

УДК 629.7.058.6 : 629.7.016.2

DOI 10.51955/2312-1327_2023_1_118

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ СООБЩЕНИЙ АЗН-В ПУТЕМ ОЦЕНКИ ВЫСОТЫ ПОЛЕТА ВОЗДУШНОГО СУДНА

*Александр Петрович Плясовских,
orcid.org/0000-0003-2250-8852,
доктор технических наук, доцент
АО «ВНИИРА»,
пр. Обуховской обороны, д. 120
Санкт-Петербург, 192012, Россия
info@vniira.ru*

*Евгений Андреевич Рубцов,
orcid.org/0000-0003-2126-0015,
кандидат технических наук
Российский университет транспорта (МИИТ),
ул. Образцова, д. 9, стр. 9
Москва, 127994, Россия
rubtsov.rut.miit@gmail.com*

*Андрей Сергеевич Калининцев,
orcid.org/0000-0002-2578-2892,
ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», Архангельский центр ОВД
филиала «Аэронавигация Северо-Запада»,
ул. Северная, д. 20
Мезень, 164751, Россия
kas4job@gmail.com*

*Владислав Юрьевич Давиденко,
orcid.org/0009-0001-9707-166X,
ФГУП «Госкорпорация по ОрВД»,
филиал «Аэронавигация Северо-Запада»,
10 линия В.О., д. 53А
Санкт-Петербург, 199048, Россия
david071521@mail.ru*

Аннотация. Предложена методика подтверждения данных АЗН-В, основанная на анализе информации о высоте воздушного судна и параметрах атмосферы. Для подтверждения достоверности сообщений АЗН-В предлагается сравнивать геометрическую высоту, полученную по данным спутниковой системы навигации, с высотой, рассчитанной для реальной атмосферы (по информации от метеослужбы о давлении и температуре). Для реализации предлагаемой методики необходимы следующие входные данные: давление на уровне метеостанции, температура на уровне метеостанции и на высотах выполнения полетов и передаваемые в сообщении АЗН данные о геометрической и барометрической высотах. Установлено, что наибольшую погрешность при выполнении расчетов вносит температура на высоте полета ВС. С целью снижения влияния ошибок определения температуры предложено использование данных от метеозондов. С помощью разработанной методики выполнен расчет с использованием реальных данных о высотах, передаваемых в сообщении АЗН-В и требуемых данных от метеослужбы. Были использованы сообщения, полученные от наземной станции АЗН-В НС-1А производства АО «ВНИИРА», установленной на аэродроме Мезень.

Разработанную методику предлагается применять для подтверждения данных АЗН-В на региональных аэродромах с малой интенсивностью полетов.

Ключевые слова: АЗН-В, 1090 ES, метеозонд, барометрическая высота, геометрическая высота, давление, температура, формула Лапласа, ISA.

CONFIRMATION OF ADS-B MESSAGES BY AIRCRAFT FLIGHT ALTITUDE

*Alexander P. Plyasovskih,
orcid.org/0000-0003-2250-8852,
Doctor of Technical Sciences
JSC VNIIRA,
120, Obukhovskoy Oborony av.
Saint-Petersburg, 192012, Russia
info@vniira.ru*

*Evgeny A. Rubtsov,
orcid.org/0000-0003-2126-0015,
Candidate of Technical Sciences
Russian university of transport (MIIT),
9, buid. 9, Obrazcova str.
Moscow, 127994, Russia
rubtsov.rut.miit@gmail.com*

*Andrey S. Kalintsev,
orcid.org/0000-0002-2578-2892,
State ATM Corporation of the Russian Federation, Arkhangelsk ATM center,
North-West Air Navigation branch
20, Severnaya str.
Mezen, 164751, Russia
kas4job@gmail.com*

*Vladislav Y. Davidenko,
orcid.org/0009-0001-9707-166X
State ATM Corporation of the Russian Federation, North-West Air Navigation branch,
53A, 10 Line of V. I.
Saint-Petersburg, 199048, Russia
david071521@mail.ru*

Abstract. Proposed the method for confirming ADS-B data based on the analysis of information about the aircraft altitude and atmospheric parameters. To confirm the reliability of ADS-B messages, proposed to compare the geometric height obtained from satellite navigation system data with the height calculated for the real atmosphere (based on information from the meteorological service on pressure and temperature). To implement the proposed methodology, required the following input data: pressure at the level of the weather station, temperature at the level of the weather station and at flight altitudes, and data on geometric and barometric altitudes transmitted in the ADS message. It has been established that the greatest error in the calculations is introduced by the temperature at the aircraft flight altitude. In order to reduce the influence of errors in determining the temperature, proposed to use data from weather balloons. With developed methodology, a calculation was performed using real altitude data transmitted in the ADS-B message and the required data from the meteorological service. Messages received from the ADS-B ground station NS-1A manufactured by JSC VNIIRA, which is installed at the Mezen airfield, were used. The developed methodology is proposed to be used to confirm ADS-B data at regional aerodromes with low flight intensity.

Key words: ADS-B, weather balloon, barometric altitude, geometric altitude, pressure, temperature, Laplace formula, ISA.

Введение

Автоматическое зависимое наблюдение вещательного типа (АЗН-В) отнесено Международной организацией гражданской авиации (ИКАО) к перспективным технологиям наблюдения [Aeronautical Surveillance..., 2020; Global air..., 2016]. К достоинствам АЗН-В относят небольшую стоимость внедрения наземных станций по сравнению с затратами на развертывание вторичных радиолокаторов (ВРЛ) и многопозиционных систем наблюдения (МПСН). Эксплуатационная стоимость также значительно ниже. При наличии на борту высокоточных навигационных датчиков (как правило, приемников глобальных навигационных спутниковых систем – ГНСС) АЗН-В обеспечивает точность наблюдения не хуже, чем у радиолокационных средств.

Однако, в Руководстве по авиационному наблюдению ИКАО [Aeronautical Surveillance..., 2020] отмечается необходимость подтверждать достоверность получаемых от АЗН-В данных с помощью ВРЛ или МПСН. Это связано с возможностью возрастания погрешности навигации (при использовании автономных и азимутально-дальномерных систем навигации). Таким образом, необходимость подтверждения данных нивелирует экономическую привлекательность технологии АЗН-В.

Задача подтверждения данных АЗН-В без применения дополнительных средств наблюдения может быть решена с применением алгоритмических методов. В работах [Калинцев и др., 2021; Плясовских и др., 2019; Плясовских и др., 2020] были предложены методы подтверждения данных АЗН-В для обеспечения наземного движения на аэродроме и полетов в аэродромной зоне. Эти методы основаны на накоплении измерений координат воздушного судна (ВС) на станции АЗН-В с последующим статистическим анализом полученных данных.

В гражданской авиации данные о высоте ВС имеют большое значение: на их основе выполняется эшелонирование ВС и управление воздушным движением (УВД). Сообщение АЗН-В содержит информацию о горизонтальном и вертикальном местоположении ВС.

Вертикальная точность определения местоположения ГНСС значительно уступает горизонтальной. Согласно [Taib et al., 2016] погрешности при определении геометрической высоты могут превышать погрешности определения горизонтального местоположения в 3 раза. В нормальных условиях погрешность определения геометрической высоты находится в пределах 30-50 м [Taib et al., 2016]. Очевидно, что неоптимальное расположение спутников, отказ или нарушение работоспособности оборудования определения местоположения ВС приведут к большим погрешностям определения вертикального местоположения. Учитывая значение данных о высоте ВС и вероятность значительных погрешностей при определении геометрической высоты АЗН-В, можно заключить, что разработка методики подтверждения данных АЗН-В путем оценки высоты полета ВС является важной и актуальной задачей. Решение

этой задачи сделает возможным применение АЗН-В в качестве единственного источника наблюдения, что, принимая во внимание экономическую привлекательность данной технологии, позволит снизить стоимость развертывания и эксплуатации инфраструктуры наблюдения, что согласуется с документами ИКАО по планированию развития гражданской авиации [Global air..., 2016].

В сообщении АЗН-В передаются данные о геометрической и барометрической высоте. Барометрическая высота передается в виде значения занимаемого ВС эшелона полета относительно среднего уровня моря (mean sea level, MSL). Данные о барометрической высоте передаются по показаниям бортового высотомера, являющегося независимым от системы ГНСС источником данных о высоте полета ВС. Барометрический высотомер откалиброван в соответствии с Международной стандартной атмосферой (International Standard Atmosphere, ISA), предполагающей стандартное давление на уровне моря 1013,25 гПа при 15° [Taib et al., 2016; Manual of the ICAO..., 1993]. Сообщения расширенного сквиттера о положении ВС в воздухе помимо кодированных значений широты и долготы содержат данные о геометрической высоте. Данные ГНСС о геометрической высоте представляют собой высоту над эллипсоидом в системе координат WGS-84 [Minimum operational..., 2009].

Барометрический высотомер и приемник сигналов ГНСС измеряют принципиально разные величины, однако независимость этих источников позволяет использовать измерения барометрического высотомера для проверки геометрической высоты ВС и реализовать методику подтверждения данных АЗН-В путем оценки высоты полета ВС.

Материалы и методы

Для реализации методики подтверждения данных АЗН-В путем оценки высоты полета ВС необходимы следующие исходные данные:

- 1) Прогнозные значения температуры на высотах, данные метеозонда, данные давления от метеостанции.
- 2) Высота превышения ВПП;
- 3) Данные, передаваемые в сообщении АЗН-В:
 - Барометрическая высота;
 - Геометрическая высота, координаты ВС.

Рассмотрим передаваемые значения о высоте их различия.

Геометрическая высота, передаваемая в сообщении АЗН-В [Global air..., 2016], вычисляется бортовым приемником ГНСС в системе координат WGS84. В сообщении стандарта 1090ES значение геометрической высоты передается в поле «GNSS Height (HAE)», то есть как превышение над эллипсоидом в системе координат WGS84 [Minimum operational..., 2009]. Стоит отметить, что возможны два варианта передачи геометрической высоты [Minimum operational..., 2009]:

- 1) как непосредственное значение высоты «GNSS Height (HAE)»;
- 2) как разницы между барометрической и геометрической высотами «Difference between “Baro Altitude” and “GNSS Height (HAE)”».

В обоих случаях значения геометрической высоты определяются как превышения над эллипсоидом WGS84 [Global air..., 2016].

Эллипсоид WGS84 в вертикальной плоскости в качестве приближения к MSL, согласно [Aeronautical Surveillance..., 2020], может иметь ошибки от -100 до $+70$ м по отношению к геоиду (рис. 1), конкретные значения ошибок зависят от местоположения на земном шаре. Чтобы сравнить данные рассчитанной высоты для реальной атмосферы и данных о высоте полета ГНСС, их необходимо привести к одному уровню. Предлагается приводить все высоты к среднему уровню моря (MSL).

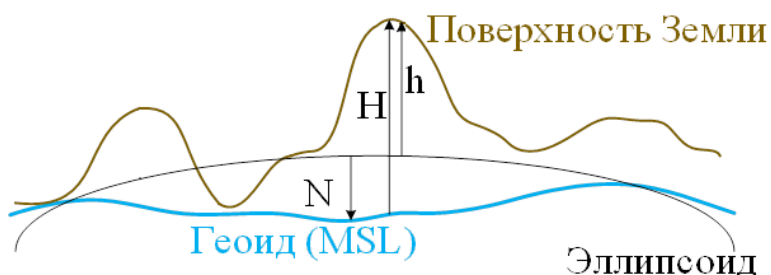


Рисунок 1 – Схематичное изображение уровней: геоида, эллипсоида WGS84 и высоты, определяемой приемником ГНСС

На рис. 1 обозначено: H – высота над геоидом, которая определяется гравитацией Земли и аппроксимируется средним уровнем моря (MSL) [Use International Standard..., s.a.]. По координатам от ВС находим волну геоида N (разность между поверхностью эллипсоида WGS84 и геоида). Для показанного на рис. 1 случая, для нахождения H нужно сложить высоту ВС над эллипсоидом h и волну геоида N в точке с координатами ВС:

$$H = h + N \quad (1)$$

В случае, если поверхность эллипсоида проходит над геоидом, необходимо для нахождения H вычесть из высоты над эллипсоидом h волну геоида N в точке с координатами ВС, которые получаем из сообщения АЗН-В:

$$H = h - N \quad (2)$$

Барометрический высотомер в кабине ВС откалиброван по геопотенциальной высоте. Таким образом, конкретной высоте (эшелону полета) соответствует определенное значение давления по стандартной атмосфере. Геопотенциальная высота выражается в геопотенциальных метрах (гп. м). Согласно документу ГОСТ 4401-81 «Атмосфера стандартная, параметры» геопотенциальная высота может быть представлена как:

$$H = \frac{\Phi}{g_c} = \frac{1}{g_c} \int_0^h g(h) dh \quad (3)$$

где H – геопотенциальная высота;

Φ – геопотенциал;

g_c – стандартное ускорение свободного падения;

$g(h)$ – ускорение свободного падения на высоте h , определяемое как:

$$g = g_c \left(\frac{r}{r+h} \right)^2 \quad (4)$$

где r – условный радиус Земли (равен 6356767 м);
 h – геометрическая высота.

Таким образом, геопотенциальная высота (H) и геометрическая высота (h) преобразуются в соответствии с документом ГОСТ 4401-81 «Атмосфера стандартная, параметры»:

$$H = \frac{rh}{r+h} \quad (5)$$

$$h = \frac{rH}{r-H} \quad (6)$$

Для реализации методики подтверждения данных АЗН-В путем оценки высоты полета ВС необходимы следующие исходные данные:

- превышение метеостанции над уровнем моря – h_1 ;
- барометрическая высота полета ВС – $H_{\text{ВС}}^{\text{баро}}$;
- геометрическая высота полета ВС – $H_{\text{ВС}}^{\text{ГМ}}$;
- температура на уровне метеостанции – t_0 ;
- температура на высоте полета ВС – t_H ;
- атмосферное давление на высоте полета ВС – $P_{\text{ВС}}$;
- атмосферное давление на уровне метеостанции – P_0 .

Данные АЗН-В включают барометрическую высоту $H_{\text{ВС}}^{\text{баро}}$ и геометрическую высоту $H_{\text{ВС}}^{\text{ГМ}}$ полета ВС [Minimum operational..., 2009].

Предоставляемые метеослужбой данные включают: прогнозные и фактические значения давления P_0 и температуры t_0 и t_H , которые получают от метеосервера или от другого источника метеоданных. Барометрическую и геометрическую высоту полета получают из сообщения АЗН-В от воздушного судна. Данные о превышении ВПП (давление, приведенное к уровню порога ВПП) получают из сборника аэронавигационной информации (AIP) в разделе географические и административные данные по аэродрому.

Согласно разработанной методике, геометрическая высота воздушного судна находится как сумма высоты превышения метеостанции над уровнем моря h_1 и высоты от уровня метеостанции до ВС h_2 (рис. 2).



Рисунок 2 – К задаче определения геометрической высоты АЗН-В

Подтверждение достоверности данных АЗН-В осуществляют следующим образом:

1. Определяют высоту превышения ВПП над уровнем моря – h_1 с использованием сборника аэронавигационной информации (AIP).

2. Определяют фактические значения давления P_0 и температуры t_0 на уровне метеостанции. Данные получают из сводок METAR, которые обновляются каждые полчаса и содержат фактические значения давления (QFE) и температуры на уровне метеостанции.

3. Определяют барометрическую высоту полета ВС $H_{BC}^{баро}$, значение которой содержится в сообщении АЗН-В.

4. Находят атмосферное давление P_{BC} на высоте полета ВС $H_{BC}^{баро}$, согласно данным документа ГОСТ 4401-81 «Атмосфера стандартная, параметры». Для высот до 11 000 м давление определяется как:

$$P = P_0 \cdot \theta^{\left(\frac{g_c}{L \cdot R}\right)}, \quad (7)$$

где P_0 – давление на уровне моря (101325 Па);

L – градиент температуры в соответствии с параметрами стандартной атмосферы (0,0065 К/м);

R – газовая постоянная ($287,0531 \frac{Дж}{кг \cdot К}$);

$$\theta = \frac{T}{T_0};$$

$$T = T_0 - L \cdot h;$$

T_0 – температура поверхностного слоя стандартной атмосферы (288,15 К);

h – барометрическая (геопотенциальная) высота ВС.

5. Определяют температуру на высоте полета воздушного судна t_H с использованием прогнозных значений, получаемых от метеослужбы. Прогнозные значения корректируются с использованием данных метеозонда, которые содержат фактическое значение температуры по высотам. Метеозонд запускают каждые 12 часов. Данные метеозонда находятся в открытом доступе (табл. 1) [Department of Atmospheric..., 2023]. Для их получения необходимо знать код метеостанции, от которой запускался радиозонд, в районе, где находится ВС (например, для Архангельска и Архангельской области необходимо применять данные от метеостанции с кодом 22543). Данные о значениях температуры записываются с разной дискретностью, поэтому для получения значения температуры на искомой высоте воспользуемся выражением:

$$t = \left(\frac{H_{BC} - H_j}{H_{j+1} - H_j} \right) \cdot (t_{j+1} - t_j) + t_j, \quad (8)$$

где t – температура в градусах на высоте H_{BC} , по данным метеозонда;

H_{BC} – геометрическая высота АЗН-В, полученная с борта ВС;

H_j – ближайшее значение высоты к H_{BC} , полученное из таблицы показаний радиозонда в меньшую сторону;

H_{j+1} – ближайшее значение высоты к H_{BC} , полученное из таблицы показаний метеозонда в большую сторону;

t_j – температура, соответствующая высоте H_j , полученная по данным метеозонда;

t_{j+1} – температура, соответствующая высоте H_{j+1} , полученная по данным метеозонда.

Таблица 1 – Пример данных метеозонда для метеостанции №22543 (Архангельск)

Атмосферное давление, ГПа	Геопотенциальная высота, м	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость ветра, узлы
1000	6	2,8	91	8
974	217	1,8	92	25
925	629	-0,3	94	33
850	1301	-3,9	94	39
746	2322	-8,7	96	43
725	2545	-9,7	96	42
700	2815	-12,3	93	41
669	3156	-15,3	94	39
633	3572	-18,9	94	43
574	4297	-20,7	78	50
503	5257	-27,6	68	60
500	5300	-27,9	67	60
448	6083	-32,9	65	60
417	6581	-37,3	65	60
400	6870	-39,9	64	60
397	6921	-40,5	66	60
316	8443	-51,3	67	68

6. Рассчитывают геопотенциальную высоту полета ВС относительно уровня метеостанции $h_2^{\Gamma\P}$. С помощью барометрической формулы Лапласа:

$$h_2^{\Gamma\P} = 18400 \cdot (1 + \lambda t) \lg \frac{P_{QFE}}{P_{BC}}, \quad (9)$$

где $h_2^{\Gamma\P}$ – геопотенциальная высота ВС относительно уровня метеостанции;

P_{QFE} – давление на уровне метеостанции;

P_{BC} – давление в точке полета ВС;

λ – коэффициент, равный 1/273;

t – средняя температура слоя атмосферы.

Средняя температура слоя t рассчитывается по формуле:

$$t = \frac{t_0 + t_H}{2} \quad (10)$$

где t_0 – температура на уровне метеостанции;

t_H – температура на высоте полета ВС.

7. Рассчитывают геометрическую высоту ВС относительно метеостанции. Перевод высоты из геопотенциальной в геометрическую осуществляется в соответствии с документом ГОСТ 4401-81 «Атмосфера стандартная, параметры». Геопотенциальная высота ВС (H) и его геометрическая высота (h) преобразуются согласно (5) и (6).

8. Рассчитывают геометрическую высоту полета воздушного судна относительно уровня моря ($H_{BC}^{ГМ}$):

$$H_{BC}^{ГМ} = h_1 + h_2^{ГМ} \quad (11)$$

где h_1 – превышение метеостанции над уровнем моря;

$h_2^{ГМ}$ – геометрическая высота от воздушного судна относительно ВПП.

9. Выполняют сравнение полученных высот $H_{BC}^{ГМ}$ и H_{ADS-B} . Данные АЗН-В о геометрической высоте представляют собой значения превышения над эллипсоидом в системе координат WGS84. С использованием существующих баз данных волны геоида [Calculation of Gravity..., s.a.; EGM96..., s.a.; Evaluation of the EGM96..., s.a.] выполняется приведение к уровню MSL значений геометрической высоты, получаемой из сообщения АЗН-В. При этом модуль разности вычисленных значений не должен превышать максимально допустимой погрешности измерений:

$$|H_{BC}^{ГМ} - H_{ADS-B}| < \Delta_{\text{МАКС.ДОП}} \quad (12)$$

где H_{ADS-B} – приведенная к уровню MSL геометрическая высота ВС, полученная из сообщения ADS-B.

Обоснование значения максимально допустимой погрешности $\Delta_{\text{МАКС.ДОП}}$ требует проведения отдельного исследования, поэтому в данной работе примем, что отклонение между высотами $|H_{BC}^{ГМ} - H_{ADS-B}|$ не должно превышать 25% от нормы вертикального эшелонирования 300 м. Таким образом, $\Delta_{\text{МАКС.ДОП}}$ принимается равной 75 м.

Если разность высот $|H_{BC}^{ГМ} - H_{ADS-B}|$ меньше $\Delta_{\text{МАКС.ДОП}}$, в таком случае геометрическую высоту, полученную из сообщения АЗН-В, считают достоверной, а данные АЗН-В подтвержденными: их можно применять без необходимости сверки с данными других средств наблюдения. В противном случае данные о геометрической высоте сообщения АЗН-В считаются недостоверными, таким образом информации АЗН-В доверять нельзя и необходимо либо применять иные средства наблюдения, либо процедурные методы УВД.

Результаты

Выполним процедуру подтверждения данных АЗН-В с использованием разработанной методики. В данном примере используются прогнозные значения температуры по высотам (для наглядности алгоритм коррекции температуры по данным метеозонда вынесен отдельным пунктом). Необходимо отметить, что коррекция данных температуры выполняется при поступлении данных зондирования и эти данные имеют больший, в сравнении с прогнозными

значениями, приоритет. При определении температуры в точке полета ВС используется линейная интерполяция.

Рассмотрим случай полета ВС местных воздушных линий на эшелоне 060 (высота 6000 футов или 1850 м). В качестве исходных данных использовались реальные данные, полученные от наземной станции АЗН-В НС-1А производства АО «ВНИИРА», установленной на аэродроме Мезень, и данные от метеослужбы. Данные АЗН-В, полученные от бортового ответчика, включают геометрическую и барометрическую высоты. От метеослужбы получены данные QFE, температуры на уровне метеостанции и прогнозные значения температуры на различных высотах. Значения высоты превышения ВПП получены из сборника AIP. Так, для ВПП аэродрома Мезень высота превышения ВПП $H_{\text{прев}}$ составляет 16 м. Значения исходных данных представлены в табл. 2 и табл. 3.

Таблица 2 – Исходные данные, полученные от наземной станции АЗН-В НС-1А производства АО «ВНИИРА», установленной на аэродроме Мезень

Описание параметра, единицы измерения	Обозначение	Значение параметра
Геометрическая высота, передаваемая в составе сообщения АЗН-В, м	H_{geom}	1630,22
Барометрическая высота, передаваемая в составе сообщения АЗН-В, фут	H_{baro}	6025

Таблица 3 – Исходные данные, полученные от метеослужбы аэродрома Мезень

Описание параметра, единицы измерения	Обозначение	Значение параметра
Давление QFE, Па	P_{QFE}	99848
Температура на уровне метеостанции, °C	t_0	–4
Прогнозное значение для высоты 600 м, °C	t_{mz600}	–11
Прогнозное значение для высоты 1500 м, °C	t_{mz1500}	–10
Прогнозное значение для высоты 3000 м, °C	t_{mz3000}	–17

Выполним шаги расчета согласно разработанной методике:

1. Высота превышения ВПП аэродрома Мезень: $H_{\text{прев}}=16$ м.
2. Фактические значения давления и температуры на уровне метеостанции аэродрома Мезень: $P_{\text{QFE}} = 99848$ Па, $t_0 = -4^\circ\text{C}$.
3. Барометрическая высота, передаваемая в сообщении АЗН-В: $H_{\text{baro}}= 6025$ фут. Учитывая, что 1 метр равняется 3,281 фут, выразим высоту в метрах: $H_{\text{baro_m}} = 6025 / 3,281 = 1836,42$ м.

4. Атмосферное давление на высоте полета ВС находим согласно выражению (7). Учитывая, что в стандартной атмосфере давление на уровне моря P_0 составляет 101325 Па, температура поверхностного слоя стандартной атмосферы T_0 равна 288,15 К, градиент температуры L составляет 0,0065 К/м, газовая постоянная R равна $287,0531 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, стандартное ускорение свободного падения g_c составляет 9,8067 м/с², получим:

$$P = P_0 \cdot \theta^{\left(\frac{g_c}{L \cdot R}\right)} = P_0 \cdot \left(\frac{T_0 - L \cdot h}{T_0}\right)^{\left(\frac{g_c}{L \cdot R}\right)} =$$

$$= 101325 \cdot \left(\frac{288,15 - 0,0065 \cdot 1836,42}{288,15}\right)^{\left(\frac{9,8067}{0,0065 \cdot 287,0531}\right)} = 81123 \text{ Па.}$$

5. Определим температуру на высоте полета ВС с использованием температуры на уровне метеостанции: $t_0 = -4^\circ\text{C}$ и прогнозных значений температуры: -11°C , -10°C и -17°C для высот 600, 1500 и 3000 м соответственно. Прогнозное значение температуры t_{mzInter} для высоты полета $H_{\text{BC}} = 1630,22$ м может быть получено с использованием линейной интерполяции по двум значениям температур на высотах $H_{1500} = 1500$ м и $H_{3000} = 3000$ м (рис. 3):

$$t_{\text{mzInter}} = t_{\text{mz1500}} - \frac{(t_{\text{mz1500}} - t_{\text{mz3000}}) \cdot (H_{\text{BC}} - H_{1500})}{(H_{3000} - H_{1500})} =$$

$$= -10 - \frac{(-10 + 17) \cdot (1630,22 - 1500)}{(3000 - 1500)} = -10,6^\circ\text{C}.$$

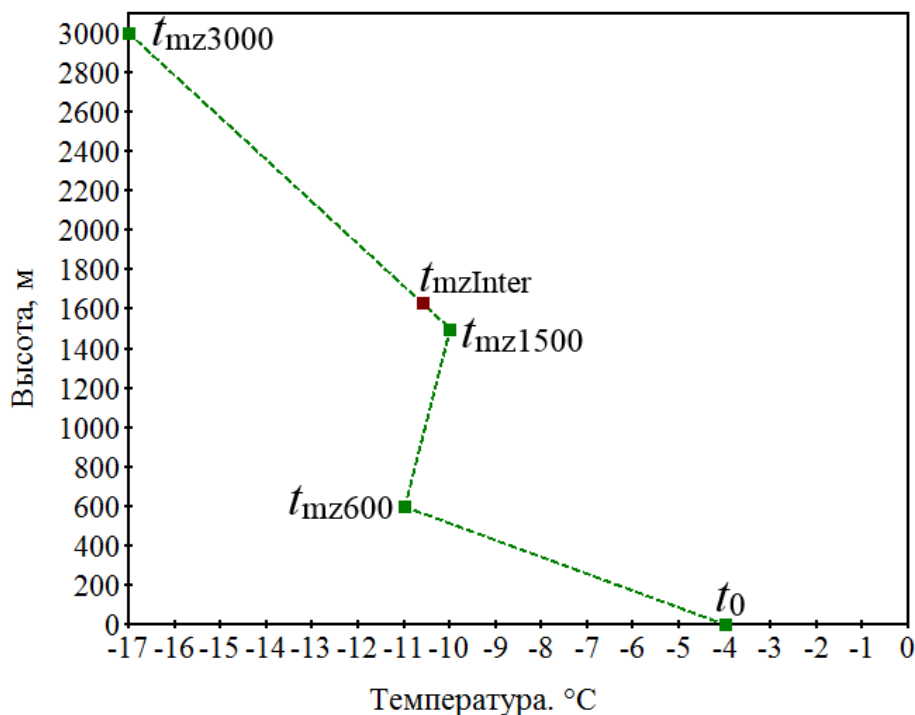


Рисунок 3 – К задаче определения прогнозного значения температуры t_{mzInter} для высоты полета ВС 1630,22 м

Среднее значение температуры слоя составит:

$$t = \frac{(t_{\text{mzInter}} + t_0)}{2} = \frac{-10,6 - 4}{2} = -7,3^\circ\text{C}$$

Следует отметить, что при наличии данных метеозонда, полученных для данного аэродрома или района (см. табл. 1), необходимо произвести коррекцию температур для заданных высот.

6. Геопотенциальная высота полета ВС относительно уровня метеостанции, найденная с применением барометрической формулы Лапласа (9), составит:

$$h_2^{\Gamma\P} = 18400 \cdot (1 + \lambda t) \lg \frac{P_{QFE}}{P_{BC}} = 18400 \cdot \left(1 - \frac{7,3}{273}\right) \lg \frac{99848}{81123} = 1615,2 \text{ м.}$$

7. Геометрическая высота, найденная с помощью выражения (6), равна:

$$h = \frac{rH}{r - H} = \frac{6356767 \cdot 1615,2}{6356767 - 1615,2} = 1615,6 \text{ м.}$$

8. Высота превышения ВПП аэродрома Мезень составляет 16 м, следовательно, геометрическая высота полета ВС относительно уровня моря согласно выражению (11) равна:

$$H_{BC}^{\Gamma M} = h_1 + h_2^{\Gamma M} = 16 + 1615,6 = 1631,6 \text{ м}$$

9. Для сравнения рассчитанной геометрической высоты полета ВС и высоты, передаваемой в сообщении АЗН-В (равной 1630,22 м), необходимо привести значение геометрической высоты к уровню MSL согласно выражениям (1) или (2). Значение волны геоида N для рассматриваемого случая полета ВС в районе аэродрома Мезень согласно модели EGM96 [12-14] составляет 34,5 м, при этом поверхность эллипсоида проходит над геоидом, следовательно, применяя выражение (2), получим приведенное к уровню MSL значение высоты полета:

$$H = h - N = 1630,22 - 34,5 = 1595,72 \text{ м}$$

Отсюда, модуль разности высот $\Delta_{\text{МАКС.ДОП}}$ согласно (12) составит:

$$\Delta_{\text{МАКС.ДОП}} = |H_{BC}^{\Gamma M} - H_{\text{АДЗ-В}}| = |1631,6 - 1595,72| = 35,88 \text{ м.}$$

Этот результат меньше установленного порога 75 м. Таким образом, в рассмотренном примере данные АЗН-В подтверждаются.

Дискуссия

Проблеме совершенствования АЗН-В посвящено достаточно большое количество работ, включающих анализ характеристик линий передачи данных, методов обеспечения защиты от помех и преднамеренного вмешательства, повышения точности и достоверности передаваемой информации. Так, в работе [Сравнение пропускной..., 2020] произведено сравнение пропускной способности различных линий передачи данных, применяемых для АЗН-В. В большинстве работ анализируется линия 1090ES, являющаяся стандартом для многих стран мира, в том числе и для России. В работе [Косьянчук и др., 2019] выполнен анализ проблемы низкой защищенности линии 1090ES, а также приведены возможные варианты решения этой проблемы. В работе [Алипов и др., 2019] выполнен сравнительный анализ информации, полученной от станции АЗН-В и радиолокатора, проанализированы невязки рассматриваемых данных и было установлено, что для московского региона порядка 30% ВС имеют дополнительную среднюю ошибку измерения координат 75 м.

Задача подтверждения данных АЗН-В без применения дополнительных средств наблюдения рассмотрена в работах [Калинцев и др., 2021; Плясовских и др., 2019; Плясовских и др., 2020], предложены методы алгоритмического подтверждения данных АЗН-В для обеспечения наземного движения на рабочей площади аэродрома и в воздушном пространстве. Методы, представленные в работах [Плясовских и др., 2019; Плясовских и др., 2020], основаны на накоплении измерений координат ВС с последующим статистическим анализом полученных данных. Необходимо отметить, что в перечисленных работах речь идет об ошибках и способах подтверждения данных АЗН-В в горизонтальной плоскости.

Применительно к высотам в работе [Лебедев и др., 2015] предложен новый метод мониторинга вертикального эшелонирования ВС на основе использования АЗН-В, в предложенном методе выполняется попарное сравнение передаваемых данных АЗН для встречных ВС.

В работе [Ali et al., 2019] проанализированы характеристики барометрических и геометрических данных АЗН-В. Проведен анализ показателей качества (параметров целостности высоты), дополняющих данные о высоте ВС.

Таким образом, можно сделать вывод, что применительно к АЗН-В ведутся работы по исследованию параметров и применению данных о вертикальном положении ВС как в РФ, так и за рубежом. Проблема подтверждения данных АЗН-В, в том числе и в вертикальной плоскости, является актуальной.

Разработанная в статье методика основана на использовании данных геометрической и барометрической высот и параметрах реальной атмосферы при подтверждении данных АЗН-В. Основной вклад в погрешности вычислений вносит температура. В методике предлагается использовать температуру, полученную методом интерполяции прогнозных данных температуры, передаваемых метеослужбой в блоке прогнозов по площадям (GAMET). Для коррекции и повышения точности температуры предлагается корректировать прогнозные значения по данным метеозондов.

Дальнейшие исследования планируется направить на повышение точности определения температуры воздуха на высоте полета ВС. Другим важным направлением является определение допустимого отклонения высот $\Delta_{\text{МАКС_ДОП}}$ при превышении которого диспетчер УВД должен получить уведомление о недостоверности получаемых данных АЗН-В. Также в дальнейшей работе планируется оценить точность разработанной методики перевода барометрической высоты ВС в геометрическую путем сравнения с данными многопозиционной системы наблюдения, как более точного средства наблюдения.

Заключение

В статье разработана методика подтверждения данных АЗН-В путем оценки барометрической и геометрической высот полета ВС. При выполнении расчетов для получения температуры использовались значения, полученные интерполяцией прогнозных значений с возможностью коррекции по данным

метеозонда. Основной вклад в погрешность определения высоты полета ВС для реальной атмосферы вносит температура. Для коррекции прогнозных значений температуры на высотах выполнения полетов предложено использовать данные метеозонда.

В качестве примера применения методики, в работе выполнены расчеты с использованием реальных данных о высотах полета ВС, получаемых от станции АЗН-В НС-1А производства АО «ВНИИРА», установленной на аэродроме Мезень, а также данные, получаемые от метеослужбы. Для эшелона 060 (6050 футов) была рассчитана разность высот, составившая 35,88 м.

При выполнении расчета было установлено, что данные АЗН-В с использованием предложенной методики подтверждаются, поскольку разность высот не превосходит принятого допустимого уровня 75 м.

Предложенная методика может быть применена для подтверждения данных геометрической высоты АЗН-В ВС при выполнении полетов МВЛ.

Библиографический список

- Алипов И. В.* Моделирование «тонкой» структуры вероятностного распределения невязок в показаниях АЗН-В и ВОРЛ. Некомпенсированная задержка / И. В. Алипов, В. Л. Кузнецов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2019. Т. 22. №. 4. С. 8-20. DOI 10.26467/2079-0619-2019-22-4-8-20
- Калинцев А. С.* Подтверждение данных АЗН-В в аэродромной зоне методом стробирования / А. С. Калинин, Е. А. Рубцов, А. П. Плясовских // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 7. С. 39-49. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-7-39-49.
- Косьянчук В. В.* Обзор основных путей повышения безопасности системы АЗН-В / В. В. Косьянчук, Н. И. Сельвесюк, Р. Р. Хамматов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2019. Т. 22. №. 1. С. 39-50. DOI 10.26467/2079-0619-2019-22-1-39-50
- Лебедев Б. В.* Исследование метода контроля вертикального эшелонирования воздушных судов на основе использования АЗН-В / Б. В. Лебедев, В. В. Соломенцев, А. Н. Стратийенко // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2015. №. 213 (3). С. 135-140.
- Плясовских А. П.* Метод оценки достоверности информации АЗН-в в системе наблюдения и контроля аэродромного движения / А. П. Плясовских, Е. А. Рубцов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2019. № 3(24). С. 90-102.
- Плясовских А. П.* Теоретическое обоснование подтверждения достоверности информации о местоположении объекта на рабочей площади аэродрома / А. П. Плясовских, Е. А. Рубцов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 3. С. 32-40. DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-3-32-40.
- Сравнение пропускной способности систем автоматического зависимого наблюдения-вещания / А. Мирошниченко, И. Татарчук, Э. Фальков [и др.] // Первая миля. 2020. №. 3(88). С. 24-29. DOI: 10.22184/2070-8963.2020.88.3.24.29.
- Aeronautical Surveillance Manual. Doc. 9924 AN/474. ICAO, 2020. 372 p.
- Ali B. S.* A study on geometric and barometric altitude data in automatic dependent surveillance broadcast (ADS-B) messages / B. S. Ali, N. A. Taib // The Journal of Navigation, 2019. V. 72. №. 5. pp. 1140-1158.
- Calculation of Gravity Field Functionals on User-Defined Points // International Centre for Global Earth Models // [Электронный ресурс]. URL: <http://icgem.gfz-potsdam.de/calcpoints> (дата обращения: 29.01.2023).

Department of Atmospheric Science // University of Wyoming // [Электронный ресурс]. 2023. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (дата обращения: 29.01.2023).

EGM96. The NASA GSFC and NIMA Joint Geopotential Model // The Onio state university // [Электронный ресурс]. URL: <https://cddis.nasa.gov/926/egm96/egm96.html> (дата обращения: 29.01.2023).

Evaluation of the EGM96 Model of the Geopotential in the United States // National Geodetic Survey // [Электронный ресурс]. URL: https://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/egm96.html (дата обращения: 29.01.2023).

Global air navigation plan 2016–2030. Doc. 9750 AN/963, Fifth Edition. ICAO, 2016. 142 p.

Manual of the ICAO standard atmosphere. Doc. 7488/3, 1993. 305 p.

Minimum operational performance standards for 1090 MHz extended squitter automatic dependent surveillance – broadcast (ADS-B) and traffic information services – broadcast (TIS-B). RTCA DO-260B, 2009. 1410 p.

Taib N. A. An Analysis of Geometric Altitude Data in ADS-B Messages / N. A. Taib, B. S. Ali // Proceedings of the 2016 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, 2016. pp. 697-704.

Use International Standard Atmosphere model // Mathworks // [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/aerotbx/ug/atmosisa.html> (дата обращения: 29.01.2023).

References

Aeronautical Surveillance Manual. Doc. 9924 AN/474. ICAO, 2020. 372 p.

Ali B. S., Taib N. A. (2019). A study on geometric and barometric altitude data in automatic dependent surveillance broadcast (ADS-B) messages. *The Journal of Navigation*. 72(5): 1140-1158.

Alipov I. V., Kuznetsov V. L. (2019). Modeling of the "thin" structure probability discrepancy distribution in the indications of ADS-B and SSR. Uncompensated latency. *Civil Aviation High Technologies*. 22(4): 8-20. (in Russian)

Calculation of Gravity Field Functionals on User-Defined Points // International Centre for Global Earth Models // [Electronic resource]. URL: <http://icgem.gfz-potsdam.de/calcpoints> (accessed 29.01.2023).

Department of Atmospheric Science // University of Wyoming // [Электронный ресурс]. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (accessed 29.01.2023).

EGM96. The NASA GSFC and NIMA Joint Geopotential Model // The Onio state university // [Electronic resource]. URL: <https://cddis.nasa.gov/926/egm96/egm96.html> (accessed 29.01.2023).

Evaluation of the EGM96 Model of the Geopotential in the United States // National Geodetic Survey // [Electronic resource]. URL: https://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/egm96.html (accessed 29.01.2023).

Global air navigation plan 2016–2030. Doc. 9750 AN/963, Fifth Edition. ICAO, 2016. 142 p.

Kalintsev A. S., Rubtsov E. A., Plyasovskih A. P. (2021). Confirmation of ADS-B data in the aerodrome traffic zone by gating method. *T-Comm*. 15(7): 39-49. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-7-39-49. (in Russian)

Kosianchuk V. V., Selvesiuk N. I., Khammatov R. R. (2019). An overview of the main ways to improve the ADS-B system security. *Civil Aviation High Technologies*. 22(1): 39-50. (in Russian)

Lebedev B. V., Solomentchev V. V., Stratienco A. N. (2015). Analysis method of control vertical separation of aircraft on the base of ADS-B. *Civil Aviation High Technologies*. 21(3): 135-140. (in Russian)

Manual of the ICAO standard atmosphere. Doc. 7488/3, 1993. 305 p.

Minimum operational performance standards for 1090 MHz extended squitter automatic dependent surveillance – broadcast (ADS-B) and traffic information services – broadcast (TIS-B). RTCA DO-260B, 2009. 1410 p.

Miroshnichenko A., Tatarchuk I., Falkov E. [and others]. (2020). Comparison of the throughput of automatic dependent surveillance-broadcast systems. *First mile*. 3: 24-29. DOI: 10.22184/2070-8963.2020.88.3.24.29. (in Russian)

Plyasovskih A. P., Rubtsov E. A. (2019). Reliability estimation method of ADS-B information for surface movement guidance and control system. Vestnik Saint Petersburg State University of Civil Aviation. 3(24): 90-102. (in Russian)

Plyasovskih A. P., Rubtsov E. A. (2020). Theoretical substantiation of confirmation of the validity of information about the location of the object on the work area of the aerodrome. T-Comm. 14(3): 32-40. DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-3-32-40. (in Russian)

Taib N. A., Ali B. S. (2016). An Analysis of Geometric Altitude Data in ADS-B Messages. Proceedings of the 2016 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. 697-704.

Use International Standard Atmosphere model // Mathworks // [Electronic resource]. URL: <https://www.mathworks.com/help/aerotbx/ug/atmosisa.html> (accessed 29.01.2023).