

УДК 656.7.052:629.7.058(985)

## ОСОБЕННОСТИ АЭРОНАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛЕТОВ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ: ОЦЕНКА РИСКОВ И ПУТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ

**Балжи Фёдор Сергеевич,**

диспетчер радиолокационного управления и процедурного контроля Московского центра автоматизированного управления воздушным движением; аспирант Московского государственного технического университета гражданской авиации (МГТУ ГА); 125993, Россия, г. Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20; fedorbalgi@yandex.ru

**Босулаев Михаил Дмитриевич,**

коммерческий пилот; магистр Московского государственного технического университета гражданской авиации (МГТУ ГА); 125993, Россия, г. Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20; bosul@bk.ru

**Набиев Дилнур Тухтамуродович,**

диспетчер радиолокационного управления и процедурного контроля Московского центра автоматизированного управления воздушным движением аэроузлов диспетчерского центра; аспирант Московского государственного технического университета гражданской авиации (МГТУ ГА); 125993, Россия, г. Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20; tedpoter17@gmail.com

### Аннотация

Арктическая зона России остаётся единственным крупным макрорегионом страны, где авиация не имеет транспортной альтернативы. Но аэронавигационная инфраструктура там принципиально не соответствует ни объёму реальных полётов, ни стандартам ИКАО для точных заходов на посадку. Это несоответствие обострилось на фоне активизации хозяйственного освоения шельфовых месторождений и роста интенсивности полётов по высокоширотным трассам в 2010-2020-е годы. Цель исследования состоит в систематизации факторов, которые ограничивают надёжность аэронавигационного обеспечения в высоких широтах; в обосновании приоритетных векторов технической модернизации (с учётом специфики физической среды и текущего состояния наземной инфраструктуры). Авторы приходят к выводу, что проблема не в отдельных технологических лакунах, а в системном разрыве между декларируемыми приоритетами арктической стратегии и реальной инфраструктурой аэронавигации. Сформулированная совокупность мер (развёртывание GBAS в опорных арктических аэропортах, применение псевдоспутников ГЛОНАСС в целях компенсации ухудшенного VDOP, интеграция спутникового ADS-B, введение обязательных стандартов двухчастотного оснащения воздушных судов) обоснована как технически, так и с точки зрения нормативной выполнимости в рамках действующего российского законодательства о гражданской авиации. Авторский вклад выражается в уточнении структурированной классификации рисков аэронавигационного обеспечения по широтным зонам и в формулировании рекомендаций, в которых конкретные технические решения увязываются с реально существующей инфраструктурой

диспропорцией. Результаты могут быть полезны специалистам в области организации воздушного движения, разработчикам нормативных документов в сфере аэронавигации.

---

**Ключевые слова:** аэронавигационное обеспечение, арктическая авиация, высокие широты, ионосферное мерцание, модернизация навигационного оборудования, полярная ионосфера, псевдоспутники, управление воздушным движением

---

## **SPECIFICS OF AIR NAVIGATION SUPPORT FOR HIGH-LATITUDE FLIGHTS: RISK ASSESSMENT AND EQUIPMENT MODERNIZATION PATHWAYS**

**Fedor S. Balzhi,**

Radar and Procedural Control Air Traffic Controller at the Moscow Automated Air Traffic Control Center; Postgraduate Student at the Moscow State Technical University of Civil Aviation (MSTUCA); 20 Kronshtadtsky Blvd, Moscow, 125993, Russia; fedorbalgi@yandex.ru

**Mikhail D. Bosulaev,**

Commercial Pilot; Master's Student at the Moscow State Technical University of Civil Aviation (MSTUCA); 20 Kronshtadtsky Blvd, Moscow, 125993, Russia; bosul@bk.ru

**Dilnur T. Nabiev,**

Radar and Procedural Control Air Traffic Controller at the Moscow Automated Air Traffic Control Center (Terminal Control Center); Postgraduate Student at the Moscow State Technical University of Civil Aviation (MSTUCA); 20 Kronshtadtsky Blvd, Moscow, 125993, Russia; tedpoter17@gmail.com

---

### **ABSTRACT**

---

The Russian Arctic zone remains the only major macro-region in the country where aviation has no transport alternative. However, the air navigation infrastructure there fundamentally falls short of both the actual flight volume and ICAO standards for precision approaches. This discrepancy has exacerbated amid the intensified economic development of offshore fields and the growing intensity of flights along high-latitude routes in the 2010s–2020s. The purpose of this study is to systematize the factors limiting the reliability of air navigation support in high latitudes and to substantiate the priority vectors for technical modernization, considering the specific physical environment and the current state of ground infrastructure. The authors conclude that the problem lies not in isolated technological gaps, but in a systemic disconnect between the declared priorities of the Arctic strategy and the actual air navigation infrastructure. The formulated set of measures—deploying GBAS in hub Arctic airports, utilizing GLONASS pseudolites to compensate for degraded VDOP, integrating satellite-based ADS-B, and introducing mandatory standards for dual-frequency aircraft equipment—is substantiated both technically and in terms of regulatory feasibility within the framework of current Russian civil aviation legislation. The authors' contribution consists in refining the structured classification of air navigation support risks by latitudinal zones and formulating recommendations that link specific technical solutions with the existing infrastructural disparity. The results may be useful to air traffic management specialists and developers of regulatory documents in the field of air navigation.

**Keywords:** air navigation support, Arctic aviation, high latitudes, ionospheric scintillation, navigation equipment modernization, polar ionosphere, pseudolites, air traffic control

Стремительное расширение транспортно-логистической активности в Арктическом регионе определяет всё возрастающую потребность в надёжной и высокоточной аэронавигации. Арктическая зона Российской Федерации охватывает свыше 40% территорий страны, которые относятся к труднодоступным и отдалённым районам Заполярья. Это делает авиацию фактически безальтернативным видом транспорта для большинства населённых пунктов данного макрорегиона.

Между тем, аэронавигационное обеспечение полётов в высоких широтах сопряжено с целым рядом специфических физических и технологических ограничений. Они в значительной мере отличают характеризуемый регион от умеренных и тропических зон. По существу, основная проблема состоит в том, что средства навигационного обеспечения, находящиеся на эксплуатации в гражданской авиации, не в полной мере удовлетворяют требуемому качеству функционирования при воздействии неоднородностей полярной ионосферы, тропосферы, подстилающих слоёв поверхности Земли. Помимо этого, отсутствие непрерывного радиолокационного контроля над воздушными судами, которые выполняют полёты по высокоширотным трассам над акваториями Северного Ледовитого океана, ставит задачу создания принципиально новых технологических решений в области управления воздушным движением.

Актуальность рассматриваемой проблематики аргументируется ещё и тем, что в «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» развитие полярной авиации названо одной из ключевых задач государственной политики [1]. Реализация соответствующих стратегических шагов нереальна без системной модернизации наземной и бортовой аппаратуры аэронавигационного обеспечения (с учётом особых климатических, геофизических, геополитических условий, присущих данному региону).

Высокие широты (как правило, от 60° с.ш. и выше) формируют уникальное сочетание природных факторов. Они оказывают комплексное дестабилизирующее воздействие на рассматриваемые обеспечительные системы. Прежде всего, на этих территориях наблюдается принципиально иная структура полярной ионосферы: она характеризуется интенсивными нерегулярными неоднородностями электронной концентрации, которые вызывают флуктуации амплитуды и фазы радиосигналов – явление, известное как ионосферное мерцание. Согласно исследованиям, ионосферные возмущения могут приводить к задержкам группового распространения сигнала, сбоям слежения в приёмниках, временной потере захвата спутниковых сигналов. И это непосредственно влечёт за собой ухудшение точности навигационных определений [9, 12].

Очень важным фактором особой значимости служит малый угол возвышения навигационных космических аппаратов (НКА) над горизонтом. Из-за орбитальных параметров систем GPS и ГЛОНАСС в высоких широтах наблюдается низкое значение высотного геометрического фактора точности (VDOP). Это делает определение вертикальной компоненты координат воздушного судна нестабильным. Указанная проблема приобретает особую остроту при заходе на посадку на аэродромы, которые расположены на островных территориях и арктических льдах.

Немаловажную роль играет также феномен близости к геомагнитному полюсу. В приполярных районах магнитный компас теряет свои навигационные свойства из-за малой величины горизонтальной составляющей геомагнитного поля, вынуждая экипажи переходить на истинные либо инерциальные системы ориентации. Существенное влияние

оказывают и явления полярного поглощения, которые при мощных солнечных протонных событиях подчас приводят к многочасовым перерывам в КВ-связи, а также к деградации сигналов ОВЧ-диапазона и систем наблюдения [8, 10].

Совокупность вышеназванных факторов формирует специфический профиль рисков. Он требует методического осмысления. Ухудшение точностных характеристик навигационных систем может явиться причиной авиационных происшествий при сближении воздушных судов на трассах полётов, а также при выполнении захода на посадку в сложных метеоусловиях (в отсутствие радиолокационного контроля). Международная организация гражданской авиации (ИКАО) нормирует параметры точности, целостности, непрерывности, доступности (RNAVP) для каждого этапа полёта. Однако в арктическом регионе выдерживать данные нормативы значительно сложнее, чем в зонах с умеренной ионосферной активностью.

Анализ функциональных дополнений спутниковых навигационных систем (ФД СНС) – SBAS и GBAS – помогает выявить их принципиальное ограничение применительно к высоким широтам. Системы типа EGNOS, работающие с геостационарными спутниками, обеспечивают удовлетворительное покрытие лишь до широт порядка 70-72°; в Арктике, требующей наиболее интенсивного мониторинга, их сигнал либо отсутствует, либо деградирован [13]. Это означает, что значительная часть российского Заполярья фактически лишена систем функционального дополнения, которые необходимы для выполнения точных заходов на посадку по категориям II и III ИКАО.

Ниже в таблице 1 представлено сопоставление основных рисков факторов и степени их выраженности.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика рисков аэронавигационного обеспечения по широтным зонам (составлено на основе [3, 8, 10, 13])

Фактор	Умеренные широты (40-60°)	Высокие широты (60-75°)	Приполярная зона (>75°)
Ионосферные флуктуации сигнала	Низкий уровень	Высокий уровень	Очень высокий уровень
Геометрический фактор VDOP (спутники ГНСС)	Удовлетворительный	Неустойчивый	Весьма неустойчивый
Покрытие SBAS	Полное	Частичное (до ~70°)	Отсутствует
Работоспособность магнитного компаса	Нормальная	Ограниченная	Недостаточная
Покрытие ADS-B (наземные станции)	Полное	Неполное	Фрагментарное
Перерывы КВ-связи (РСА-события)	Единичные	Периодические	Частые
Радиолокационный контроль ВД	Непрерывный	Зональный	Практически отсутствует

Система автоматического зависимого наблюдения-трансляции (ADS-B) представляет собой перспективное, но пока не в полной мере реализованное в арктических условиях средство наблюдения. По состоянию на середину 2020-х годов наземная сеть ADS-B-приёмников в Арктической зоне России охватывает лишь крупные аэропортовые комплексы. А трассы над безориентирной тундрой и арктическими акваториями остаются зонами ограниченного либо нулевого наблюдения [7]. Это порождает ситуацию, при которой диспетчерский контроль над воздушными судами возможен лишь посредством

речевых донесений (инструмента, принципиально ненадёжного при прерывистой КВ-связи).

В Арктической зоне России насчитывается не более 39 аэродромов, из которых лишь 35 оснащены необходимым оборудованием. Этого принципиально недостаточно для обеспечения разветвлённой сети воздушного движения. Большинство этих аэродромов располагают навигационной аппаратурой, созданной ещё в советский период либо прошедшей частичную замену в 1990-2000-е годы без комплексной модернизации. На практике это означает сохранение ситуации, когда автоматические радиоконпасы (АРК) КМВ- и ГКМВ-диапазонов по-прежнему используются как основное или резервное средство навигации, несмотря на их известную подверженность многолучевым искажениям в условиях полярной ионосферы [1].

Системы ГЛОНАСС обеспечивают приём сигнала в Арктике в целом удовлетворительно. Ключевую роль здесь играет то обстоятельство, что орбитальная группировка ГЛОНАСС при наклонении орбит  $64,8^\circ$  обеспечивает несколько лучшее угловое перекрытие в высоких широтах по сравнению с GPS (наклонение  $55^\circ$ ). Вместе с тем, для обеспечения высокоточных заходов на посадку по стандартам ИКАО одного ГНСС-приёма недостаточно. Необходимы функциональные дополнения, мониторинг целостности в реальном времени и, в ряде случаев, дублирующие навигационные средства. По-видимому, именно это противоречие (между формально удовлетворительным покрытием ГЛОНАСС/GPS и фактической недостаточностью инфраструктуры функциональных дополнений) предстает сегодня ключевым системным изъяном аэронавигации российской Арктики.

Технические решения по усовершенствованию аэронавигационного обеспечения в высоких широтах целесообразно рассматривать в двух взаимодополняющих плоскостях:

- модернизация бортового оборудования;
- развитие наземной (а также орбитальной) инфраструктуры.

В части наземной инфраструктуры наиболее перспективным направлением видится создание сети псевдоспутников (ПС), или GNSS-ретрансляторов наземного базирования. Результаты исследований показывают, что задействование в высоких широтах функционального дополнения ГЛОНАСС/GPS в виде ПС позволяет в зонах плохой радиовидимости НКА существенно улучшить точностные характеристики навигационной аппаратуры потребителей (АП СНС), особенно при выполнении маневров с затенением навигационной антенны. Три оптимально расположенных ПС способны обеспечить зону высокой точности определения высоты, охватывающую всю площадь аэродрома. И это принципиально важно для выполнения категорированных заходов на посадку [2, 5].

Ещё одним перспективным подходом является внедрение спутников высокоэллиптических орбит типа «Молния», что дает возможность обеспечить непрерывное высотное покрытие арктических районов (в отличие от геостационарных аппаратов, которые «видны» из высоких широт под малыми углами возвышения). В частности, спутники серии «Арктика-М» на высокоэллиптических орбитах призваны обеспечить метеорологическое и коммуникационное покрытие арктической зоны России. По аналогичной схеме возможна организация спутникового компонента SBAS-типа для высоких широт – задача, уже рассматриваемая в рамках развития системы «Сфера» [6].

Весьма значимой составляющей модернизации служит развитие спутникового наблюдения ADS-B. Приёмники начали формировать глобальное покрытие, включая арктические акватории. Однако их применение в российском воздушном пространстве требует соответствующей нормативно-технической базы вкуче с интеграцией с автоматизированными системами управления воздушным движением. Ещё одним направлением, которое заслуживает исследовательского внимания, видится навигация на

основе космических мюонов (имеется в виду технология, разрабатываемая для применения в полярных регионах при минимальной доступности ГНСС-сигналов) [4, 7].

Параллельно с инфраструктурными изменениями необходима и модернизация бортового оборудования. Переход на двухчастотные многосозвездные приёмники ГНСС позволяет в значительной мере нивелировать ионосферные погрешности за счёт их измерения на двух частотах и последующей коррекции. Вместе с тем, нужно принять во внимание, что полный переход авиационного парка на такие приёмники – это задача, которая требует значительных инвестиций и нормативного регулирования [11].

Обозначенные системные уязвимости арктической аэронавигации требуют не точечных, а комплексных технических решений. В части наземной инфраструктуры приоритетной мерой целесообразно считать развёртывание станций GBAS в аэропортах Тикси, Певек, Хатанга, Нарьян-Мар: в отличие от SBAS-систем, которые привязаны к геостационарным спутникам и теряют покрытие севернее 70-й параллели, GBAS-станции функционируют независимо от широты; они обеспечивают точные категоризованные заходы на посадку. Параллельно необходимо формирование сети псевдоспутников ГЛОНАСС в районах аэродромов с высокой посадочной нагрузкой. Описываемый подход доказал результативность при компенсации ухудшенного VDOP в зонах малых углов возвышения навигационных космических аппаратов. Устранение «слепых» зон наблюдения над акваториями Северного Ледовитого океана достижимо посредством интеграции спутникового ADS-B в автоматизированные системы управления воздушным движением (технология уже обеспечивает глобальное покрытие, однако в российском воздушном пространстве не имеет необходимой нормативной базы). На уровне бортового оборудования разумно ввести национальный стандарт обязательного оснащения воздушных судов, которые выполняют полёты в Арктике, двухчастотными многосозвездными ГНСС-приёмниками с функцией RAIM. Благодаря этому снимается зависимость от одночастотных ионосферных моделей коррекции и обеспечивается автономный контроль целостности на борту.

Итак, имеет место принципиальный разрыв между декларируемыми стратегическими приоритетами освоения Арктики и фактическим состоянием её аэронавигационной инфраструктуры. Ключевое противоречие состоит в том, что формально удовлетворительное орбитальное покрытие ГЛОНАСС не компенсирует отсутствие функциональных дополнений и разрывов в системе наблюдения. Рассмотренная в статье совокупность мер (GBAS, псевдоспутники, спутниковый ADS-B, двухчастотные приёмники) образует технически обоснованную и поэтапно реализуемую программу модернизации. Её практическое значение выходит за границы авиационной безопасности: надёжная аэронавигация является инфраструктурной предпосылкой для реализации шельфовых проектов, развития Северного морского пути, поддержания транспортной связности арктических территорий. Дальнейшие исследования целесообразно сориентировать на численное моделирование точности совместного использования ГЛОНАСС и псевдоспутников в условиях реальных полярных ионосферных событий.

#### Список литературы:

1. Авиация в Арктике: эпоха Возрождения // URL: <https://arctic-russia.ru/article/aviatsiya-v-arktike-epokha-vozhzhdeniya/> (дата обращения: 24.04.2026).
2. Арефьев, Р.О. Совершенствование аэронавигационного обеспечения этапа посадки путем оптимизации размещения псевдоспутников ГЛОНАСС / Р.О. Арефьев, Н.Г. Арефьева, О.Н. Скрыпник // Труды МАИ. – 2017. – № 92. – С. 28.

3. Борсоев, В.А. Методы и средства навигационного обеспечения полетов и управления воздушными судами в высоких широтах / В.А. Борсоев // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Москва: 2004. – 30 с.
4. Исследования альтернативной навигации для высоких широт на мюонах // URL: <http://vestnik-glonass.ru/news/tech/issledovaniya-alternativnoy-navigatsii-dlya-vysokikh-shirot-na-myuonakh/> (дата обращения: 24.04.2026).
5. Плясовских, А.П. Перспективные технологии развития автоматизированных систем управления воздушным движением: монография / А.П. Плясовских, А.Ю. Княжский, Е.А. Рубцов. – Москва: Русайнс, 2023. – 262 с.
6. Рогозин сообщил, что «Сфера» будет включать пять спутниковых группировок для телекома // URL: <https://tass.ru/kosmos/12754407?ysclid=mobnzmboqm707881339> (дата обращения: 24.04.2026).
7. ADS-B (спутниковая система) // URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:ADS-B\\_\(спутниковая\\_система\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:ADS-B_(спутниковая_система)) (дата обращения: 24.04.2026).
8. Alden, C. Operationally Significant Phenomena and Impacts for Ground Operations // URL: [https://assets.science.nasa.gov/content/dam/science/hpd/heat/fhe-presentations/4\\_SWERV\\_GroundImpacts\\_Alden-Stubenrauch.pptx?emrc=69e2b153750b5](https://assets.science.nasa.gov/content/dam/science/hpd/heat/fhe-presentations/4_SWERV_GroundImpacts_Alden-Stubenrauch.pptx?emrc=69e2b153750b5) (дата обращения: 24.04.2026).
9. De Michelis, P. Ionospheric turbulence: A challenge for GPS loss of lock understanding / P. De Michelis, G. Consolini, A. Pignalberi, G. Lovati, M. Pezzopane, R. Tozzi, et al. // Space Weather, – 2022. – Vol 20. – Iss. 7. – URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2022SW003129> (дата обращения: 24.04.2026).
10. Flight Permit Challenges with ETOPS and Extended Range Operations in Aviation // URL: <https://justaviation.aero/etops-polar-routes-permits/> (дата обращения: 24.04.2026).
11. Robert, E. Ionosphere Impact on GNSS Based Civil Aviation Applications During Maximum Solar Activity / E. Robert, M. Mabillean, P. Ladoux, D. Duchet // Proceedings of the 2014 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, California, January 2014. – Pp. 677-689.
12. Seo, J. Overcoming ionospheric scintillation for worldwide GPS aviation / J. Seo // URL: <https://web.stanford.edu/group/scpnt/gpslab/pubs/theses/JiwonSeoThesis10.pdf> (дата обращения: 24.04.2026).
13. Sivaranjani, M. Satellite Communication Development in Arctic Region / M. Sivaranjani, D. Shalini // International journal of engineering research & technology (IJERT) Confcall. – 2018. – Vol. 06. – Iss. 14. – URL: <https://www.ijert.org/satellite-communication-development-in-arctic-region> (дата обращения: 24.04.2026).

**References:**

1. Aviation in the Arctic: Renaissance era // URL: <https://arctic-russia.ru/article/aviatsiya-v-arktike-epokha-vozrozhdeniya/> (date of access: 24.04.2026).

2. Arefyev, R.O. Improving aeronautical support for the landing stage by optimizing the placement of GLONASS pseudosatellites / R.O. Arefyev, N.G. Arefyeva, O.N. Skrypnik // Proceedings of MAI. – 2017. – No. 92. – P. 28.
3. Borsoev, V.A. Methods and means of navigational support for flights and aircraft control in high latitudes / V.A. Borsoev // Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. – Moscow: 2004. – 30 p.
4. Research of alternative navigation for high latitudes on muons // URL: <http://vestnik-glonass.ru/news/tech/issledovaniya-alternativnoy-navigatsii-dlya-vysokikh-shirot-namyuonakh/> (date of access: 24.04.2026).
5. Plyasovskikh, A.P. Promising technologies for the development of automated air traffic control systems: monograph / A.P. Plyasovskikh, A.Y. Knyazhsky, E.A. Rubtsov. – Moscow: Ruscience, 2023. – 262 p.
6. Rogozin reported that "Sfera" will include five satellite constellations for telecom // URL: <https://tass.ru/kosmos/12754407?ysclid=mobnzmbqmq707881339> (date of access: 24.04.2026).
7. ADS-B (satellite system) // URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:ADS-B\\_\(спутниковая\\_система\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:ADS-B_(спутниковая_система)) (date of access: 24.04.2026).
8. Alden, C. Operationally Significant Phenomena and Impacts for Ground Operations // URL: [https://assets.science.nasa.gov/content/dam/science/hpd/heat/fhe-presentations/4\\_SWERV\\_GroundImpacts\\_Alden-Stubenrauch.pptx.pdf?emrc=69e2b153750b5](https://assets.science.nasa.gov/content/dam/science/hpd/heat/fhe-presentations/4_SWERV_GroundImpacts_Alden-Stubenrauch.pptx.pdf?emrc=69e2b153750b5) (date of access: 24.04.2026).
9. De Michelis, P. Ionospheric turbulence: A challenge for GPS loss of lock understanding / P. De Michelis, G. Consolini, A. Pignalberi, G. Lovati, M. Pezzopane, R. Tozzi, et al. // Space Weather, – 2022. – Vol 20. – Iss. 7. – URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2022SW003129> (date of access: 24.04.2026).
10. Flight Permit Challenges with ETOPS and Extended Range Operations in Aviation // URL: <https://justaviation.aero/etops-polar-routes-permits/> (date of access: 24.04.2026).
11. Robert, E. Ionosphere Impact on GNSS Based Civil Aviation Applications During Maximum Solar Activity / E. Robert, M. Mabillean, P. Ladoux, D. Duchet // Proceedings of the 2014 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, California, January 2014. – Pp. 677-689.
12. Seo, J. Overcoming ionospheric scintillation for worldwide GPS aviation / J. Seo // URL: <https://web.stanford.edu/group/scpnt/gpslab/pubs/theses/JiwonSeoThesis10.pdf> (date of access: 24.04.2026).
13. Sivaranjani, M. Satellite Communication Development in Arctic Region / M. Sivaranjani, D. Shalini // International journal of engineering research & technology (IJERT) Confcall. – 2018. – Vol. 06. – Iss. 14. – URL: <https://www.ijert.org/satellite-communication-development-in-arctic-region> (date of access: 24.04.2026).