derived from operational satellite data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2012, vol. 51, pp.1794–1810.

Veillette M., Samsi S., Mattioli C. Sevir: A storm event imagery dataset for deep learning applications in radar and satellite meteorology. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2020, vol. 33. pp. 22009-22019.

Wolfson, M., Clark, D. Advanced aviation weather forecasts. *Lincoln laboratory journal*, 2006, vol. 1, pp. 31-58.

Сведения об авторах

Расторгуев Игорь Поликарпович

*кандидат географических наук, доцент
Военно-воздушная академия
Россия, 394064, г. Воронеж,
ул. Краснознаменная, 153/5
e-mail: iprastor@yandex.ru*

Денег Иван Зиновьевич

*адъюнкт
Военно-воздушная академия
Россия, 394064, г. Воронеж,
ул. Краснознаменная, 153/5
e-mail: denega5190@mail.ru*

Расторгуева Анастасия Игоревна

*научный сотрудник
Военно-воздушная академия
Россия, 394064, г. Воронеж,
ул. Краснознаменная, 153/5
e-mail: airsucces08@rambler.ru*

Information about the authors

Rastorguev Igor Polikarpovich

*Candidate of Sciences (Geography),
Associate Professor
Air Force Academy
153/5, Krasnoznamennaya st., Voronezh,
394064, Russian Federation
e-mail: iprastor@yandex.ru*

Denega Ivan Zinovievich

*Postgraduate
Air Force Academy
153/5, Krasnoznamennaya st., Voronezh,
394064, Russian Federation
e-mail: denega5190@mail.ru*

Rastorgueva Anastasia Igorevna

*Research Scientist
Air Force Academy
153/5, Krasnoznamennaya st., Voronezh,
394064, Russian Federation
e-mail: airsucces08@rambler.ru*

Код научной специальности: 1.6.18

Статья поступила в редакцию 16.05.2024; одобрена после рецензирования 08.11.2024; принята к публикации 10.12.2024

The article was submitted May, 16, 2024; approved after reviewing November, 08, 2024; accepted for publication December, 10, 2024