

**Применение модели глобальной атмосферы в оценке
летно-технических характеристик и построении рубежа
достижимости при подготовке полетных заданий
для беспилотных летательных аппаратов
морского базирования**

© Р.Н. Филиппов, Ю.А. Иванов, Д.В. Курбатов, А.А. Корнилов

АО «ОКБ «Новатор», г. Екатеринбург, 620017, Россия

Использование стандартной атмосферы для оценки летно-технических характеристик беспилотных летательных аппаратов по дальности и высотному профилю полета не позволяет учесть разнообразие метеофакторов на различных маршрутах и, как следствие, достаточно точно оценить максимальную дальность полета ввиду того, что является стратегией «наихудшего сочетания метеофакторов» для всей поверхности Земли в любое время года. Показана возможность применения модели глобальной атмосферы при оценке дальности полета, а также выполнено сравнение этой модели с архивом метеоданных. В целях построения рубежа достижимости при подготовке маршрутов полета беспилотных летательных аппаратов морского базирования предложено использовать модель глобальной атмосферы для учета метеопараметров данного места и месяца, поскольку, например, ветер особенно сильно влияет на дальность полета и имеет существенную сезонно-широтную изменчивость. Представлена методика оценки предельно допустимой длины оперативного участка при подготовке маршрута полета с использованием модели глобальной атмосферы и упрощенной математической модели полета.

Ключевые слова: модель глобальной атмосферы, оценка летно-технических характеристик, рубеж достижимости, оценка оперативного участка

Введение. Методика оценки летно-технических характеристик (ЛТХ) «по наихудшему сочетанию метеофакторов» позволяет получить существенно заниженную оценку дальности полета, что подтверждается результатами реальных экспериментов. Недостатки стандартной атмосферы при использовании в математических моделях полета (ММП) заключаются в постоянстве параметров атмосферы от точки старта до конечной точки маршрута (КТМ) и отсутствии статистических данных о ветре, который является основным фактором. Поэтому стандартная атмосфера не позволяет адекватно учитывать изменение параметров атмосферы на маршрутах с большими расстояниями. В действительности в зависимости от места применения, сезона и длины маршрута атмосферные параметры могут изменяться очень существенно.

Цель настоящей работы — рассмотреть возможность применения модели глобальной атмосферы (МГА), разработанной в ФГБУ РАРАН [1],

в ММП беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для оценки ЛТХ, провести сравнение используемой в математической модели полета стандартной атмосферы [2] с глобальной, а также показать применение МГА при расчетах параметров маршрута на оперативном участке (ОУ) — участке маршрута при полете над морем, параметры которого рассчитываются непосредственно перед запуском БПЛА.

Таким образом, в работе рассмотрено три основных вопроса:

1) оценка выигрыша в дальности полета при использовании МГА по сравнению с методикой «наихудшего сочетания метеофакторов», которая дает заниженную оценку по дальности;

2) обоснование перехода с уровня вероятности достижения дальности $0,993 (2,7\sigma)$ на уровень $0,95$, равный вероятности безотказной работы;

3) оценка выигрыша в дальности при расчете маршрута на ОУ с использованием улучшенных оценок дальности полета в зависимости от места старта и времени года. Это касается увеличения длины ОУ маршрута и радиуса рубежа досягаемости стационарного участка (СУ) — участка маршрута при полете над сушей, параметры которого рассчитываются заблаговременно, до пуска БПЛА.

Сравнение модели глобальной атмосферы с архивом погоды.

В целях сравнения МГА с архивом погоды [3, 4] в ММП проводили расчеты с применением метода статистического имитационного моделирования для оценки дальности полета. При моделировании полета с использованием архива погоды параметры атмосферы формировались по следующим условиям.

1. Поскольку ввиду отсутствия стационарных метеостанций над морем не имеется достаточного объема метеоданных, на ОУ использовалась МГА для расчета температуры, давления, плотности на высоте от 0 до 5000 м и составляющих ветра на высотах от 250 до 5000 м; параметры зонального и меридионального ветра на высотах от 0 до 250 м вычисляли с помощью данных архива ветров [4, 5].

2. При полете на СУ использовали архив погоды со стационарных метеостанций [6]. По параметрам атмосферы с метеостанций вычисляли температуру, давление, плотность на высоте от 0 до 5000 м и составляющие ветра на высотах от 0 до 250 м. На высотах от 250 до 5000 м параметры зонального и меридионального ветра рассчитывали с помощью МГА [7–10].

Расчеты статистических параметров проводили на 16 типовых маршрутах: восемь стандартных маршрутов (1–8) и восемь маршрутов с длинным ОУ (9–16) для двух месяцев (январь, июль). На рис. 1, а (стандартные маршруты) и рис. 1, б (маршруты с длинным ОУ) представлены результаты статистического моделирования, а именно различия по дальности полета при расчете с применением МГА и архива погоды в процентах.

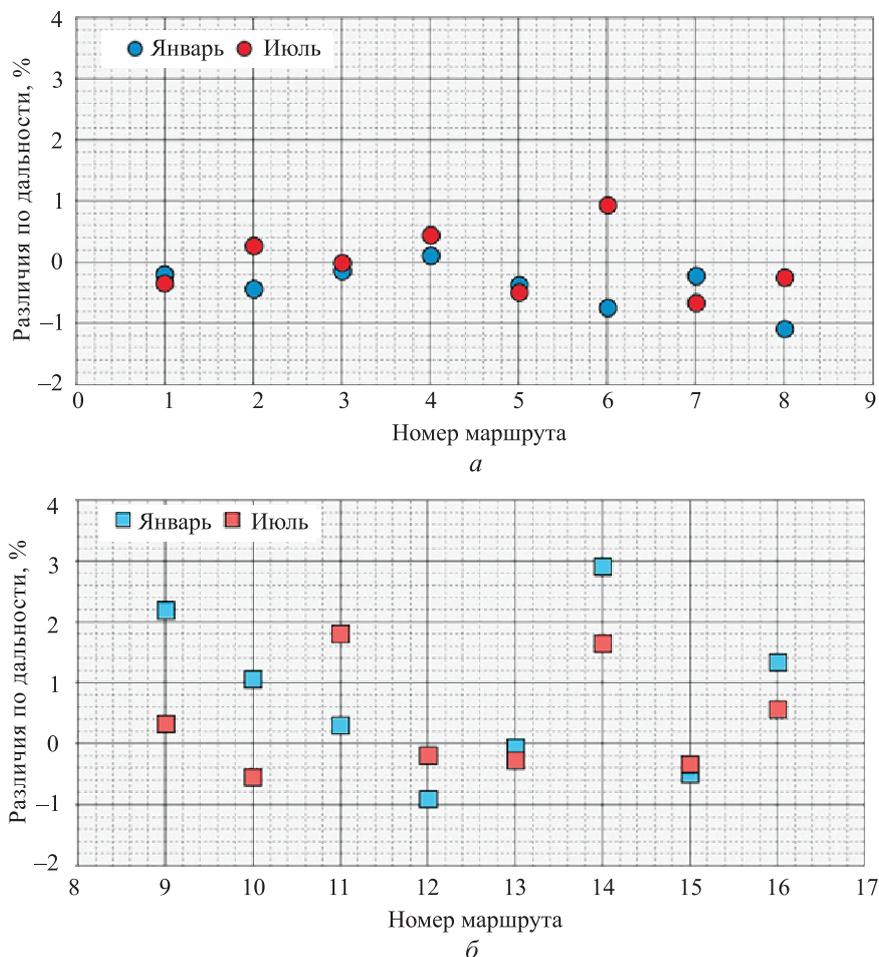


Рис. 1. Различия по дальности полета при расчете с использованием МГА и архива погоды для стандартных маршрутов (а) и для маршрутов с длинным оперативным участком (б)

Как видно, длинный ОУ влияет на ошибку оценки дальности при использовании МГА в зависимости от маршрута и сезона; при этом максимальная ошибка не превышает 3 %.

Применение модели глобальной атмосферы для оценки дальности. Для оценки ЛТХ (например, дальности полета до полного выгорания топлива) с использованием МГА было выбрано несколько трасс в разных частях Земли. Для каждого маршрута и месяца (январь, апрель, июнь, октябрь) вычисляли по 1000 реализаций. В качестве оценки по дальности для каждого маршрута и месяца выбирали дальность, которая с вероятностью 0,993 будет достигнута БПЛА.

В таблице приведен прирост в оценке дальности по месяцам и маршрутам, полученной с использованием МГА, относительно дальности, рассчитанной по методике «наихудшего сочетания метеофакторов» с вероятностью 0,993.

Прирост по дальности, %

Месяц	Номер маршрута											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Январь	11,4	6,4	12,0	7,4	4,3	10,7	12,9	11,5	12,9	11,5	11,2	12,8
Апрель	12,4	7,5	12,1	9,3	5,0	8,6	13,0	10,7	13,0	10,7	13,0	12,2
Июнь	12,8	8,0	11,9	9,9	5,7	8,6	12,2	12,5	12,2	12,5	13,7	13,0
Октябрь	12,4	6,4	12,1	9,5	5,6	9,7	12,6	12,3	12,6	12,3	12,0	12,8

Расчеты показали, что использование МГА позволяет увеличить оценку по дальности полета на 4–13 % в зависимости от места и времени по сравнению с результатами расчетов по существующей методике. Таким образом, установлено, что дальность полета не может задаваться одним числом для всех маршрутов и месяцев.

Далее изложена методика оценки дальности при подготовке маршрутов полета.

Обоснование перехода с уровня вероятности достижения дальности 0,993 (2,7σ) на уровень 0,95. Вероятность успешного выполнения задачи (ВУВЗ) описывается цепочкой событий и вычисляется по формуле

$$P_1 = P_{vbr} P_{top} P_{bdk}, \quad (1)$$

где P_1 — ВУВЗ одного БПЛА; P_{vbr} — вероятность безотказной работы; P_{top} — вероятность падения после выработки топлива; P_{bdk} — вероятность безопасного достижения КТМ.

Требуемый наряд БПЛА для ВУВЗ, равной 0,9, определяется по формуле

$$N_{0,9} = \frac{\ln(1-0,9)}{\ln(1-P_1)}. \quad (2)$$

Для оценок примем следующие уровни вероятностей:

$$P_{vbr} = 0,95; \quad P_{top} = 0,993 / 0,95; \quad P_{bdk} = 0,686.$$

В результате получим

$$N_{0,9} = 2,2 \text{ для } P_{top} = 0,993, \quad N_{0,9} = 2,4 \text{ для } P_{top} = 0,95.$$

Различие составляет 0,2 БПЛА, и число БПЛА будет принято равным 3, чтобы ВУВЗ была не меньше требуемого нормативного уровня, т. е. уменьшение вероятности P_{top} до уровня P_{vbr} практически не влияет на величину требуемого наряда БПЛА для достижения ВУВЗ требуемого уровня, особенно с учетом большой неопределенности в уровне вероятности P_{bdk} . При таком переходе, как следует

из приведенных выше графиков, достижимая дальность полета увеличивается на 3 % для предельно длинных маршрутов.

Для сравнения укажем, что предполагается усложнение конструкции БПЛА в целях более полной выработки остатков топлива, а это увеличивает дальность полета на 2 %. Таким образом, при оценке дальности рекомендуется использовать уровень 0,95 как реперный. Требуемый уровень вероятности досягаемости КТМ может быть задан любым и вычисляется по формуле (7), приведенной далее.

Использование глобальной модели атмосферы в построении рубежа досягаемости. Улучшения ЛТХ в части уточнения оценок по дальности можно достичь как для СУ при заблаговременном решении задачи планирования, так и для ОУ перед стартом БПЛА. Рассмотрим построение рубежа досягаемости с использованием МГА и фиксированного СУ. Дальность полета БПЛА сильно зависит от скорости и направления ветра. Модель глобальной атмосферы позволяет оценить длину ОУ с учетом сезонно-широтных метеоданных для определенного места и месяца. Для построения рубежа досягаемости также необходимо заранее рассчитать остатки топлива для конкретного СУ по всем 12 месяцам (интервалы разбиения могут варьироваться), полученные результаты расчетов остатков топлива должны содержаться в исходных данных (ИД) на построение ОУ.

Сначала по координатам КТМ прокладывают маршрут до первого стационарного пункта поворота маршрута (ППМ_{С1}). Используя ММП с МГА, статистическим имитационным моделированием определяют остатки топлива в ППМ_{С1}, необходимые для пролета СУ, для всех 12 месяцев. По результатам моделирования массив остатков топлива M_r (математические ожидания и СКО для каждого месяца) записывают в ИД вместе с параметрами маршрута стационарного участка.

При нахождении в заданном районе для текущего месяца определяют радиус рубежа досягаемости R_d первого стационарного ППМ заданного маршрута СУ. Значение R_d вычисляют с использованием таблицы удельной дальности по формуле

$$R_d = Lw(h, T, uve) m_r, \quad (3)$$

где $Lw(h, T, uve)$ — таблица удельной дальности, км/кг; uve — проекция среднего месячного ветра на направление радиуса рубежа досягаемости; m_r — остаток топлива по некоторому заданному уровню.

Текущая температура T известна в момент запуска БПЛА, и привлечения данных МГА не требуется. Для вычисления границы «оптимистичного» рубежа досягаемости выбирают направления радиуса рубежа из первого стационарного ППМ. На выбранные направления

проецируют суммы составляющих ветра U (зональный) и W (меридиональный). По формуле (3) вычисляют значения R_d для этих направлений. Таким способом определяют границу «оптимистичного» рубежа досягаемости первого стационарного ППМ для заданного стационарного участка.

Оценка предельно допустимой длины оперативного участка при подготовке полетного задания. После построения рубежа досягаемости выбирают ближайшую точку старта внутри области досягаемости. Из выбранной точки прокладывают маршрут требуемой конфигурации в первый стационарный ППМ.

Используя МГА в точках, расположенных вдоль маршрута, вычисляют составляющие ветра U и W , содержащие не только среднемесячные многолетние значения, но и их вариации. Перед каждым моделированием полета на ОУ необходимо выполнять расчет составляющих скорости ветра с помощью МГА и переводить их в ортодромическую систему координат. Проведя статистическое моделирование полета, получают гистограмму расходов топлива на ОУ (рис. 2).

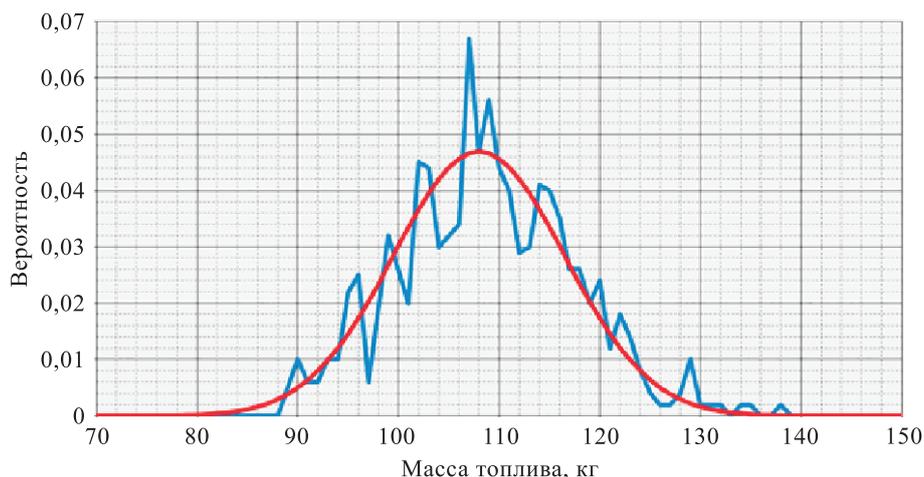


Рис. 2. Расход топлива на оперативном участке:
— гистограмма расхода топлива на оперативном участке;
— аппроксимация расхода топлива нормальным законом

После статистического моделирования полета можно вычислить математическое ожидание $E(m_{c1})$ и СКО расхода топлива на ОУ, так как нормальный закон хорошо аппроксимирует гистограмму расхода топлива (см. рис. 2). Необходимо также вычислить математическое ожидание $E(m_2)$ расхода топлива для первой ортодромии, укороченной на расстояние ΔL_{ort1} . Используя полученные параметры, можно рассчитать удельную дальность по следующей формуле:

$$Lw = \frac{\Delta L_{ort1}}{E(m_{c1}) - E(m_2)}. \quad (4)$$

Распределения вероятностей остатков топлива на СУ (синяя линия) и расходов на ОУ (красная линия) приведены на рис. 3. По некоторому заданному уровню вероятности P_s определяем расход топлива m_c на ОУ, а также остаток топлива m_r на СУ. Далее вычисляем остаток топлива при полете по всему маршруту на ОУ и СУ:

$$\Delta m = m_r - m_c. \quad (5)$$

Математическое ожидание $E(m_c)$ расхода топлива на ОУ корректируется на величину Δm (красная линия на рис. 3 сдвигается влево или вправо в зависимости от знака):

$$E(m_c) = E(m_c) + \Delta m. \quad (6)$$

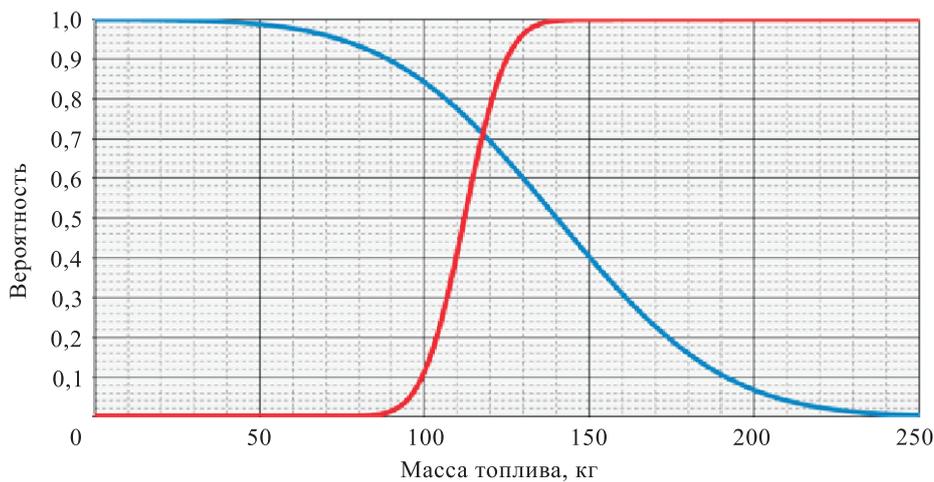


Рис. 3. Распределение вероятностей остатков топлива на СУ и расхода топлива на ОУ:

- вероятность того, что остаток топлива на СУ больше заданного значения;
- вероятность того, что расход топлива на ОУ меньше заданного значения

Вероятность достижения КТМ по топливу рассчитывают по формуле

$$P_{top} = \int_{M_n}^{M_k} f_{oct} P_{rtp} dm, \quad (7)$$

где f_{oct} — плотность вероятности остатков топлива на СУ; P_{rtp} — распределение вероятности расхода топлива на ОУ (красная линия на рис. 3).

Если вероятность P_{top} отличается от требуемого значения (например, 0,95 или любого другого) после поправки математического ожидания расхода топлива на ОУ, то Δm циклически увеличивается или уменьшается на 1 кг (что соответствует увеличению или уменьшению длины первой ортодромии). Пересчет вероятности досягаемости КТМ по топливу P_{top} происходит в каждом цикле и вычисляется по формуле (7). Как только знак разности $P_{top} - 0,95$ изменится, цикл останавливается и необходимо выполнить пересчет длины ОУ по следующей формуле:

$$\sum L_{ort} = \sum L_{ort} + \Delta m Lw, \quad (8)$$

где Lw вычисляется по формуле (4); L_{ort} — длина ортодромии.

Если остаток топлива Δm положительный, то длина маршрута ОУ увеличивается, если отрицательный — уменьшается. В результате получаем предельно допустимую длину ОУ, которая из практических соображений может быть уменьшена.

Заключение. На основании результатов расчетов установлено, что применение МГА для определения ЛТХ увеличивает оценку по дальности на 4...13 % в зависимости от местоположения маршрута и месяца по сравнению с существующей методикой «наихудшего сочетания метеофакторов». Проработана новая методика оценки досягаемости КТМ и оценки предельно допустимой длины оперативного участка по выбранному маршруту с использованием модели глобальной атмосферы и «быстрой» математической модели полета.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Разработка математической модели пограничного слоя глобальной атмосферы на высотах от 0 до 5000 метров для оценки летно-технических характеристик и расчета полетных заданий крылатых летательных аппаратов. *Научно-технический отчет ФГБУ РАРАН*. Москва, 2019, 183 с.
- [2] *ГОСТ 4401–81. Атмосфера стандартная*. Москва, Изд-во стандартов, 1981, 180 с.
- [3] Blended Sea Winds. *National Climatic Data Center*. URL: <http://eclipse.ncdc.noaa.gov/blended-sea-winds> (дата обращения 25.10.2021).
- [4] Integrated Surface Data — ISD-lite. *National Climatic Data Center*. URL: <http://www.ncdc.noaa.gov/isd> (дата обращения 25.10.2021).
- [5] Тимофеев А.А., Хохлова А.В. Определение климатических характеристик ветра в атмосфере на высотах до 600 метров по приземным измерениям. *Сб. материалов науч.-техн. конф. «Моделирование параметров атмосферы при применении систем вооружения»*. Королев, Изд-во ФГБУ «4 ЦНИИ» Минобороны России, 2020, с. 61–64.
- [6] Елисейкин С.А., Искоркин Д.В., Подрезов В.А. *Моделирование и учет параметров атмосферы при применении реактивных систем залпового огня*. Обнинск, Изд-во ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2020, 201 с.

- [7] Дашко Н.А. *Курс лекций по синоптической метеорологии*. Владивосток, Изд-во ДВФУ, 2005, 523 с.
- [8] Елисейкин С.А., Подрезов В.А. *Моделирование и учет параметров атмосферы при применении неуправляемых авиационных ракет*. Обнинск, Изд-во ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2020, 180 с.
- [9] *Tactics, techniques, and procedures for field artillery meteorology*. Headquarters, Department of the Army, 2007, 270 с.
- [10] Воробьева В.В., Володин Е.М. Экспериментальные исследования сезонной предсказуемости погоды, выполненные на основе климатической модели ИВМ РАН. *Математическое моделирование*, 2020, т. 32, № 11, 140 с.

Статья поступила в редакцию 22.06.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Филиппов Р.Н., Иванов Ю.А., Курбатов Д.В., Корнилов А.А. Применение модели глобальной атмосферы в оценке летно-технических характеристик и построении рубежа досягаемости при подготовке полетных заданий для беспилотных летательных аппаратов морского базирования. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 1. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-1-2148>

Филиппов Роман Николаевич — начальник конструкторского бюро отдела 31 АО «ОКБ «Новатор». Область научных интересов: динамика полета и управление движением летательных аппаратов. e-mail: romataurus@yandex.ru

Иванов Юрий Александрович — ведущий инженер-конструктор отдела 31 АО «ОКБ «Новатор». Область научных интересов: системы управления движением летательных аппаратов. e-mail: jury-aleks-ivanov@yandex.ru

Курбатов Дмитрий Васильевич — ведущий инженер-конструктор отдела 31 АО «ОКБ «Новатор». Область научных интересов: системы управления движением летательных аппаратов. e-mail: vimes45@gmail.com

Корнилов Антон Андреевич — инженер-конструктор 2-й категории отдела 31 АО «ОКБ «Новатор». Область научных интересов: динамика полета и управление движением летательных аппаратов. e-mail: sumlink91@yandex.ru

A global atmosphere model in flight performance assessment and building the reach line when preparing flight missions for sea-based unmanned aerial vehicles

© R.N. Filippov, Yu.A. Ivanov, D.V. Kurbatov, A.A. Kornilov

NPO Novator, Ekaterinburg, 620017, Russia

When standard atmosphere is used in range and altitude flight profile assessment of the unmanned aerial vehicles (UAVs) flight performance, it does not take into account the huge variety of meteorological factors on different routes. Hence, it does not accurately assess the maximum flight range. It is a strategy of the “worst combinations in terms of the probability of meteorological factors” for the entire surface of the Earth at all seasons. The paper proposes a global atmosphere model to be used in flight range assessment, and compares the model with the meteorological data archive. To build the reach line when preparing flight missions for sea-based unmanned aerial vehicles, the study proposes to use the global atmosphere model, which takes into account the meteorological parameters of a given place and month, since the wind, for example, has a particularly strong effect on the flight range and has significant seasonal-latitudinal variability. The global atmosphere model and a simplified mathematical flight model can be also used in assessing the maximum permissible length of the operational section when preparing a flight route.

Keywords: *global atmosphere model, flight performance assessment, reach line, operational section assessment*

REFERENCES

- [1] Razrabotka matematicheskoy modeli pogranichnogo sloya globalnoy atmosfery na vysotakh ot 0 do 5000 metrov dlya otsenki letno-tekhnicheskikh kharakteristik i rascheta poletnykh zadaniy krylatykh letatelnykh apparatov [Development of a mathematical model of the boundary layer of the global atmosphere at altitudes from 0 to 5000 meters for assessing flight performance and calculating flight missions of winged aircraft]. *Nauchno-tekhnicheskiiy otchet FGBU RARAN* [Scientific and technical report of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences]. Moscow, 2019, 183 p.
- [2] *GOST 4401–81. Atmosfera standartnaya* [State Standard 4401–81. The standard atmosphere]. Moscow, Izd. standartov Publ., 1981, 180 p.
- [3] Blended Sea Winds. *National Climatic Data Center*. Available at: <http://eclipse.ncdc.noaa.gov/blended-sea-winds> (accessed October 25, 2021).
- [4] Integrated Surface Data — ISD-lite. *National Climatic Data Center*. Available at: <http://www.ncdc.noaa.gov/isd> (accessed October 25, 2021).
- [5] Timofeev A.A., Khokhlova A.V. Opredelenie klimaticheskikh kharakteristik vetra v atmosfere na vysotakh do 600 metrov po prizemnym izmereniyam [Determination of climatic characteristics of wind in the atmosphere at altitudes up to 600 meters by surface measurements]. In: *Sbornik materialov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Modelirovanie parametrov atmosfery pri primenenii sistem vooruzheniya»* [Proceedings of the scientific and technical conference “Modeling of atmospheric parameters when using weapons systems”]. Korolev, 4th Central Research Institute of the Ministry of Defence of the Russian Federation Publ., 2020, pp. 61–64.

- [6] Eliseykin S.A., Iskorkin D.V., Podrezov V.A. *Modelirovanie i uchet parametrov atmosfery pri primenenii reaktivnykh sistem zalpovogo ognya* [Modeling and accounting for atmospheric parameters when using multiple launch rocket systems]. Obninsk, FSBI All-Russia Hydrometeorological Data Research Institute Publ., 2020, 201 p.
- [7] Dashko N.A. *Kurs lektsiy po sinopticheskoy meteorologii* [A course of lectures on synoptic meteorology]. Vladivostok, FEFU Publ., 2005, 523 p.
- [8] Eliseykin S.A., Podrezov V.A. *Modelirovanie i uchet parametrov atmosfery pri primenenii nepravlyaemykh aviatsionnykh raket* [Modeling and accounting for atmospheric parameters when using unguided aircraft missiles]. Obninsk, FSBI All-Russia Hydrometeorological Data Research Institute Publ., 2020, 180 p.
- [9] *Tactics, techniques, and procedures for field artillery meteorology*. Headquarters, Department of the Army, 2007, 270 p.
- [10] Vorobyeva V.V., Volodin E.M. *Matematicheskoe modelirovanie — Mathematical Models and Computer Simulations*, 2020, vol. 32, no. 11, pp. 47–58.

Filippov R.N., Head of the design bureau, Department 31, NPO Novator. Research interests: flight dynamics, aircraft navigation and control. e-mail: romataurus@yandex.ru

Ivanov Yu.A., Lead design engineer, Department 31, NPO Novator. Research interests: aircraft navigation and control systems. e-mail: jury-aleks-ivanov@yandex.ru

Kurbatov D.V., Lead design engineer, Department 31, NPO Novator. Research interests: aircraft navigation and control systems. e-mail: vimes45@gmail.com

Kornilov A.A., Design engineer of the 2nd category, Department 31, NPO Novator. Research interests: flight dynamics, aircraft navigation and control. e-mail: sumlink91@yandex.ru