

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ. ЭКСПЕРИМЕНТ

## MATHEMATICAL MODELS. EXPERIMENT

УДК 551.501

DOI: 10.21209/2658-7114-2020-15-3-52-74

**Виталий Иосифович Акселевич<sup>1</sup>**,

кандидат физико-математических наук, доцент,  
Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
(194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7),  
e-mail: vaksster@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5041-3511

**Геннадий Иванович Мазуров<sup>2</sup>**,

доктор географических наук, профессор,  
Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
(194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7),  
e-mail: nanmaz@rambler.ru

ORCID: 0000-0002-8669-612X

**Иван Алексеевич Тарабукин<sup>3</sup>**,

кандидат физико-математических наук,  
Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
(194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7),  
e-mail: tarabukin@mail.ru

ORCID: 0000-0002-5413-5758

**Камиль Шейхович Хайруллин<sup>4</sup>**,

кандидат географических наук,  
Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
(194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7),  
e-mail: khairullink@mail.ru

### Климатические масштабы и репрезентативность аэрологических наблюдений применительно к мезоклиматическим прогностическим моделям

В статье рассматриваются масштабы климата и метеорологические процессы, которые их формируют. Поднимается проблема правомерности отождествления информации, получаемой четырьмя способами: по методам Эйлера, Лагранжа, летательными аппаратами,

<sup>1</sup> В. И. Акселевич занимался подготовкой и редактированием текста, подбором и оформлением ссылок и графических материалов, освещением современного состояния вопроса (1-й раздел), участвовал в формировании заключения.

<sup>2</sup> Г. И. Мазуров предложил концепцию рис. 1, описывал численное моделирование влияния скорости ветра на полеты летательных аппаратов на крейсерском режиме (2-й раздел), участвовал в написании введения и заключения.

<sup>3</sup> И. А. Тарабукин предоставил материалы радиолокационных наблюдений за изменением скорости ветра (3-й раздел).

<sup>4</sup> К. Ш. Хайруллин подал идею написания статьи, участвовал в написании введения, заключения, подготовке раздела, посвящённого масштабам климата, включая табл. 1 «Масштабная классификация климатов», описании аэрологических особенностей Дальнего Востока.

а также доплеровскими радиолокаторами. Подробно рассматриваются радиозондовые наблюдения.

**Ключевые слова:** масштабы климата, репрезентативность, метод Эйлера, метод Лагранжа, ветер тропосферы, струйные течения, доплеровский радиолокатор

**Введение.** Важное значение в метеорологии отводится плотности сети метеорологических станций в зависимости от запросов практики: прогноз погоды, специализированное обслуживание сельского хозяйства, транспорта и авиации, строительства и т. п. Редкая сеть не даёт возможности получить удовлетворительные ответы на эти запросы. Густая сеть вызывает непроизводительные затраты материальных ресурсов и увеличение персонала наблюдателей [8].

В работе показано, что существует косвенный способ вычисления ошибки интерполяции расстояния между метеорологическими станциями. Введена в методику так называемая ошибка экстраполяции, как функция расстояния между ними. Несколько ранее эта функция была введена в работах А. Н. Колмогорова и А. М. Обухова [14; 15].

Внесение метода оптимальной интерполяции вместо линейной обеспечивает точность расчёта, которая превосходит точность наблюдений. Сотрудники ГГО также занимались планированием сети климатологических станций [5; 6]. Докладчики комиссии по климатологии, рассматривая густоту сети с точки зрения практики, разделяли различные виды наблюдений: температуру воздуха, осадки, явления погоды и т. д. Были рекомендованы расстояния между реперными станциями 300–400 км. По классификации ВМО расстояние между станциями 2-го класса составляет 50–60 км, между станциями 3-го класса (постами), где наблюдения проводятся над температурой воздуха, осадками и атмосферными явлениями, рекомендовано расстояние около 30 км. В различных физико-географических условиях эти расстояния могут меняться. В докладе подробно рассмотрена репрезентативность расстояний между аэрологическими станциями: они совпадают с расстояниями между реперными метеорологическими станциями и составляют около 300 км.

В таблице приводится масштабная классификация климатов в зависимости от размера метеорологических процессов. Современное оборудование (радиолокаторы: профилеры, спутники, дроны) позволяет получать необходимую метеоинформацию помимо стандартных метеорологических станций. Если горизонтальные составляющие репрезентативности метеостанций достаточно разработаны, то вопросы вертикальной репрезентативности наблюдений и особенно репрезентативность временных интервалов самих наблюдений являются малоизученными или вовсе не рассматривались.

В статье сделана попытка на примере аэрологических наблюдений оценить значимость этих понятий.

Таблица

## Масштабная классификация климатов

Тип климата	Географический ареал	Протяжённость, км		Метеорологическая характеристика (пример)	Период стабильного существования метеорологического процесса
		горизонтальная	вертикальная		
Глобальный	Земля	$40 \cdot 10^3$	$10^3$	Планетарный вихрь. Фронт тропической конвергенции	Десятилетия
Континентов и океанов	Континент, океан	$4 \cdot 10^3 \dots 10 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10 \dots 10^2$	Континентальная и морская воздушная масса. Длинные устойчивые волны	Годы
Макроклимат	Ландшафтная страна	$10^3 \dots 4 \cdot 10^3$	$10 \dots 5 \cdot 10$	Центры действия атмосферы. Фронты (арктический, умеренных широт, полярный)	Сезон
Провинции	Провинция	$10^1 \cdot 10^3 \dots 10^3$	$1 \dots 10$	Циклоны. Антициклоны. Фронты (холодные, тёплые). Короткие устойчивые волны	Сутки
Мезоклимат	Район, урочище	$10^2 \cdot 10^3 \dots 10^1 \cdot 10^3$	$0,2 \dots 1$	Бриз. Фен. Городской остров тепла. Короткие неустойчивые волны	Сутки, часы
Топоклимат	Часть района	$10^3 \cdot 10^3 \dots 10^2 \cdot 10^3$	$10^2 \dots 0,2$	Слой обращения	Часы
Микроклимат	Фация	$10^5 \cdot 10^3 \dots 10^3 \cdot 10^3$	$10^4 \dots 10^2$	Озёра холода. Радиационный режим склонов. Ветер в застройке	Часы, минуты
Наноклимат	Медальон, нанорельеф	$10^7 \cdot 10^3 \dots 10^5 \cdot 10^3$	$10^6 \dots 10^4$	Уровень шероховатости	Минуты, секунды
Пикоклимат	Тип почвы	$10^9 \cdot 10^3 \dots 10^7 \cdot 10^3$	Поверхность почвы	Теплопроводность почвы	Часы, минуты

*Современное состояние вопроса.* Регулярные инструментальные гидрометеорологические измерения во всём мире и, в частности, на территории Российской Федерации, производятся с 1891 г. [3]. До этого они были эпизодическими и выполнялись некачественными приборами, которые не подвергались поверке. Кроме того, количество гидрометеорологических станций было очень небольшим, и оно постепенно увеличивалось. Место расположения таких станций выбиралось таким, чтобы показания приборов на станции были репрезентативными для окружающего пространства.

С точки зрения метрологии, истинные значения измеряемых параметров отличаются от действительных значений, найденных (измеренных) экспериментальным путём [9]. К сожалению, первые являются более точными и отличаются от измеренных. В гидрометеорологии существуют много подходов к измерению величин и различных приборов для этого. В итоге мы часто сравниваем несравнимые по точности измеренные результаты. В статье предпринята попытка показать допустимость или недопустимость отождествления информации, получаемой по методам Эйлера и Лагранжа, с помощью ЛА и радиолокаторов, а также определить предпочтения их использования при учёте влияния ветра в полёте ЛА на крейсерском режиме.

За последние почти 130 лет, когда проводятся регулярные гидрометеорологические наблюдения, окружающая среда значительно изменилась, в том числе и за счёт антропогенного фактора, а приборы для измерения состояния этой среды усовершенствовались. Так, большие города выросли в высоту и расширились по площади. В итоге они существенно изменили ветровой режим особенно в локальном масштабе и термический режим за счёт попадания метеостанций в остров тепла больших городов [1; 4]. В результате при расчёте средних многолетних характеристик допускается не менее двух систематических ошибок:

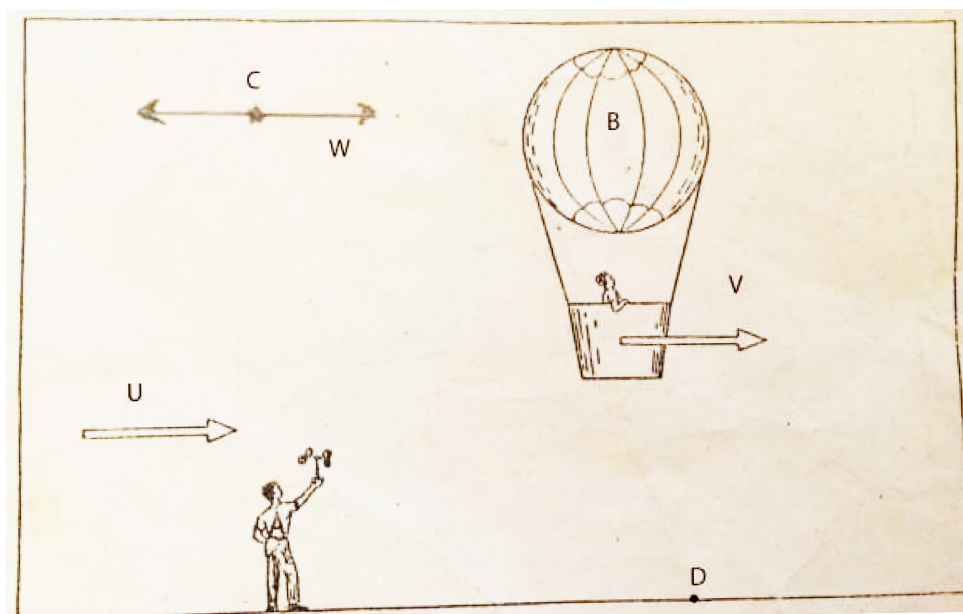
- 1) осреднение метеорологических величин производится без учёта возрастающего количества станций;
- 2) нарушается репрезентативность показаний метеорологических приборов, поскольку изменился аэродинамический режим обтекания из-за высотного строительства, и метеорологические станции врастают в города с их островом тепла.

В результате измеряется изменённое состояние термического и ветрового режима, в том числе и за счёт антропогенного фактора. Поэтому трудно отделить локальные изменения климата от глобальных.

Для описания полей различных движущихся жидкостей обычно применяется два подхода: метод Эйлера и метод Лагранжа (рис. 1). В первом случае в качестве переменной рассматривается изменение поля скоростей воздушного потока, его температуры и других метеорологических величин в конкретной точке  $(x, y, z)$  пространства в определённый момент времени  $(t)$ . При этом определяются мгновенные значения величин в конкретной точке и осреднённые за различный промежуток времени (от 2 до 10 мин) в этой точке.

Эта информация на синоптической карте считается репрезентативной для площади радиусом 150–300 км на густо освещённой территории (например, Европы), а

для слабо освещённых территорий и океанов еще для больших площадей [1]. Для численных расчётов репрезентативной считается информация в узлах сетки через 300 км [12; 13]. Экстраполяция производится по времени на несколько часов вперёд.



**Рис. 1.** К понятию способов Эйлера (точка А), Лагранжа (точка В) и измерению параметров ветра с ЛА, имеющего собственную скорость полёта (точка С), а также измерению параметров атмосферы с использованием РЛС (точка D)

**Fig. 1.** To the concept of Euler methods (point A), Lagrange (point B) and measuring wind parameters from an aircraft with its own flight speed (point C), as well as measuring atmospheric parameters using radar (point D)

Во втором случае производится измерение координат точки  $(x_0, y_0, z_0)$  от времени  $(t_0)$ , т. е. координаты движущегося потока и параметры окружающего пространства, над которым он перемещается. В этом случае производятся измерения осреднённых значений характеристик не менее чем за 1 мин в конкретной точке и осреднение по времени (за те же 2–10 мин) и по пространству. Величина последнего зависит от скорости движения потока. Экстраполяция производится по времени и по пространству. Скорость потока будет увеличиваться согласно уравнению Бернулли в суженном сечении и уменьшаться при увеличении сечения. В атмосфере скорости ветра в струйных течениях достаточно часто составляют 300–400 км/ч и могут достигать 700 км/ч [21]. Конечно, последнее значение также трудно подтвердить, как и опровергнуть. При скорости 120 и 360 км/ч осреднение за 10 мин будет производиться соответственно на расстоянии 20 и 60 км, а при скорости 900 км/ч – 150 км. При среднем расстоянии между метеостанциями в 300 км и более такое осреднение на практике допустимо.

Исторически сложилось, что данные, получаемые по методам Эйлера и Лагранжа, отождествляются. Кроме того, сюда же включают информацию, получаемую с ЛА, имеющего собственную скорость полёта, отличную от скорости ветра. Наиболее

ярко это проявляется, когда измерения производятся со скоростных и сверхскоростных ЛА. С них также производятся измерения различных параметров атмосферы и подстилающей поверхности (ПП). Попытаемся разобраться, насколько корректно отождествление информации, получаемой в различных точках пространства А, В, С и D (рис. 1) и насколько правомерно её осреднение по времени и пространству.

Подвижный ЛА (точка С) производит измерения параметров окружающей природной среды. Однако возникает вопрос: к какой точке пространства эту информацию отнести и к какому времени? Понятно, что привязные аэростаты и радиозонды измеряют метеорологические параметры по методу Эйлера, а в свободном полёте аэростат измеряет параметры атмосферы по методу Лагранжа. Радиозонд в свободном полёте усредняет значение параметров по слоям (температура и ветер в слое) и, тем не менее, это значение относится к точке выпуска (метод Эйлера), хотя зонд может улететь от этой точки за 1 ч полёта на 100 и даже 200 км.

Для описания полей температуры и ветра вполне оправдано использование методов Эйлера и Лагранжа. Параметры ветра резко меняются во времени и, тем более, по пространству. В итоге ЛА на маршруте реагирует на осреднённые характеристики, а на этапах взлёта и посадки и на мгновенные порывы ветра, особенно при малых скоростях полета. Кроме того, появились новые типы устройств (радиолокаторы), которые измеряют параметры атмосферы в нескольких точках пространства за короткий период времени (точка D на рис. 1). Возникает проблема сравнения результатов их измерения в точках А, В, С и D (рис. 1) и правомерности их отождествления.

В неподвижном воздухе направление движения самолёта относительно подстилающей поверхности совпадает с направлением его продольной оси, а скорость перемещения равна воздушной. Кроме того, у ЛА вводится понятие путевой скорости. Поскольку самолёты в полёте опираются на чрезвычайно подвижный воздух, имеющий движение, как по горизонтали, так и по вертикали, то они реагируют на эти движения и перемещаются в пространстве под влиянием воздушной скорости ЛА и движений воздуха.

При навигационно-метеорологическом обеспечении полётов ЛА необходимо учитывать влияние ветра, который оказывает на полёт ЛА значительное влияние (рис. 2), изменяя его путевую скорость ветра и его направления  $\delta$ . Другими элементами навигационного треугольника скоростей являются: угол ветра  $\epsilon$  (т. е. угол между направлением северного географического или магнитного меридиана и вектором путевой скорости, угол между векторами воздушной и путевой скоростей  $\varphi$ , курс полёта  $\gamma$ , т. е. угол между направлением северного географического (или магнитного) меридиана и вектором воздушной скорости путевой угол  $\alpha$  (т. е. угол между направлением северного географического (или магнитного) меридиана и вектором путевой скорости).

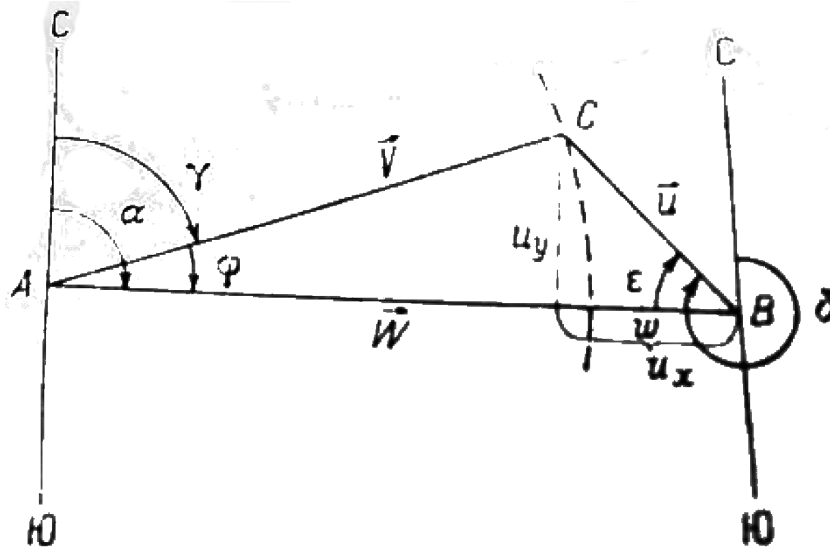


Рис. 2. Навигационный треугольник скоростей и его составляющие

Fig. 2. Navigation speed triangle and its components

Информация о состоянии окружающего воздуха, полученная по измерениям с ЛА, является осредненной по значительному пространству и за небольшой промежуток времени, зависящий от скорости полёта. Масштаб осреднения по пространству и времени зависит от путевой скорости полёта. При малых её значениях показания измеренных величин будут приближаться или совпадать с осредненной информацией, полученной по методу Эйлера, а при больших скоростях полёта значительно отличаться. При этом, чем больше будет крейсерская скорость полёта, тем большим будет расстояние, на котором происходит осреднение. Современные подвижные аппараты (точка C на рис. 1) сами измеряют параметры окружающей среды и ПП, усредняя их по пространству и по времени [7; 10; 11]. Получить мгновенные значения они не могут, поскольку на скорости полёта в 1 200, 1 500, 1 800 и 2 400 км/ч за 10 мин будут пролетать соответственно расстояние в 200, 250, 300 и 400 км, а ИСЗ на низкой орбите расстояние в 1000 км пролетает за 1–2 мин. К какой точке пространства относить результаты этих измерений? Правда, стационарные спутники постоянно находятся над одной точкой, но измерения проводят с высоты около 40 тыс. км. Необходимое пространственное разрешение для таких ИСЗ должно составлять около 10 км.

Целесообразно информацию в точке C, полученную с движущегося ЛА независимо от окружающих воздушных потоков [2], считать осреднённой по времени за 1–10 мин, а по пространству за участок маршрута размером, например, 40–400 км, пролетаемый за это время со скоростью 2 400 км/ч, а при меньших скоростях, например, при 1 200 км/ч – от 20 до 200 км (при скорости 800 км/ч это будет примерно 13–133 км). Вопросы учёта влияния ветра на полёты ЛА остаются актуальными, несмотря на большие скорости современных самолётов на крейсерском режиме. Получается, что скорости самолётов и ветра в струйных течениях могут быть соизмеримы.

С точки зрения общей циркуляции атмосферы в районе Благовещенска и Хабаровска наблюдается устойчивый западный перенос. Наибольший интерес для целей авионавигации представляет исследование переходного слоя атмосферы между тропосферой и стратосферой. Этот переходный слой называется тропопаузой. Верхней границей тропосферы условно считают уровень минимальных температур. Выше этого уровня температура с высотой, как правило, растёт. В умеренных широтах высота тропопаузы в летний период составляет 10–12 км, зимой она ниже. Кроме того, высота тропопаузы колеблется при прохождении циклонов и антициклонов за короткий период времени. Так, в течение суток в Благовещенске и Хабаровске разность высот может достигать 2 км. Повсеместно отмечаются струйные течения в верхней тропосфере и нижней стратосфере со скоростями 100 км/ч и более. Над Амурской областью почти ежегодно скорости ветра могут достигать 300 км/ч [17]. Резкие изменения скорости ветра с высотой в течение суток, получаемые с помощью радиозонда, сильно влияют на полёты самолётов, так как трудно спрогнозировать опасные явления, такие как турбулентность и сдвиг ветра.

Поэтому при навигационно-метеорологическом обеспечении полётов ЛА необходимо учитывать влияние ветра, особенно в струйных течениях. Исходными формулами для двух серий численных экспериментов послужили следующие:

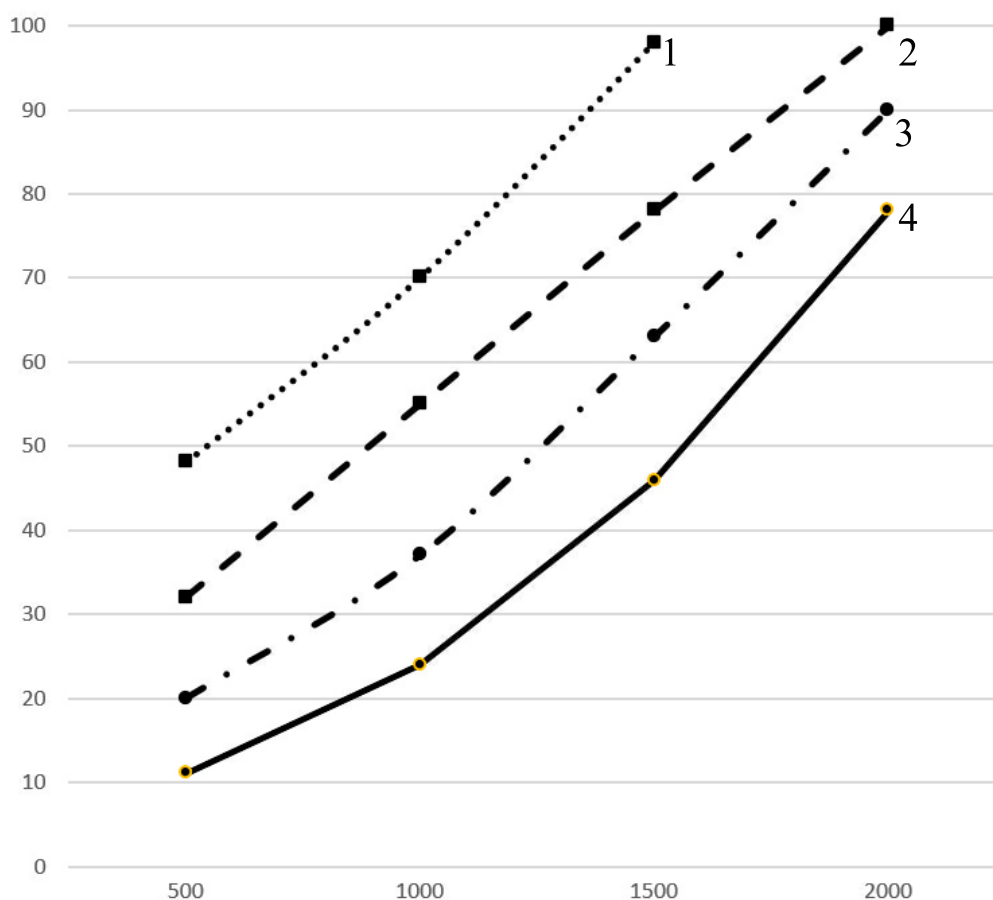
$$\operatorname{ctg}\alpha = \frac{\cos\varphi_1 \operatorname{tg}\varphi_2}{\sin(\lambda_2 - \lambda_1)} - \sin\varphi_2 \operatorname{ctg}(\lambda_2 - \lambda_1); \quad (1)$$

$$\cos S = \sin\varphi_1 \sin\varphi_2 + \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \cos(\lambda_1 - \lambda_2), \quad (2)$$

$\alpha$  – направление ортодромии;  $S$  – длина ортодромии в градусах дуги большого круга;  $\varphi_1, \lambda_1$ , и  $\varphi_2, \lambda_2$  – соответствующие координаты исходного и конечного пунктов трассы (участка трассы). Подробнее вывод рабочих формул для расчёта приводится в статье «О допустимом масштабе...» [16].

**Численное моделирование влияния скорости ветра на полёты летательных аппаратов на крейсерском режиме.** Для выявления влияния скоростей полёта на масштаб осреднения протяжённости участка маршрута, на котором следует вводить поправку на ветер без опасности выхода за пределы воздушного коридора и нарушения безопасности полёта, были выполнены две серии численных экспериментов. В них рассматривались различные скорости полёта от 850 до 2 500 км/ч. Результаты представлены на рис. 3–8.



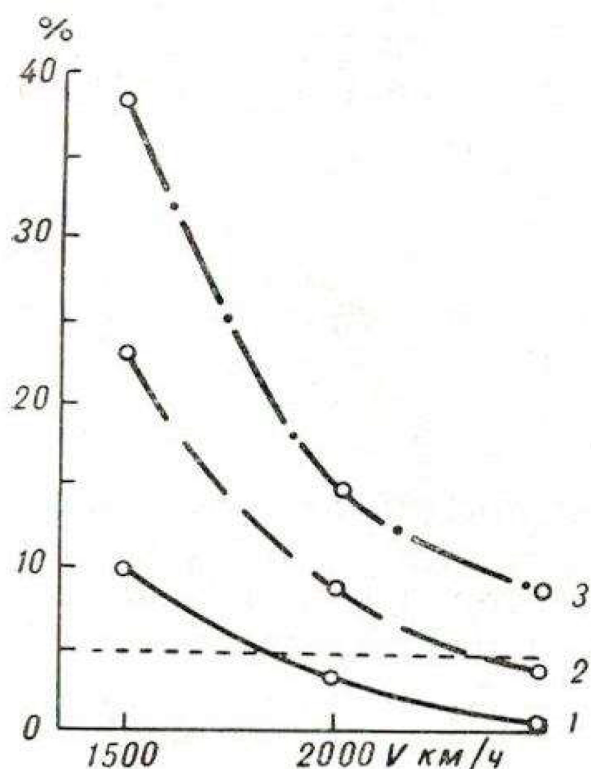


**Рис. 3.** Повторяемость (%) выходов самолёта за пределы воздушного коридора  $\pm 10$  км на участках различной протяжённости при расчётах по локальному значению ветра, измеренному в одной точке (по методу Эйлера) при скоростях полета: 1–850, 2–1 500, 3–2 000, 4–2 500 км/ч

**Fig. 3.** Repeatability (%) of aircraft exits outside the air corridor  $\pm 10$  km in areas of varying lengths when calculating the local wind value, measured at one point (according to the Euler method) at flight speeds: 1–850, 2–1 500, 3–2 000, 4–2 500 km/h

Исходным материалом для двух серий численных экспериментов послужили случайно выбранные аэросиноптические ситуации на картах барической топографии различных уровней, в основном за зимний сезон, когда наблюдаются более сильные ветры.

В первой серии экспериментов промоделировано более 1 800 полетов. При этом использовались локальные данные о параметрах ветра, измеренные в конкретной точке (примерный метод Эйлера, т. к. радиозонд улетал от точки выпуска и определял ветер в слое). Эта информация распространялась на участок протяжённостью от 500 до 2 000 км через 500 км (рис. 3.)



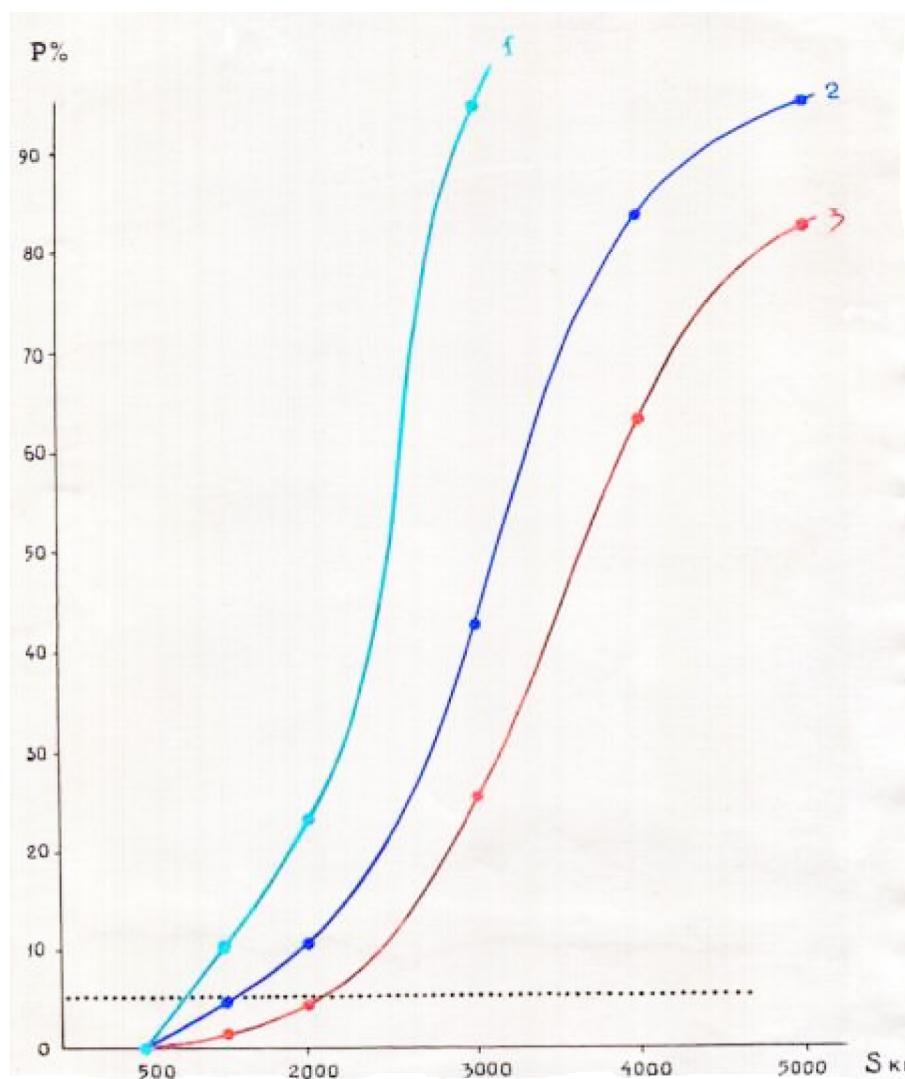
**Рис. 4.** Повторяемость (%) выхода самолёта за пределы воздушного коридора  $\pm 10$  км в зависимости от сверхзвуковой скорости полёта и протяженности участка трассы  $S$ : 1–1 500, 2–2 000 и 3–2500 км (горизонтальный пунктир - - - - - показывает допустимую повторяемость в 5% выхода самолёта за пределы воздушного коридора)

**Fig. 4.** Repeatability (%) of airplane exit outside the air corridor  $\pm 10$  km depending on supersonic speed the flight and length of the  $S$  route section: 1–1 500, 2–2000 and 3–2500 km (the horizontal dotted line - - - - - shows the permissible repeatability of 5 % of the exit of the aircraft beyond the air corridor)

Анализ результатов первой серии экспериментов показал нецелесообразность использования локальных значений параметров ветра, измеренных в одной конкретной точке маршрута (метод Эйлера), на весь маршрут и даже на участок трассы в 500 км. Из графика (рис. 3) видно, что даже на скорости в 2 500 км/ч повторяемость выходов за пределы воздушного коридора на участке в 500 км составляет 10 %, а при меньших скоростях полёта – превышает 20, 30 и 40 %. К сожалению, так часто поступают в настоящее время. Из рис. 3 следует, что даже сверхзвуковые скорости полёта, которые сглаживают влияние ветра на полёт самолета, не обеспечивают надёжность в 5 % невыхода самолёта за пределы воздушного коридора  $\pm 10$  км. Тем более дозвуковые скорости в 850 км/ч способствуют выходу самолёта из указанного коридора. Поэтому пилотам приходится вводить поправку в курс самолёта чаще, чем через 500 км, как только навигационное оборудование показывает их выход за пределы коридора.

Наоборот, анализ результатов второй серии экспериментов доказывает, что параметры ветра, полученные осреднением по участку маршрута, надёжнее учитыва-

ют его влияние на безопасность полётов. Этот эффект усиливается при увеличении скорости полёта, что хорошо согласуется с выводами А. М. Обухова о квазигеострофическом приближении поля ветра и давления [14]. Таким образом, введение осреднённых (интегральных) поправок в курс гарантирует достаточно высокую точность самолётовождения (рис. 4).

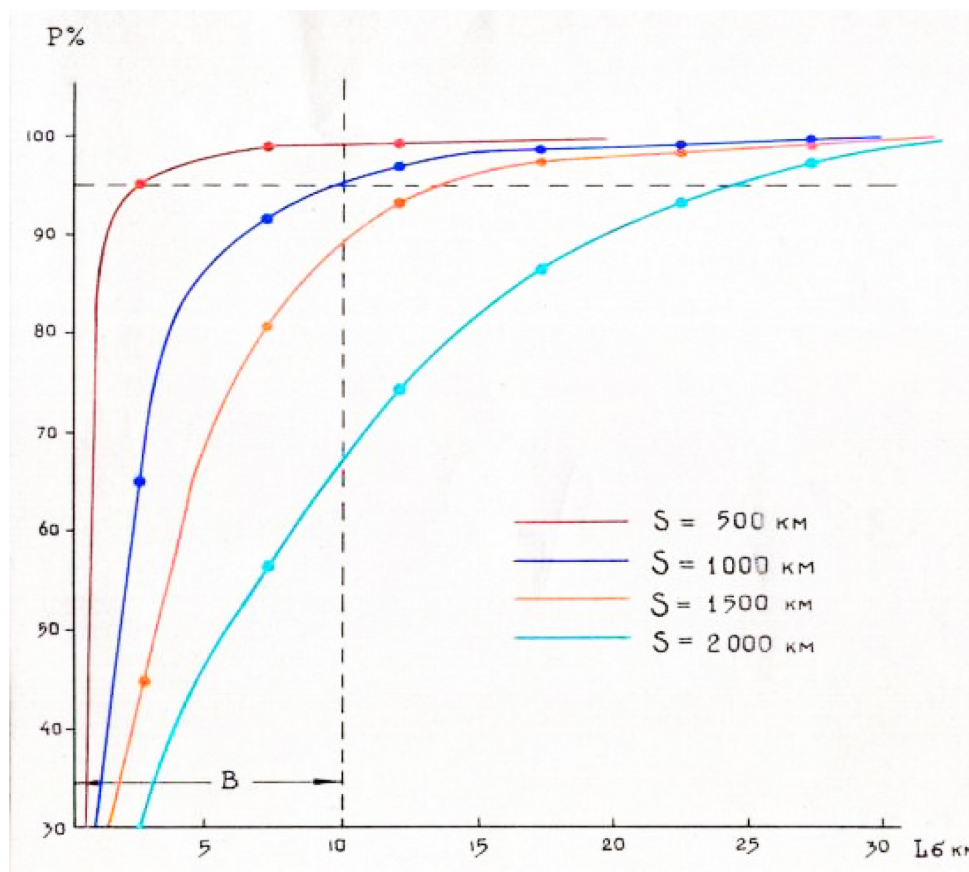


**Рис. 5.** Повторяемость (%) выхода самолёта за пределы воздушного коридора  $\pm 10$  км в зависимости от скорости полёта и протяжённости участка трассы  $S$ : 1–1000, 2–1500 и 3–2000 км

**Fig. 5.** Repeatability (%) of the aircraft leaving the air corridor  $\pm 10$  km depending on the flight speed and the length of the  $S$  route section: 1–1000, 2–1500 and 3–2000 km

Во второй серии экспериментов промоделировано 3 500 полетов с общим налётом более 25 млн км. Параметры ветра усреднялись по участкам различной протяжённости (от 500 до 2 000 км через 500 км, а далее до 5 000 км через 1 000 км) на маршрутах, ориентированных в широтном и меридиональном направлениях. Результаты представлены на рис. 5–8.

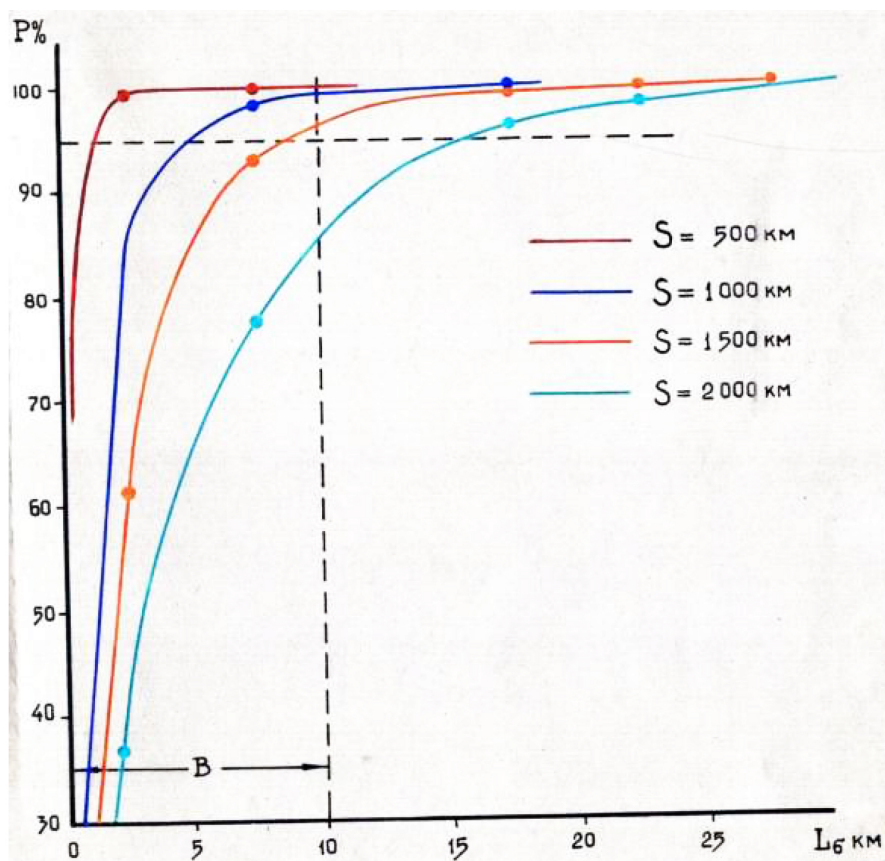
Например, при участке протяжённостью в 1 000 км и воздушной скорости полёта не менее 2 000 км/ч обеспеченность выдерживания заданной воздушной трассы ( $\pm 10$  км) составляет 95 % и более.



**Рис. 6.** Интегральная повторяемость (%) отклонений самолёта от ортодромии при масштабах осреднения ветра 500–2 000 км и скорости полёта 1 500 км/ч

**Fig. 6.** Integral repeatability (%) of aircraft deviations from the orthodrome at averaging scales of 500–2 000 km and a flight speed of 1 500 km/h

Более детальную информацию показывают графики на рис. 5, которые демонстрируют зависимость выходов самолёта за пределы коридора при увеличении масштаба осреднения от 500 до 5 000 км. При этом допустимым масштабом осреднения является 2 000 км для скорости 2 500 км/ч и до 1 000 км для скорости 2 000 км/ч. Для скорости 1 500 км/ч он равен 700 км. Для скорости полёта 1 500 км/ч (рис. 6) и для скорости 2 500 км/ч (рис. 7) показаны интегральные зависимости отклонений в 10 км (B) от ортодромии (центральной линии трассы) при протяжённости участков от 500 до 2 000 км.



*Рис. 7.* Интегральная повторяемость (%) отклонений самолёта от ортодромии при масштабах осреднения ветра 500–2 000 км и скорости полёта 2 500 км/ч

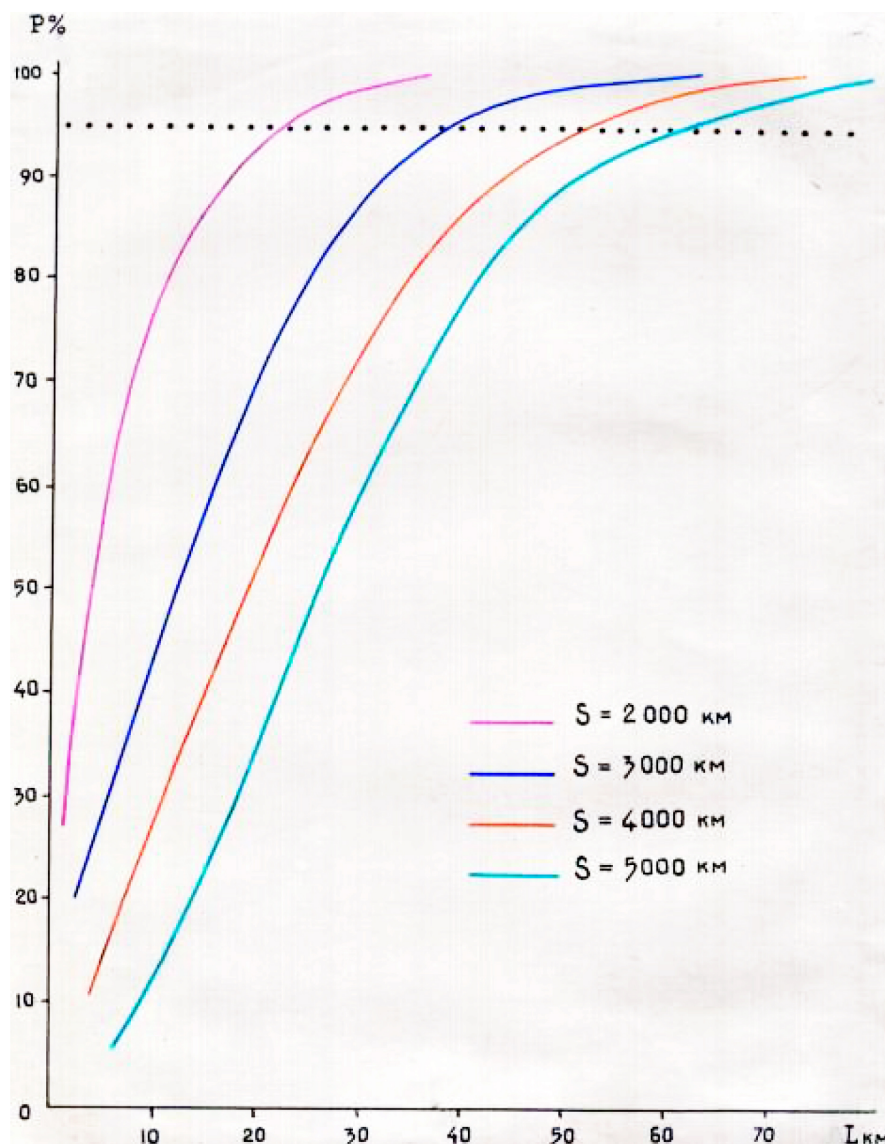
*Fig. 7.* Integral repeatability (%) of aircraft deviations from the orthodrome at averaging scales of 500–2 000 km and a flight speed of 2 500 km/h

На рисунках видно, что для скорости 1 500 км/ч осреднение может составить 1 000 км, а для скорости 2 500 км/ч — 1 500 км. Наиболее неудовлетворительные результаты даёт осреднение в 2 000 км.

На рис. 8 представлены графики интегральной повторяемости боковых отклонений самолёта от ортодромии при скорости полёта 2 000 км/ч на участках протяженностью от 2 000 до 5 000 км через 1 000 км.

Удовлетворительным может считаться только масштаб в 2000 км. Отклонения от ортодромии в остальных случаях колеблются от 10 до 60 км, что недопустимо.

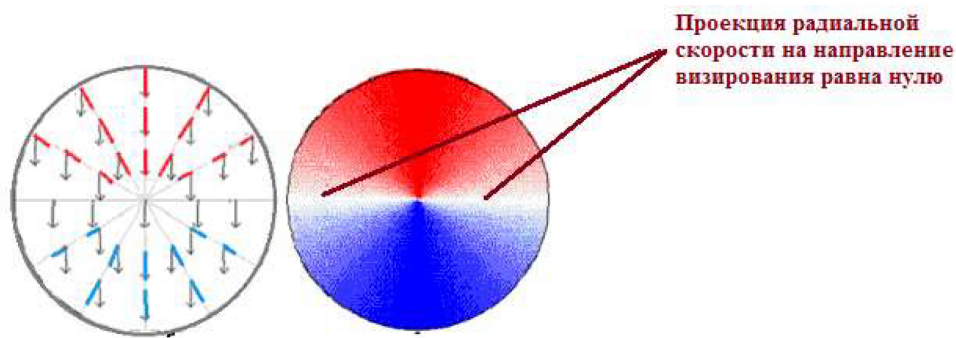
**Получение информации о ветре с помощью доплеровского радиолокатора.** За последние 50 лет широкое распространение получили данные о ветре, получаемые за счёт использования МРЛ. Применим к решению нашей задачи информацию, получаемую с помощью доплеровской радиолокации.



**Рис. 8.** Интегральная повторяемость (%) отклонений самолёта от ортодромии при масштабах осреднения ветра при скорости полёта 2 000 км/ч на участках протяжённостью от 2 000 до 5 000 км через 1 000 км

**Fig. 8.** Integral repeatability (%) of aircraft deviations from the orthodrome at averaging scales wind at a flight speed of 2000 km/h in stretches from 2 000 to 5 000 km after 1 000 km

Перейдём к анализу радиолокационных данных (точка *D* на рис. 1). Наряду с получением информации о радиолокационной отражаемости доплеровский МРЛ способен измерять составляющую компоненту скорости движения метеобъекта вдоль линии (луча), проведённой в направлении от радиолокатора к метеоцели. Измеренная радиальная скорость совокупности метеоцелей может при этом быть положительной (если проекция скорости рассеивающих целей на луч направлена к локатору) или отрицательной (если проекция скорости рассеивающих целей на луч направлена от локатора) (рис. 9). Скорость движения метеоцели, направление которой перпендикулярно радиолокационному лучу, не может быть оценена радиолокатором, т. к. в этом случае проекция радиальной скорости на направление визирования равна нулю.



**Рис. 9.** Радиальные компоненты скорости ветра, измеренной в направлении радиолокатора и от него

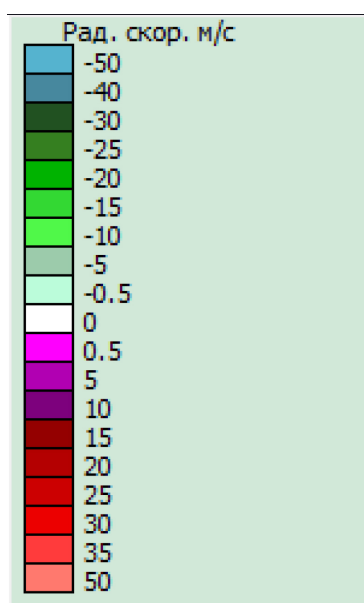
**Fig. 9.** Radial components of wind speed measured in and out of radar

В доплеровском метеорологическом радиолокаторе (ДМРЛ-С) измерение сдвига частоты излучения, отражённого от движущейся метеоцели, а через неё радиальной составляющей скорости проводится путём измерения вариации частоты импульсов, отражённых от метеоцели, относительно частоты излученного зондирующего импульса. Изменение частоты анализируется в каждом бине (дискрете) дальности вдоль оси радиолокационного луча [18].

Размер дискрета дальности в радиальном направлении составляет 250 м, а по углу – равен ширине диаграммы направленности антенны ( $1^\circ$ ). Вдоль оси луча радиолокатора в радиусе обзора, равном 125 км, таких дискретов дальности будет 500. Несмотря на то, что ДМРЛ-С измеряет только радиальную компоненту скорости ветра, для изучения целого ряда метеорологических явлений (таких как атмосферная турбулентность, мезоциклон и т. д.) большое значение может иметь её пространственное распределение. Наиболее полное использование доплеровской информации возможно только в том случае, когда с её помощью однозначным образом удаётся определить скорость и направление перемещения облачных образований, т. е. средний вектор скорости ветра  $U$  в зоне ответственности радиолокатора. Известно, что в системах некогерентных МРЛ в основу метода оценки  $U$  заложено сопоставление карт отражаемостей двух последовательно выполненных обзоров. Погрешность метода зависит от тенденции и скорости развития облаков. Если временной интервал между обзорами превышает 10 мин, то данный метод чаще всего не применяется. Как следствие, при переходе в штормовой режим работы (учащенного проведения обзоров) получить информацию об  $U$  можно только по окончании второго обзора. При этом теряется оперативность построения штормового прогноза, для которого, в первую очередь, необходима информация о перемещении облачных образований.

ДМРЛ-С лишён этого недостатка, т. к. скорость и направление перемещения на основании доплеровской информации могут быть в большинстве случаев вычислены сразу же по окончании обзора, проведённого в режиме «Скорость», т. е. с возбуждением зондирующего импульса. Однако метод, основанный на доплеровской информации, нельзя назвать универсальным, дающим правильные результаты расчёта  $U$  в любой синоптической ситуации. Главным ограничением метода является отсутствие инфор-

мации о тангенциальной компоненте скорости ветра (компоненте, перпендикулярной радиус-вектору  $r$ , проведённому к данной точке пространства из пункта расположения радиолокатора). Кроме того, расчёт  $U$  должен выполняться в автоматическом режиме без участия оператора, который мог бы при наличии квалификации «помочь программе», например, выделить зоны облачности, наиболее подходящие для расчёта  $U$ , приводящие к более устойчивым результатам расчёта. Указанные требования приводят к необходимости разработки нетривиальных методов анализа, которые на основании информации о распределении в пространстве радиальной составляющей скорости движения облачных образований давали бы устойчивые результаты в разных синоптических ситуациях, при различных формах облаков и их количестве в радиусе обзора.



**Рис. 10.** Цветовая шкала и соответствующие ей значения радиальной скорости гидрометеоров в ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010»

**Fig. 10.** The color scale and the corresponding values of the radial velocity of hydrometeors in POI “GIMET-2010”

Методы анализа пространственного распределения радиальной составляющей доплеровской скорости позволяют строить карты различного профиля (в координатах скорость – азимут, скорость/направление – высота и т. д.).

Созданное в ГГО программное обеспечение вторичной обработки радиолокационной информации (ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010») [20] в условиях облачной погоды позволяет отображать информацию о скорости и направлении высотного потока в атмосферных слоях с дискретностью высоты 1 000 м через каждые 10 мин. В каждом 1 000-метровом слое отображается максимальная скорость гидрометеоров, с которой они приближаются к ДМРЛ-С и удаляются от локатора. Значения радиальной скорости движения совокупности гидрометеоров в ячейках пространства представлены в виде цветовой шкалы (рис. 10). В этой шкале напротив каждого цвета стоит



минимальное значение скорости из диапазона, соответствующего каждой цветовой градации. Так, например, цветом, соответствующим числовому значению «0,5» обозначается область, в которой гидрометеоры движутся со скоростями от 0,5 до 4,9 м/с по направлению к ДМРЛ-С. Цветом, соответствующим «5», обозначается область, в которой гидрометеоры приближаются к ДМРЛ-С со скоростями от 5,0 до 9,9 м/с и т. д. Аналогичным образом соответствующие цвета привязаны к отрицательным скоростям, с которыми гидрометеоры удаляются от ДМРЛ-С.

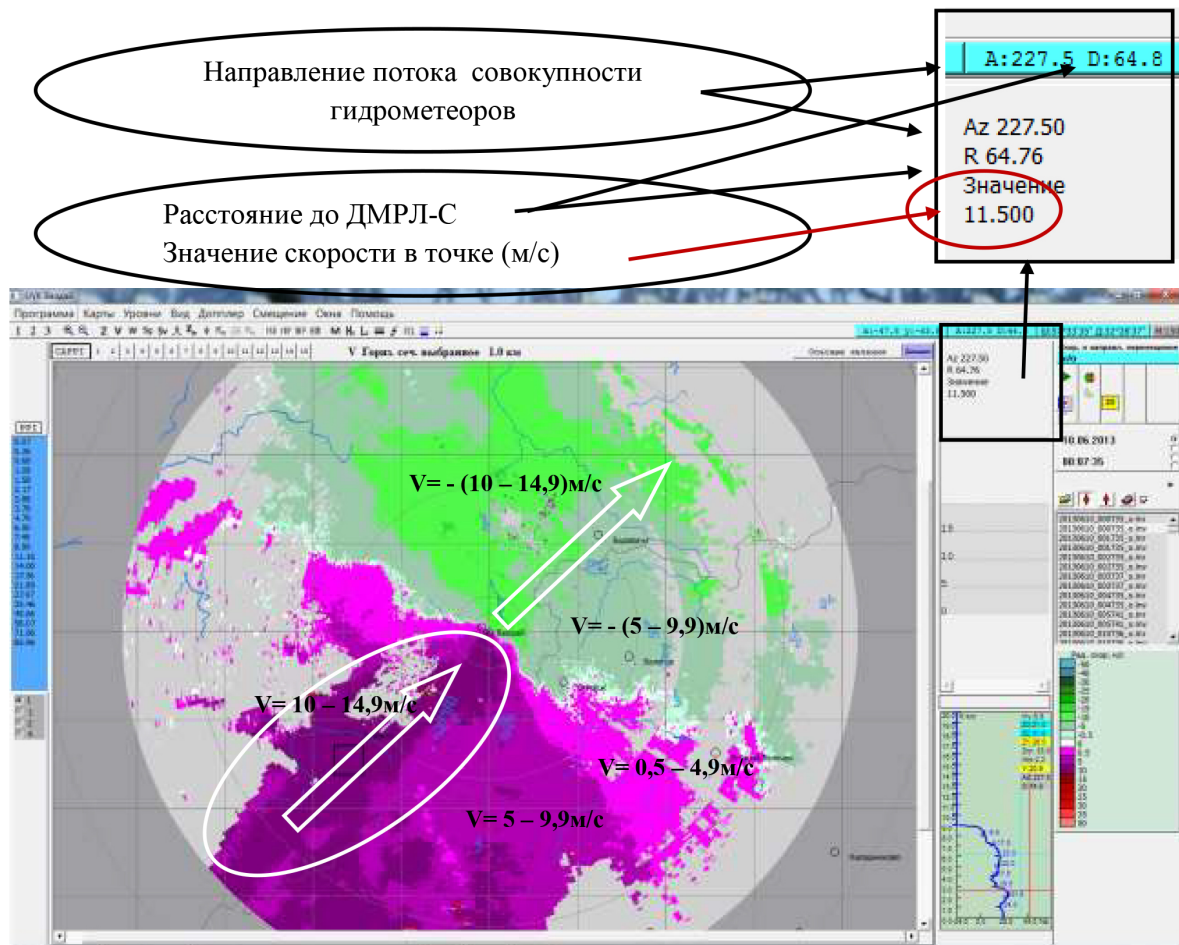


Рис. 11. Карта радиальных скоростей гидрометеоров в слое 0–1,0 км

Fig. 11. Map of radial velocities of hydrometeors in the layer 0–1.0 km

Направление движения совокупности гидрометеоров определяется по ориентации области максимальных скоростей в зоне обзора ДМРЛ-С. При определении направления перемещения воздушных масс наиболее достоверной будет являться информация, полученная в условиях устойчивого воздушного потока, движущегося со скоростью более 10 м/с (36 км/ч). Как правило, при устойчивом воздушном потоке линия максимальных скоростей, с которыми гидрометеоры приближаются к ДМРЛ-С, перпендикулярна линии нулевых радиальных скоростей (обозначенных белым цветом на цветовой шкале). Для того чтобы уточнить направление потока сово-

купности гидрометеоров в градусах, необходимо переместить курсор в область максимальных скоростей. При этом справа вверху на сером фоне появится надпись «Az 227.50» (рис. 11), означающая, что направление, откуда движутся гидрометеоры к ДМРЛ-С, составляет 227. Значение  $R$  на сером фоне и  $D$  на узком поле голубого цвета (сноска, рис. 11) означает расстояние от точки расположения курсора до ДМРЛ-С (в км). «Значение 11.500» указывает на радиальную составляющую скорости гидрометеоров (м/с) в месте расположения курсора (сноска, рис. 11).

Благодаря данным, получаемым ДМРЛ-С в режиме «Скорость», при наличии в зоне обзора локатора облачности можно определить максимальную радиальную скорость смещения совокупности гидрометеоров по слоям толщиной 1 000 м во всей толще облачного слоя.

**Заключение.** Анализ данных табл. 1 на с. 54 показывает многомасштабность атмосферных процессов, которые оказывают влияние на полёты. С точки зрения навигационно-метеорологического обеспечения полётов ЛА на крейсерском режиме, следует рассматривать процессы, относящиеся к мезоклимату, провинции и макроклимату. Для взлёта и посадки ЛА, особенно с максимальным взлётным весом, учитываются процессы топоклимата и микроклимата.

Проведённый анализ существующих методов измерения параметров ветра и результаты серии численных экспериментов позволяют сделать ряд практически значимых выводов:

1. В метеорологии значения параметров ветра, полученных по методу Эйлера и Лагранжа, отождествляют и, к сожалению, распространяют на весь маршрут. Так, данные радиозонда относятся к точке его выпуска, хотя он по воздушному потоку может быть отнесён за 1 ч подъёма на расстояние 100–200 км. Кроме того, радиозонд даёт информацию о ветре, осреднённую по слою воздуха, который он пересёк за время подъёма между измерениями, т. е. это не чистый Лагранж и, тем более, не Эйлер.

2. На этапах взлёта и посадки, включая глиссады набора высоты и снижения, требуется информация о мгновенных значениях ветра и его сдвиге, поскольку на этих этапах ЛА крайне неустойчив из-за малых скоростей полёта (например, авиационное происшествие над Бангкоком за счёт резкой смены вертикальных потоков 25.12.2016 г.).

3. На крейсерском режиме полёта требуется осреднённая по времени и пространству информация о параметрах ветра. Если используется информация в точке (по методу Эйлера), то осреднение должно быть произведено по времени. Если использовать информацию о поле ветра (приближённый метод Лагранжа), полученную с карт барической топографии, то можно получить её на уровне, соответствующем эшелону полета воздушного судна.

4. Информация о состоянии окружающего воздуха, полученная по измерениям с ЛА, является осреднённой по значительному пространству и за небольшой промежуток времени, зависящий от скорости полёта.

5. Масштаб осреднения по пространству и времени зависит от путевой скорости

полёта. При малых ее значениях показания измеренных величин будут приближаться или совпадать с осреднённой информацией, полученной по методу Эйлера. а при больших скоростях полёта значительно отличаться. При этом, чем больше крейсерская скорость полёта, тем больше расстояние, на котором происходит осреднение. Однако, это расстояние при большой скорости полёта ЛА преодолит быстрее, и осреднение по времени будет небольшим.

6. На крейсерском режиме ЛА, для определения путевой скорости и угла сноса необходима информация о средних параметрах ветра по маршруту. Отдельные порывы ветра могут только вызвать его болтанку. При полёте в поле переменного ветра требуется вводить поправку в курс по мере изменения параметров ветра.

7. В настоящее время местоположение ЛА относительно подстилающей поверхности определяется с помощью радионавигационных сигналов GPS и предупреждает о возможном выходе ЛА за пределы воздушного коридора и опасном сближении его с другим ЛА и каким-либо препятствием.

8. Из других отраслей народного хозяйства, для которых порывы ветра являются наиболее опасными, следует отметить строительную индустрию. В ней такие порывы могут привести к падению высотных подъёмных кранов и разрушению недостроенных зданий, также к срыву громоздких рекламных щитов.

#### *Список литературы*

1. Акселевич В. И., Мазуров Г. И. Использование вычислительной техники и информационных технологий в науках о Земле. СПб.: Инфо-да, 2010. 302 с.
2. Баранов А. М., Мазурин Н. И., Солонин С. В., Янковский И. А. Авиационная метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 286 с.
3. Бармин Б. А., Бережная Т. В., Голубев А. Д. Основные погодно-климатические особенности Северного полушария Земли. М., 2019. 67 с.
4. Беспалова Л. А., Иошпа А. Р., Кропянко Л. В., Авакова А. Г. Опасные погодные явления Азово-Черноморского побережья Ростовской области и Краснодарского края // Естественные и технические науки. 2015. № 11. С. 272–276.
5. Гандин Л. С. Объективный анализ метеорологических полей // Труды Всесоюзного научно-метеорологического совещания. Л.: Гидрометеиздат, 1963. С. 250–258.
6. Гандин Л., Машкович С., Левис А. Исследование оптимизации сети аэрологических станций. Женева: ВМО, 1967. 58 с.
7. Джорджио В. А. Струйные течения как индикаторы общей циркуляции атмосферы // Метеорологические исследования. 1968. № 16.
8. Дроздов О. А., Шепелевский А. А. Теория интерполяции в стохастическом поле метеорологических элементов // Труды НИУ Гидрометслужбы СССР. 1949. Сер. 1, вып. 13. С. 108–115.
9. Качурин Л. Г. Методы метеорологических измерений. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 456 с.
10. Мазуров Г. И., Акселевич В. И. К вопросу о метеорологическом обеспечении полётов дирижаблей // Метеорологический вестник. 2010. № 1. С. 1–6.
11. Мазуров Г. И., Акселевич В. И. Эйлер, Лагранж и авиация // Метеоспектр. 2017. № 3. С. 78–85.

12. Мазуров Г. И., Драбенко В. А. Оценка информативности данных температурно-ветрового зондирования в среднем слое тропосферы в сравнении с данными вертолётного зондирования атмосферы: материалы Итоговой сессии Ученого совета РГГМУ. СПб., 2004. С. 23–24.
13. Мазуров Г. И., Драбенко В. А. Анализ результатов измерения вертикального профиля температуры по данным вертолётного зондирования нижней тропосферы: материалы Итоговой сессии Учёного совета РГГМУ. СПб., 2003. С. 39–40.
14. Обухов А. М. Турбулентность и динамика атмосферы. М.: Гидрометеиздат, 1988. 414 с.
15. Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь / под ред. А. И. Бедрицкого; отв. сост. К. Ш. Хайруллин. СПб.: Летний сад, 2008. Т. 3. Р–Я. 312 с.
16. Солонин С. В., Мазуров Г. И. О допустимом масштабе пространственного осреднения значений геопотенциала в стратосфере при учёте влияния ветра на полёт сверхзвукового самолёта // Труды ГМЦ. 1972. Вып. 95. С. 51–59.
17. Средние месячные и экстремальные значения аэрологических данных за сроки 00 и 12 сгв, станции СССР, помесечно, ежегодно. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1986. 208 с.
18. Тарабукин И. А., Дорофеев Е. В., Львова М. В., Дмитриева О. А., Зверев В. В., Басов И. С., Попов И. Б., Попов В. Б. Производство метеорологических радиолокационных наблюдений с применением ДМРЛ-С на сети Росгидромета в целях штормооповещения и метеобеспечения авиации: метод. письмо. СПб.: Д'АРТ, 2014. 178 с.
19. Хайруллин К. Ш. Мезоклимат и его место в системе климатов // Вопросы климатологии и агрометеорологии. Зап-Сиб НИГМИ. М.: Гидрометеиздат, 1990. Вып. 91. С. 26–33.
20. Шаповалов А. В., Тарабукин И. А., Дорофеев Е. В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012616865 «ПО вторичной обработки радиолокационной информации ДМРЛ-С». 2012.
21. Шелковников М. С. Мезометеорологические процессы в горных районах и их влияние на полеты воздушных судов. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 208 с.

*Статья поступила в редакцию 29.01.2020; принята к публикации 25.02.2020*

#### **Библиографическое описание статьи**

*Акселевич В. И., Мазуров Г. И., Тарабукин И. А., Хайруллин К. Ш.* Климатические масштабы и репрезентативность аэрологических наблюдений применительно к мезоклиматическим прогностическим моделям // Учёные записки Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 15, № 3. С. 52–74. DOI: 10.21209/2658-7114-2020-15-3-52-74.

**Vitaliy I. Akselevich<sup>1</sup>,**

*Candidate of Physical and Mathematical Sciences,  
Associate Professor,*

*The Main Geophysical Observatory named after A. I. Voeikova  
(7, Karbysheva st., St. Petersburg, 194021, Russia),  
e-mail: vaksster@gmail.com*

*ORCID: 0000-0002-5041-3511*

**Gennady I. Mazurov<sup>2</sup>,**

*Doctor of Geographical Sciences, Professor,*

*The Main Geophysical Observatory named after A. I. Voeikov  
(7, st. Karbysheva, St. Petersburg, 194021, Russia),  
e-mail: nanmaz@rambler.ru*

*ORCID: 0000-0002-8669-612X*

**Ivan A. Tarabukin<sup>3</sup>,**

*Candidate of Physical and Mathematical Sciences,*

*The Main Geophysical Observatory named after A. I. Voeikov  
(7, st. Karbysheva, St. Petersburg, 194021, Russia),  
e-mail: tarabukin@mail.ru*

*ORCID: 0000-0002-5413-5758*

**Camille Sh. Khairullin<sup>4</sup>,**

*Candidat of Geography,*

*The Main Geophysical Observatory named after A. I. Voeikov  
(7, st. Karbysheva, St. Petersburg, 194021, Russia),*

*e-mail: khairullink@mail.ru*

## **Climatic Scales and Representativeness of Aerological Observations in Relation to Mesoclimatic Prognostic Models**

The article discusses the scale of the climate and the meteorological processes that form them. The problem of the legitimacy of identifying information obtained in four ways: by the methods of Euler, Lagrange, aircraft, as well as Doppler radars. Radiosonde observations are considered in detail.

**Keywords:** climate scales, representativeness, Euler method, Lagrange method, troposphere wind, jet currents, Doppler radar

### ***Translit***

1. Akselevich, V. I., Mazurov, G. I. Ispol'zovanie vychislitel'noj tekhniki i informacionnyh tekhnologij v naukah o Zemle. SPB.: Info-da, 2010. 302 s.

---

<sup>1</sup>V. I. Akselevich he was involved in the preparation and editing of text, the selection and design of links and graphic materials, the coverage of the current state of the issue (section 1), and participated in the formation of the conclusion.

<sup>2</sup>G. I. Mazurov suggested the concept of fig. 1, described a numerical simulation of the effect of wind speed on cruising flights (section 2), participated in writing the introduction and conclusion.

<sup>3</sup>I. A. Tarabukin provided materials of radar observations of changes in wind speed (3 section)

<sup>4</sup>C. Sh. Khairullin he gave the idea of writing an article, participated in writing an introduction, conclusion, preparation of a section on the scale of the climate, including table. 1 "Large-scale classification of climates" and a description of the aerological features of the Far East.

2. Baranov, A. M., Mazurin, N. I., Solonin, S. V., Yankovskij, I. A. *Aviacionnaya meteorologiya*. L.: Gidrometeoizdat, 1966. 286 s.
3. Barmin, B. A., Berezhnaya, T. V., Golubev, A. D. *Osnovnye pogodno-klimaticheskie osobennosti Severnogo polushariya Zemli*. M., 2019. 67 s.
4. Bespalova, L. A., Ioshpa, A. R., Kropyanko, L. V., Avakova A. G. *Opasnye pogodnye yavleniya Azovo-CHernomorskogo poberezh'ya Rostovskoj oblasti i Krasnodarskogo kraja // Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2015. № 11. S. 272–276.
5. Gandin, L. S. *Ob"ektivnyj analiz meteorologicheskikh polej // Trudy Vsesoyuznogo nauchno-meteorologicheskogo soveshchaniya*. L.: Gidrometiozdat, 1963. S. 250–258.
6. Gandin, L., Mashkovich, S., Levis, A. *Issledovanie optimizacii seti aerologicheskikh stancij*. Zheneva: VMO, 1967. 58 s.
7. Dzhordzhio, V. A. *Strujnye techeniya kak indikatory obshchej cirkulyacii atmosfery // Meteorologicheskie issledovaniya*. 1968. № 16.
8. Drozdov, O. A., Shepelevskij, A. A. *Teoriya interpolyacii v stohasticheskom pole meteorologicheskikh elementov // Trudy NIU Gidrometsluzhby SSSR*. M.; L., 1949. Ser. 1, vyp. 13. S. 108–115.
9. Kachurin, L. G. *Metody meteorologicheskikh izmerenij*. L.: Gidrometeoizdat, 1985. 456 s.
10. Mazurov, G. I., Akselevich, V. I. *K voprosu o meteorologicheskom obespechenii polyotov dirizhablej // Meteorologicheskij vestnik*. 2010. № 1. S. 1–6.
11. Mazurov, G. I., Akselevich, V. I. *Ejler, Lagranzh i aviaciya // Meteospektr*. 2017. № 3. S. 78–85.
12. Mazurov, G. I., Drabenko, V. A. *Ocenka informativnosti dannyh temperaturno-vetrovogo zondirovaniya v srednem sloe troposfery v sravnenii s dannyimi vertolyotnogo zondirovaniya atmosfery: materialy Itogovoj sessii Uchenogo soveta RGGMU*. SPb.. 2004. S. 23–24.
13. Mazurov, G. I., Drabenko, V. A. *Analiz rezul'tatov izmereniya vertikal'nogo profilya temperatury po dannyim vertolyotnogo zondirovaniya nizhnej troposfery: materialy Itogovoj sessii Uchyonogo soveta RGGMU*. SPb., 2003. S. 39–40.
14. Obuhov, A. M. *Turbulentnost' i dinamika atmosfery*. M.: Gidrometeoizdat, 1988. 414 s.
15. *Rossijskij gidrometeorologicheskij enciklopedicheskij slovar' / pod red. A. I. Bedrickogo; otv. sost. K. SH. Hajrullin*. SPb.: Letnij sad, 2008. T. 3 (R-YA). 312 s.
16. Solonin, S. V., Mazurov, G. I. *O dopustimom masshtabe prostranstvennogo osredneniya znachenij geopotenciala v stratosfere pri uchyote vliyaniya vetra na polyot sverhzhvukovogo samolyota // Trudy GMC*. 1972. Vyp. 95. S. 51–59.
17. *Srednie mesyachnye i ekstremal'nye znacheniya aerologicheskikh dannyh za sroki 00 i 12 sgv, stancii SSSR, pomesyachno, ezhegodno*. Obninsk: VNIIGMI-MCD, 1986. 208 s.
18. Tarabukin, I. A., Dorofeev, E. V., L'vova, M. V., Dmitrieva O. A., Zverev V. V., Basov I. S., Popov I. B., Popov V. B. *Proizvodstvo meteorologicheskikh radiolokacionnyh nablyudenij s primeneniem DMRL-S na seti Rosgidrometa v celyah shtormoopoveshcheniya i meteobespecheniya aviacii: metod. pis'mo*. SPb.: D'ART, 2014, 178 s.
19. Hajrullin, K. SH. *Mezoklimat i ego mesto v sisteme klimatov // Voprosy klimatologii i agrometeorologii*. Zap-Sib NIGMI. M.: Gidrometeoizdat, 1990. Vyp. 91. S. 26–33.

20. Shapovalov, A. V., Tarabukin I. A., Dorofeev E. V. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2012616865 "PO vtorichnoj obrabotki radiolokacionnoj informacii DMRL-". 2012.

21. Shelkovnikov, M. S. Mezometeorologicheskie processy v gornyh rajonah i ih vliyanie na polety vozdushnyh sudov. L.: Gidrometeoizdat, 1985. 208 s.

*Received: January 29, 2020; accepted for publication February 25, 2020*

#### **Reference to article**

*Akselevich V. I., Mazurov G. I., Tarabukin I. A., Khairullin C. Sh.* Climatic Scales and Representativeness of Aerological Observations in Relation to Mesoclimatic Prognostic Models // Scholarly Notes of Transbaikal State University. 2020. Vol. 15, No. 3. PP. 52–74. DOI: 10.21209/2658-7114-2020-15-3-52-74.