

УДК 629.052.9, 550.338.2

О. В. Золотов, Ю. В. Романовская

## **Математическое моделирование верхней атмосферы Земли: аспект обеспечения транспортной инфраструктуры**

В настоящее время растет значимость спутниковых навигационных систем для решения разнообразных прикладных задач в различных отраслях экономики и государственного сектора России. С 2001 г. в соответствии с Федеральной целевой программой планомерно развивается отечественная глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. В работе приведены примеры применения ГЛОНАСС в различных секторах транспортной системы России, включая автомобильный, железнодорожный и водный транспорт. Любая навигационная система (или система определения координат) имеет свои погрешности вычисления местоположения объекта, связанные с различными факторами. Особое внимание в работе уделяется погрешностям, связанным с учетом свойств среды распространения спутникового навигационного сигнала (т. е. преимущественно ионосферной составляющей задержки сигнала). Величина ошибки позиционирования возрастает в высоких широтах, что обусловлено особенностями (наклоном) орбит спутников навигационных систем и свойствами высокоширотной ионосферы, а также при возмущенных геомагнитных условиях, в частности во время геомагнитных бурь и суббурь. В качестве моделей ионосферы для вычисления поправок (ионосферных задержек) в современных навигационных системах используются статистические модели, полученные в результате анализа большого количества серий наблюдений. Такие модели не могут обеспечить высокую точность определения местоположения объекта при возмущениях ионосферы, а также в высоких широтах. Получаемые по статистической модели параметры ионосферы, используемые при определении ионосферных задержек спутниковых сигналов, могут быть скорректированы с помощью самосогласованной физико-математической модели ионосферы. В качестве такой модели авторы предлагают использовать глобальную численную самосогласованную модель верхней атмосферы Земли UAM (Upper Atmosphere Model), учитывающую высыпания энергичных частиц и продольные токи в авроральных областях и адекватно воспроизводящую поведение ионосферы в высоких широтах при различных геофизических условиях.

**Ключевые слова:** глобальные спутниковые навигационные системы, точность позиционирования, псевдодальность, ионосфера, математическое моделирование.

### **Введение**

В настоящее время наблюдается существенное усиление зависимости транспортной инфраструктуры не только от функционирования ее наземной части, но и от космического сегмента, в особенности от глобальных спутниковых навигационных систем. К последним относятся ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система, Россия), GPS (Global Positioning System – система глобального позиционирования, США), Galileo (совместный проект Европейского союза и Европейского космического агентства), Бэйдоу (Китай). В России 2011 г. завершилось выполнение Федеральной целевой программы "Глобальная навигационная система ГЛОНАСС", начатое в 2001 г. В результате выполнения этой программы российская космическая навигационная система по своей точности, доступности и оперативности сравнялась с американской системой глобального позиционирования GPS на российской территории. При этом доступность навигационного поля системы ГЛОНАСС достигла 100 % как на территории России, так и в других странах. В 2012 г. начата реализация Федеральной целевой программы "Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 гг.", в соответствии с которой планируется модернизация дополняющих комплексов системы, в частности системы высокоточного определения временных поправок<sup>1</sup>.

### **Материалы и методы**

Наличие в свободном доступе (в том числе для гражданского применения) сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (на территории России – ГЛОНАСС) позволяет предоставлять новые сервисы и услуги как в коммерческом секторе, так и областях, подлежащих государственному регулированию. Член совета директоров ПАО "Навигационно-информационные системы" Д. А. Марков раскрывает возможности применения системы "ЭРА-ГЛОНАСС" в дорожном секторе и приводит данные о том, что более 55 % навигационного рынка приходится на автомобильный транспорт [1]. В соответствии с действующим техническим регламентом Таможенного союза "О безопасности колесных транспортных средств" транспортные средства, используемые для коммерческих перевозок пассажиров и перевозок детей, а также транспортные средства оперативных служб должны быть оснащены аппаратурой спутниковой навигации, а с 2017 г. установка

---

<sup>1</sup> Федеральная целевая программа "Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 гг. Общие показатели" : утв. постановлением Правительства Рос. Федерации от 3 марта 2012 г. № 189. URL: <http://federalbook.ru/files/OPK/Soderjanie/OPK-9/V/Glonass.pdf>.

бортового устройства вызова экстренных служб становится обязательной для всех новых (в том числе "личных") автомобилей. Систему ГЛОНАСС предлагается использовать как для обеспечения безопасности движения [2; 3], так и для контроля водителей на автотранспортных предприятиях [4; 5]. Перспективным также является применение систем спутниковой навигации и для других видов транспорта. Например, в работе [6] рассматривается возможность улучшения качества управления железнодорожными перевозками и повышения безопасности на железнодорожном транспорте за счет использования систем ГЛОНАСС и GPS. Вопросам интеллектуальной навигации железнодорожного транспорта с помощью системы ГЛОНАСС посвящена работа [7]. В работе [8] обосновывается необходимость внедрения технологий спутниковой навигации на внутреннем водном транспорте с целью обеспечения надежного управления судоходством.

Таким образом, обеспечение бесперебойной работы систем спутниковой навигации и уменьшение погрешностей определения местоположения объекта является актуальной и важной задачей.

## Результаты и обсуждение

### *Проблема геолокации по данным глобальных навигационных спутниковых систем*

Решение любой из перечисленных выше задач требует определения координат приемника с адекватной решаемой задаче точностью и надежностью. Решение этой задачи эквивалентно нахождению координат приемника при условии, что известны координаты источников (минимум трех спутников) и расстояние до каждого из спутников.

В такой постановке можно выделить погрешности, связанные с погрешностью определения положения источников, погрешности, связанные с определением расстояния "источник – приемник", а также с характеристиками покрытия спутниковой группировки земной поверхности. Первые погрешности уменьшают путем публикации уточненных эфемерид орбит спутников (для их определения требуются наземные станции слежения/контроля космического сегмента), для устранения вторых следует учитывать особенности распространения сигналов навигационных спутников на пути "приемник – источник". Основным источником этой погрешности является ионосферная задержка сигнала, которая непосредственно связана с распределением электронной плотности (в ионосфере) вдоль луча "источник (спутник) – приемник (наземная станция)". Подробнее этот вопрос изложен в следующем пункте. Последняя, связанная с конфигурацией орбит спутниковой группировки, составляющая погрешности не может быть компенсирована "модельным" способом.

В качестве наглядного примера отметим, что точность определения координат у различных глобальных навигационных систем в разных регионах отличается, однако все из них предоставляют худшие показатели в высоких широтах (вплоть до неработоспособности в приполярных областях). Это объясняется углами наклона орбит спутников:  $64,8^\circ$  у спутников системы ГЛОНАСС,  $55^\circ$  у спутников системы GPS и  $56^\circ$  у спутников системы Galileo.

### *Погрешность навигационных систем, связанная со средой распространения сигнала*

Одним из факторов, увеличивающих погрешность определения местоположения объекта навигационной системой, является прохождение сигнала от спутника к приемнику через ионосферу, имеющую свои неоднородности структуры, зависящие в том числе от геофизической обстановки. Навигационный приемник определяет местоположение объекта путем решения навигационной задачи с использованием так называемых псевдодалей от точки приема сигнала до навигационных спутников. В работе [9], посвященной прогнозированию шумовой погрешности измерения псевдодалей в условиях возмущений F-слоя ионосферы, сделан вывод о том, что при таких условиях шумовая погрешность может возрасти до 1000 раз по сравнению с условиями спокойной ионосферы. Результаты исследования влияния ионосферы на определение псевдодалей в полярных районах приведены в работе [10]. Эксперимент проводился при спокойной геомагнитной обстановке в условиях полярной ночи и позволил определить степень влияния ионосферы на распространение сигнала от навигационного спутника. Исследованию влияния состояния ионосферы на точность определения местоположения объекта посвящена также работа [11]. Для полярных районов был предложен аппаратно-программный комплекс, позволяющий исследовать особенности GPS-позиционирования в морской арктической зоне [12].

При решении задач спутникового позиционирования наиболее важны данные по полному электронному содержанию ионосферы вдоль траектории распространения сигнала. В работе [13] приведен краткий обзор методов учета состояния ионосферы в спутниковых системах позиционирования.

После длительной апробации в качестве стандартной справочной модели ионосферы в системе GPS была принята модель Клобучара [14], позволявшая осуществлять коррекцию параметров сигналов спутников с учетом ионосферной задержки. Как указано в работе<sup>2</sup>, погрешность определения координат с использованием такой модели ионосферы может составлять порядка 10 метров для случая двухчастотных приемников

---

<sup>2</sup> Global Positioning System. Standard Positioning Service Performance Standard. U.S. Department of Defense, October, 2008. 160 p. URL: <http://www.gps.gov/technical/ps/2008-SPS-performance-standard.pdf>.

и спокойных гелиогеомагнитных условий. В современных научных исследованиях международным стандартом *defacto* является эмпирическая модель ионосферы IRI (International Reference Ionosphere). В России в настоящее время действуют следующие стандарты для ионосферы Земли: ГОСТ 25645.146–89 "Ионосфера Земли. Модель глобального распределения концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов", ГОСТ Р 25645.158–94 "Ионосфера Земли верхняя. Модель распределения концентрации электронов в плоскости геомагнитного экватора" и ГОСТ Р 25645.157–94 "Ионосфера Земли нижняя. Модель глобального распределения концентрации и эффективной частоты соударений электронов для прогнозирования низкочастотных радиополей".

#### *Возможности использования математических моделей для учета влияния ионосферы*

Обеспечение улучшения точности определения местоположения объекта с помощью глобальных спутниковых систем навигации достигается путем уменьшения влияющих на нее погрешностей различного рода. Установка дополнительных станций слежения и ввод в действие большего числа спутников сопряжены со значительными финансовыми затратами. В то же время более точного описания среды распространения спутникового навигационного сигнала для уменьшения соответствующей погрешности можно достичь посредством использования глобальных моделей ионосферы, воспроизводящих неоднородности ее структуры при различных гелиогеофизических условиях.

Эмпирические (статистические) модели ионосферы, примером которых являются модель Клубочара и модель IRI, строятся посредством усреднения большого количества данных наблюдений и представляют собой описание физико-химических характеристик среды и их изменений в виде таблиц предварительно обработанных данных наблюдений или формул (разложений и их коэффициентов), аппроксимирующих ряды проведенных измерений. Такой вид моделей может адекватно описывать поведение параметров в тех областях, по которым есть достаточное количество результатов наблюдений, но из-за процедуры усреднения эти модели не могут детально воспроизводить поведение ионосферы при нестандартных условиях, например, во время геомагнитных бурь и суббурь.

Математическим или теоретическим принято называть моделирование, основанное на решении уравнений, описывающих протекающие в ионосфере физические и химические процессы. Математические модели ионосферы впервые были созданы около 50 лет назад и с того времени непрерывно развивались.

В настоящее время одной из наиболее развитых трехмерных математических моделей является глобальная численная самосогласованная модель верхней атмосферы Земли (UAM – Upper Atmosphere Model) [15], в рамках которой решаются физические уравнения, описывающие поведение физических параметров околоземной среды, включая нижнюю и верхнюю ионосферу.

Трудности при работе с такой теоретической моделью обусловлены в первую очередь тем, что решаемая система является нелинейной и содержит уравнения разных типов, которые сильно связаны между собой. Однако для условий геомагнитных возмущений и для высоких широт численная модель UAM более адекватно с физической точки зрения описывают среду, в то время как эмпирические модели не воспроизводят наблюдающиеся вариации ионосферы [16–18].

Перспективным представляется использование модели UAM для корректировки параметров модели ионосферы, используемых системами позиционирования. Модель учитывает положение овала высыпаний, потоки высыпавшихся частиц, а также характеристики продольных токов, что особенно важно для высокоширотных областей.

#### **Заключение**

В настоящей работе показано, что современное развитие транспортной инфраструктуры направлено на увеличение ее связи с глобальными навигационными спутниковыми системами. Эта тенденция обусловлена как новациями в сфере правового регулирования в РФ, так и нуждами потребителей (для решения задач логистики, оперативного контроля местоположения и перемещения транспортных средств, построения систем сигнализации и оповещения и т. п.). Все указанные задачи требуют определения координат потребителя с заданной точностью. Из представленного в работе обзора следует, что используемые при определении координат приемника стандартные методики рассчитаны на применение в спокойных гелиогеомагнитных условиях. Для возмущенных периодов, а также особых регионов (например приполярных областей) погрешности определения координат могут увеличиваться на порядки. Для корректного определения координат в возмущенные периоды авторы предлагают использовать для вычисления ионосферной задержки спутниковых сигналов параметры электронной концентрации, полученные с использованием самосогласованных моделей ионосферы.

#### **Библиографический список**

1. Марков Д. А. Применение ГЛОНАСС в дорожном секторе // Т-Com: Телекоммуникации и транспорт. 2012. Спецвыпуск. С. 42–45.
2. Емельянова В. Г. Некоторые вопросы применения системы ГЛОНАСС для обеспечения безопасности дорожного движения // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 3. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=9298>.

3. Попова Е. А., Попова И. М. Роль информационной системы "ЭРА-ГЛОНАСС" в обеспечении безопасности дорожного движения // *Современные наукоемкие технологии*. 2014. № 5, Ч. 2. С. 14–16.
4. Хасанов Е. Р., Зеленков П. В. Контроль водителей с применением ГЛОНАСС и GPS технологий // *Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения*. 2015. № 3 (16). С. 69–71.
5. Исмаилов А. Р., Ефименко Д. Б., Богумил В. Н. Использование сигналов навигационных систем (ГЛОНАСС/GPS) для учета времени труда и отдыха водителя // *Вестник МАДИ*. 2014. № 1 (36). С. 81–86.
6. Неволина А. Д., Самуйлов В. М. Значение спутниковой навигации (ГЛОНАСС) в перевозке железнодорожных грузов // *Современные проблемы транспортного комплекса России*. 2013. № 4. С. 44–49.
7. Матвеев С. И. Интеллектуальная навигация: ГЛОНАСС и координатные модели // *Мир транспорта*. 2013. № 4. С. 20–27.
8. Соляков О. В. Спутниковая навигация и управление движением речных судов: концептуальные подходы // *Мир транспорта*. 2015. Т. 13, № 6. С. 172–179.
9. Пашинцев В. П. Прогнозирование шумовой погрешности измерения псевдодальности в спутниковых радионавигационных системах при возмущениях ионосферы в слое F // *Системы обработки информации*. 2007. Вып. 8 (66). С. 2–7.
10. Древин К. А., Владимиров В. М., Стрекалева Т. В. Исследование влияния ионосферы на определение псевдодальности НКА СРНС в полярных районах с использованием НАП ГЛОНАСС/GPS // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2015. Т. 2. С. 1006–1007.
11. Мартынова Л. А. Исследование влияния состояния ионосферы на точность определения местоположения // *Космос и информатика*. 2013. № 2. С. 4–7.
12. Аппаратурно-программный комплекс для исследования особенностей GPS позиционирования при плавании в бассейне Арктики / А. Н. Калитенков, Н. В. Калитенков, В. И. Милкин, А. В. Гурин, С. А. Черноус // *Вестник МГТУ*. 2010. Т. 13, № 3. С. 621–624.
13. Галкин Ю. С., Татевян Р. А. Состояние и направления исследования влияния ионосферы на GPS-измерения // *Мир измерений*. 2013. № 5. С. 20–25.
14. Klobuchar J. A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users // *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*. 1987. V. 23 (3). P. 325–331.
15. High-latitude version of the global numerical model of the Earth's upper atmosphere / A. A. Namgaladze, O. V. Martynenko, M. A. Volkov, A. N. Namgaladze, R. Yu. Yurik // *Proceedings of the MSTU*. 1998. V. 1, N 2. P. 23–84.
16. Modelling of the ionosphere/thermosphere behaviour during the April 2002 magnetic storms: A comparison of the UAM results with the ISR and NRLMSISE-00 data / A. A. Namgaladze, Yu. V. Zubova, A. N. Namgaladze, O. V. Martynenko, E. N. Doronina, L. P. Goncharenko, A. Van Eyken, V. Howells, J. P. Thayer, V. I. Taran, B. Shpynev, Q. Zhou // *Adv. in Space Research*. 2006. V. 37, Iss. 2. P. 380–391.
17. Numerical modeling of the thermosphere, ionosphere and plasmasphere behavior during the April 2002 magnetic storms / A. A. Namgaladze, A. N. Namgaladze, O. V. Martynenko, E. N. Doronina, M. A. Knyazeva, Yu. V. Zubova // *Physics of Auroral Phenomena : Proceedings of the 26th Annual Seminar*. 2003. P. 74–78.
18. Ботова М. Г., Романовская Ю. В., Намгаладзе А. А. Вариации ионосферы: сопоставление результатов моделирования с данными наблюдений // *Вестник МГТУ*. 2014. Т. 17, № 2. С. 385–393.

## References

1. Markov D. A. Primeneniye GLONASS v dorozhnom sektore [GLONASS application in transport sector] // *T-Comm: Telekommunikatsii i transport*. 2012. Spetsvypusk. P. 42–45.
2. Emel'yanova V. G. Nekotorye voprosy primeneniya sistemy GLONASS dlya obespecheniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya [Some aspects of GLONASS system application for traffic safety] // *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2013. N 3. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=9298>.
3. Popova E. A., Popova I. M. Rol informatsionnoy sistemy "ERA-GLONASS" v obespechenii bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya [Role of GLONASS information system in traffic safety] // *Sovremennye naukoemkie tehnologii*. 2014. N 5, Ch. 2. P. 14–16.
4. Hasanov E. R., Zelenkov P. V. Kontrol voditeley s primeneniem GLONASS i GPS tehnologiy [Control of drivers with application of GLONASS and GPS technologies] // *Sovremennaya nauka: aktualnye problemy i puti ih resheniya*. 2015. N 3 (16). P. 69–71.
5. Ismailov A. R., Efimenko D. B., Bogumil V. N. Ispolzovanie signalov navigatsionnyh sistem (GLONASS/GPS) dlya ucheta vremeni truda i otdyha voditelya [Using signals of navigation systems (GLONASS/GPS) for registration of driver time of work and rest] // *Vestnik MADI*. 2014. N 1 (36). P. 81–86.
6. Nevolina A. D., Samuylov V. M. Znachenie sputnikovoy navigatsii (GLONASS) v perezovke zheleznodorozhnyh грузов [Importance of satellite navigation (GLONASS) for carriage rail cargo] // *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii*. 2013. N 4. P. 44–49.
7. Matveev S. I. Intellekturnaya navigatsiya: GLONASS i koordinatnye modeli [Intelligent navigation: GLONASS and coordinate models] // *Mir transporta*. 2013. N 4. P. 20–27.



8. Solyakov O. V. Sputnikovaya navigatsiya i upravlenie dvizheniem rechnyh sudov: kontseptualnye podhody [Satellite navigation and riverboats' shipping control: Conceptual approaches] // Mir transporta. 2015. V. 13, N 6. P. 172–179.

9. Pashintsev V. P. Prognozirovaniye shumovoy pogreshnosti izmereniya psevdodalnosti v sputnikovyyh radionavigatsionnykh sistemakh pri vozmuscheniyah ionosfery v sloe F [Prediction of noise error measurement in the pseudorange of satellite navigation systems during disturbances of the ionosphere in the F-layer] // Sistemy obrabotki informatsii. 2007. Vyp. 8 (66). P. 2–7.

10. Drevin K. A., Vladimirov V. M., Strekaleva T. V. Issledovanie vliyaniya ionosfery na opredelenie psevdodalnosti NKA SRNS v polyarnykh rayonakh s ispolzovaniem NAP GLONASS/GPS [Research of influence of the ionosphere on determining the pseudorange of navigation spacecraft SRNS in the polar regions using NEU GLONASS/GPS] // Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики. 2015. V. 2. P. 1006–1007.

11. Martynova L. A. Issledovanie vliyaniya sostoyaniya ionosfery na tochnost opredeleniya mestopolozheniya [Research of influence of the ionosphere state on the accuracy of location determination] // Kosmos i informatika. 2013. N 2. P. 4–7.

12. Apparaturno-programmnyi kompleks dlya issledovaniya osobennostey GPS pozitsionirovaniya pri plavanii v bassejne Arktiki [Equipment complex for researches of GPS positioning peculiarities at navigating in Arctic] / A. N. Kalitenkov, N. V. Kalitenkov, V. I. Milkin, A. V. Gurin, S. A. Chernous // Vestnik MGTU. 2010. V. 13, N 3. P. 621–624.

13. Galkin Yu. S., Tatevyan R. A. Sostoyanie i napravleniya issledovaniya vliyaniya ionosfery na GPS-izmereniya [State and trends in investigating ionospheric impact on GPS-measurements] // Mir izmereniy. 2013. N 5. P. 20–25.

14. Klobuchar J. A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users // IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems. 1987. V. 23 (3). P. 325–331.

15. High-latitude version of the global numerical model of the Earth's upper atmosphere / A. A. Namgaladze, O. V. Martynenko, M. A. Volkov, A. N. Namgaladze, R. Yu. Yurik // Proceedings of the MSTU. 1998. V. 1, N 2. P. 23–84.

16. Modelling of the ionosphere/thermosphere behaviour during the April 2002 magnetic storms: A comparison of the UAM results with the ISR and NRLMSISE-00 data / A. A. Namgaladze, Yu. V. Zubova, A. N. Namgaladze, O. V. Martynenko, E. N. Doronina, L. P. Goncharenko, A. Van Eyken, V. Howells, J. P. Thayer, V. I. Taran, B. Shpynev, Q. Zhou // Adv. in Space Research. 2006. V. 37, Iss. 2. P. 380–391.

17. Numerical modeling of the thermosphere, ionosphere and plasmasphere behavior during the April 2002 magnetic storms / A. A. Namgaladze, A. N. Namgaladze, O. V. Martynenko, E. N. Doronina, M. A. Knyazeva, Yu. V. Zubova // Physics of Auroral Phenomena : Proceedings of the 26th Annual Seminar. 2003. P. 74–78.

18. Botova M. G., Romanovskaya Yu. V., Namgaladze A. A. Variatsii ionosfery: sopostavlenie rezultatov modelirovaniya s dannymi nablyudeniy [Ionosphere variations: Comparison of model calculations and observation data] // Vestnik MGTU. 2014. V. 17, N 2. P. 385–393.

#### Сведения об авторах

**Золотов Олег Владимирович** – ул. Садовая, 9, г. Мурманск, Россия, 183040; Мурманский филиал Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; e-mail: ZolotovO@gmail.com

**Zolotov O. V.** – 9, Sadovaya Str., Murmansk, Russia, 183040; Murmansk Branch of St. Petersburg University of SFS of EMERCOM of Russia, Cand. of Phys.-Math. Sci., Researcher; e-mail: ZolotovO@gmail.com

**Романовская Юлия Владимировна** – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, кафедра математики, информационных систем и программного обеспечения, канд. физ.-мат. наук, зав. кафедрой; e-mail: RomanovskayaYuV@mstu.edu.ru

**Romanovskaya Yu. V.** – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Department of Mathematics, Information Systems and Software, Cand. of Phys.-Math. Sci., Head of Department; e-mail: RomanovskayaYuV@mstu.edu.ru

O. V. Zolotov, Yu. V. Romanovskaya

## **Mathematical modeling of the Earth's upper atmosphere from the transport infrastructure point of view**

Nowadays the importance of satellite navigation systems is growing due to their ability to solve various problems in different areas of Russian economics and public sector. The GLONASS national system has been developed since 2001 according to the federal target programme. The paper demonstrates examples of GLONASS applications in different fields of Russian transport system including automobile, railway, and water transport. Any navigation system has its inaccuracies caused by a number of factors. The paper focuses on inaccuracies of detecting an object location related with signal propagation from a satellite through the ionosphere as a conductive medium. These inaccuracies increase in high latitudes because of inclination angle of the navigation satellite orbit and under specific geophysical conditions such as geomagnetic storms and substorms. Modern navigation systems use statistical models for ionospheric delay calculation. Such models are developed by averaging great value of measurement data and cannot provide high accuracy of object location detection under disturbed geophysical conditions and in high latitudes. By ionospheric delay calculations the coefficients of statistical ionospheric model can be corrected using a self-consistent mathematical ionospheric model. The authors suggest using the global numerical Upper Atmosphere Model (UAM). The UAM takes energetic particles precipitation and field-aligned currents in the auroral areas into account. The model reproduces ionospheric behavior in high latitudes under various geophysical conditions sufficiently.

**Key words:** global satellite navigation systems, positioning accuracy, pseudo-range, ionosphere, mathematical modeling.