

ГНСС-МЕТЕОРОЛОГИЯ: ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

Чимис Вячеславовна Хунай-оол

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г.Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры космической и физической геодезии, тел. (901)644-11-15, e-mail: hunaioolchimis@gmail.com

Елена Геннадьевна Гиенко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г.Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии, e-mail: elenagienko@yandex.ru

В статье рассмотрены возможности и перспективы развития ГНСС-метеорологии на основе отечественных и зарубежных исследований. Отмечено, что тропосферная задержка сигнала ГНСС является ценным источником информации о состоянии тропосферы. Дано описание алгоритма оценивания тропосферной задержки и служб, которые выполняют эту оценку (Международная ГНСС-служба IGS и онлайн-служба GAPS). Рассмотрено содержание выходного файла IGS с тропосферными задержками на пункте IGS. Перечислены необходимые условия для реализации ГНСС-метеорологии, приведены структурные схемы действующих систем ГНСС-метеорологии на территории США и Японии. Показано, что в России выполняются исследования в данной области. Сделан вывод, что сеть постоянно действующих базовых станций Новосибирской области имеет потенциал для развития ГНСС-метеорологии на покрываемой территории.

Ключевые слова: ГНСС-метеорология, тропосфера, тропосферная задержка сигнала ГНСС, международная служба ГНСС.

GNSS-METEOROLOGY: OPPORTUNITIES AND PROSPECTS FOR DEVELOPMENT IN RUSSIA AND ABROAD

Chimis V. Khunai-ool

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Graduate, Department of Space and Physical Geodesy, phone: (901)644-11-15, e-mail: hunaioolchimis@gmail.com

Elena G. Gienko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy, e-mail: elenagienko@yandex.ru

The article considers the possibilities and prospects for the development of GNSS meteorology based on domestic and foreign research. It is noted that the tropospheric delay of the GNSS signal is a valuable source of information about the state of the troposphere. The algorithm for estimating tropospheric delay and the services that perform this assessment (international GNSS service IGS and online service GAPS) are described. The content of the IGS output file with tropospheric delays at the IGS point is considered. The necessary conditions for the implementation of GNSS meteorology are listed, as well as structural diagrams of existing GNSS meteorology systems in the United States

and Japan. It is shown that research in this area is being carried out in Russia. It is concluded that the network of permanent base stations in the Novosibirsk Region has the potential for the development of GNSS meteorology in the covered area.

Key words: GNSS-meteorology, troposphere, tropospheric delay of the GNSS signal, international GNSS service.

Введение

Тропосферная рефракция является одним из источников ошибок ГНСС-измерений, и получение информации о состоянии тропосферы для её моделирования и учёта влияния является одной из важных задач в теории и практике ГНСС. Получение миллиметровой точности является основной задачей в проблеме оценивания тропосферных задержек сигналов ГНСС.

В задачах геодезии достаточно использовать стандартные модели тропосферы [1]. Для более точных работ оптимальным будет оценивать тропосферную задержку по сигналам ГНСС. Этот метод не требует дополнительного оборудования на станции наблюдений, что является его достоинством.

С другой стороны, сами ГНСС-измерения могут быть источником ценной информации о состоянии атмосферы. В 90-е годы XX века появился ряд исследований, показывающих, что с помощью ГНСС измерений можно успешно определять содержание паров воды в нейтральной атмосфере [2]. При этом точность совсем ненамного уступает результатам, достигаемым с помощью радиозондов и радиометров паров воды. Система ГНСС обеспечивает более качественное пространственное распределение измерений (вдоль луча распространения сигнала), чем другие методы, и измерения становятся ценным источником информации о количестве осаждаемых паров воды. Для этого метеорологи оценивают различные способы использования данных ГНСС в численных моделях прогноза погоды.

ГНСС-метеорология занимается предоставлением данных о погоде конечным потребителям, а также осуществляет оперативный мониторинг климатических изменений на планете.

Метод радиопросвечивания атмосферы сигналами навигационных спутников предполагает определение параметров состояния атмосферы по результатам измерения пространственных задержек радиосигналов, распространяющихся через слой атмосферы от спутника к наземному приёмнику, вследствие уменьшения фазовой скорости радиоволн за счёт эффектов поляризации молекул азота, кислорода, углекислого газа и водяного пара. В качестве источников радиосигналов используются навигационные сигналы космических аппаратов ГНСС. Использование информации сети наземных приёмных ГНСС-станций позволяет определять задержки радиосигналов с более высокой точностью за счёт использования групповой обработки результатов фазовых измерений псевдодальности до спутников [3].

Определение тропосферных задержек сигналов ГНСС

В основе ГНСС-метеорологии лежит формула фазовой псевдодальности [4]:

$$\Phi_A^i(t) = \left\| r^i(t, t - \tau_A^i + \delta r^i(t, t - \tau_A^i)) - R_A(t) + \delta R_A(t) \right\| + I_A^i + T_A^i + \delta m_A^i + c[dt_A(t) - dt^i(t - \tau_A^i)] + c[\delta_A(t) + \delta^i(t - \tau_A^i)] + \lambda[\phi_A(t_0) - \phi^i(t_0)] + \lambda N_A^i + \varepsilon_A^i, \quad (1)$$

где $r^i(t, t - \tau_A^i)$ – геометрическое расстояние;

$c[dt_A(t) - dt^i(t - \tau_A^i)]$ – вклад поправок часов в измеренное расстояние;

T_A^i – тропосферная задержка;

I_A^i – ионосферная задержка;

δm_A^i – ошибка многопутности фазы;

$c[\delta_A(t) + \delta^i(t - \tau_A^i)]$ – запаздывание в оборудовании для фазы несущей;

$\lambda[\phi_A(t_0) - \phi^i(t_0)]$ – смещение, полученное по отличным от нуля начальным фа-

зам генерированных сигналов спутника и приемника;

λN_A^i – член неоднозначности фазы несущей;

ε_A^i – погрешность измерения.

В этой формуле тропосферная задержка T_A^i является одной из определяемых величин. Алгоритм оценивания тропосферной задержки приведен в [5]. Из обработки совокупности ГНСС-измерений вычисляется зенитная тропосферная задержка над пунктом наблюдения T_A^Z .

Зенитные тропосферные задержки – один из продуктов Международной ГНСС-службы IGS (International GNSS Service), на ее сайте публикуются файлы с зенитными тропосферными задержками на пунктах IGS [6]. Информация о тропосфере, предоставляемая службой IGS, дается в табличном виде для суточного сеанса, с интервалом 5 минут. Графики, построенные по данным IGS, отобразят изменение величины тропосферной задержки в течение суток. На каждые сутки файлы с зенитной тропосферной задержкой содержат следующее: заголовок, момент времени в секундах с интервалом 300 секунд, тропосферные задержки, тропосферные градиенты на север и восток и их стандартные отклонения, эллипсоидальные и прямоугольные координаты пункта, данные о приёмнике и антенне, время начала и конца сеанса измерений.

Зенитные тропосферные задержки определяются также при реализации метода точного точечного позиционирования (Precise Point Positioning, PPP), где вместе с координатами пункта вычисляется тропосферная поправка. Существуют несколько служб онлайн-обработки ГНСС-измерений, реализующих метод PPP, в том числе, свободная онлайн-обработка в ПО GAPS университета Нью-Брунсуик (Канада) [7]. Результаты обработки ГНСС-измерений методом PPP в ПО GAPS содержатся в архиве, включающем несколько файлов. В этих файлах – общая информация о пункте, вариант обработки, информация об оборудовании, нейтральной атмосфере, априорные значения координат, окончатель-

RTnet предоставляет оценки зенитной тропосферной задержки (ЗТЗ) в реальном времени, или почти в реальном времени и в пост-обработке. Уникальная особенность оценки RTnet заключается в том, что решения доступны через несколько секунд после получения данных в реальном времени. Выпадающий водяной пар, преобразованный из ЗТЗ (на основе данных о поверхностном давлении и температуре), может использоваться для метеорологического применения с необходимыми данными с коротким временем ожидания.

Схема реализации ГНСС-метеорологии в США представлена на рис. 2.

Подобные перспективные исследования ведутся в Болгарии [9], и других странах.

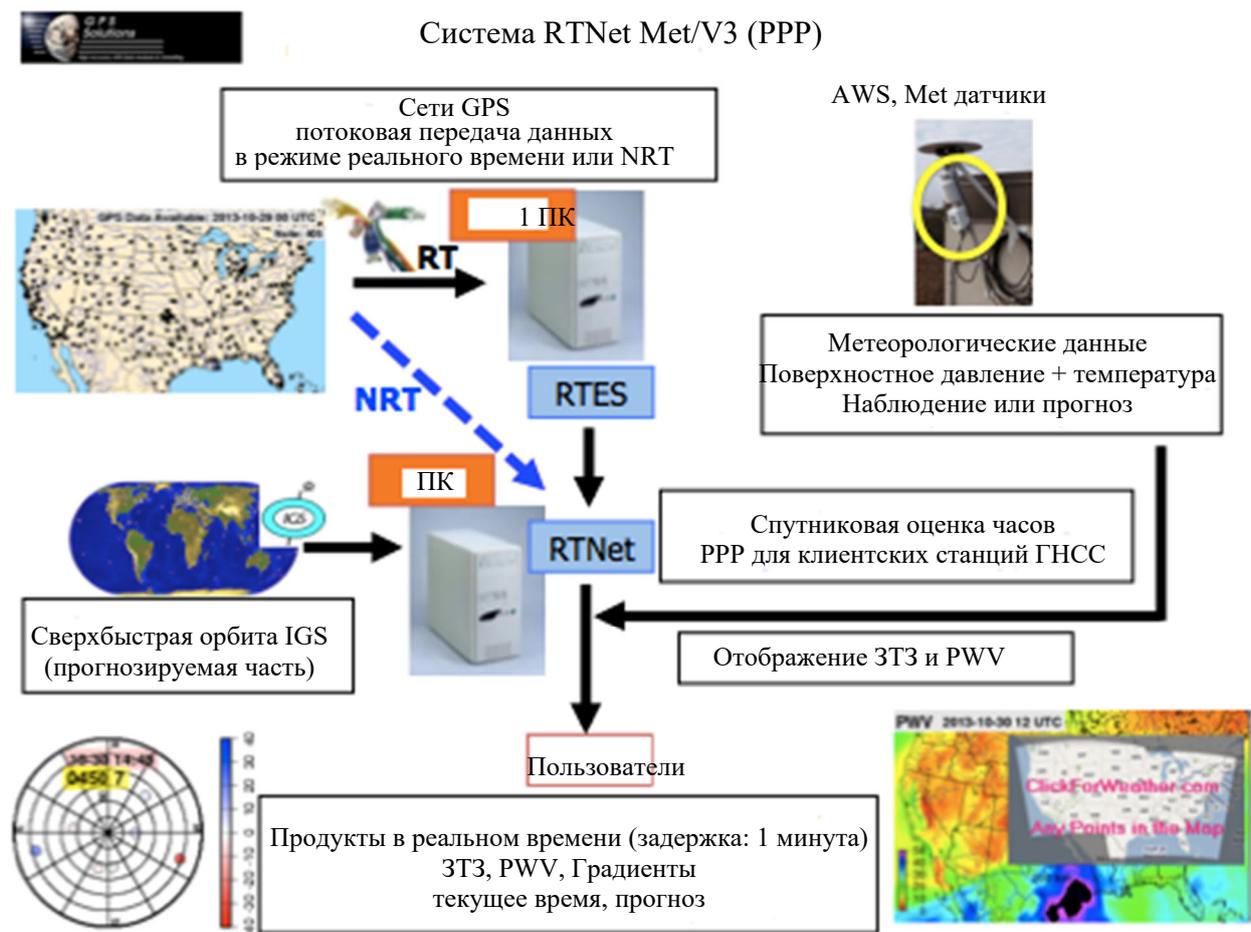


Рис. 2. Служба непрерывной обработки RTNet Met System, https://www.gps-solutions.com/gnss_meteorology

В России аналогичные исследования проводятся на базе Казанского государственного университета (сеть из семи приёмников GPS/ГЛОНАСС, пространственно разнесённых на расстояния от 1 до 35 км). В работе [10] показано, что рефрактометрический метод и кодово-фазовые радиоизмерения сигналов ГНСС, проведённые сетью приёмников, позволяют исследовать вертикальную и горизонтальную структуру тропосферы.

В статье [11] представлены результаты мониторинга содержания водяного пара в атмосфере по ГНСС-измерениям (эксперименты Российского государственного гидрометеорологического университета).

В [12] показано, что на территории Новосибирской области возможно изучать состояние тропосферы по данным ГНСС-измерений на пунктах сети постоянно действующих станций (ПДБС). В настоящее время на территории Новосибирской области установлена 31 ПДБС, территория покрытия активного координатного пространства составляет 85 %. Пункты сети и управляющий центр формируют высокоточную геодезическую сеть, которая позволяет выполнять широкий комплекс геодезических работ с высокой степенью надежности и точности, в том числе, и в режиме реального времени [13, 14]. Кроме того, пункты сети оборудованы автоматическими метеостанциями, предоставляющими ценную информацию. Положительными факторами для развития ГНСС-метеорологии на основе ПДБС НСО являются большая территория однородного покрытия сети и расположение на равнине с небольшим перепадом высот, когда изменение тропосферной задержки ГНСС-сигнала более зависит от метеофакторов, чем от высоты тропосферы. Таким образом, сеть ПДБС Новосибирской области имеет потенциал для создания на ее основе службы для ГНСС-метеорологии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Саастомойнен Ю. Тропосферная и стратосферная поправки радиослежения ИСЗ // Использование искусственных спутников в геодезии. 1975. С. 349-356.
2. Антонович К.М. Обзор современных методов получения метеорологической информации для использования в ГНСС-технологиях // Текст научной статьи по специальности «Науки о Земле и смежные экологические науки». 2006. С. 1-6.
3. Заболоцкий Ф.Д. Методологические этапы ГНСС-метеорологии // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 2014. N 79. С. 15-20.
4. Антонович К.М. Космическая навигация: учеб. пособие. Новосибирск: СГУГиТ, 2015. 233 с.
5. Калинин В.В., Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Использование сигналов спутниковых навигационных систем для определения характеристик тропосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т.48. N 6. С. 705-713.
6. Официальный сайт IGS Products [Электронный ресурс] // [сайт]. URL: <http://www.igs.org/products>.
7. Официальный сайт GAPS [Электронный ресурс] // [сайт]. URL: <http://gaps.gge.unb.ca/>.
8. Официальный сайт GNSS-Meteorology [Электронный ресурс] // [сайт]. URL: https://www.gps-solutions.com/gnss_meteorology.
9. Hackman C., Guerova G., Byram Sh., Dousa J., Hugentobler U. International GNSS Service (IGS) Troposphere Products and Working Group Activities // FIG Working Week. 2015. URL: http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2015/techprog.htm.
10. Низамеев А.Р., Нефедьев Е.С., Низамеев И.Р., Тептин Г.М. Трехмерная структура индекса рефракции радиоволн в тропосфере по измерениям сети приемных станций GPS-ГЛОНАСС//Вестник Казанского технологического университета. 2012. – С. 27-31.
11. Чукин В.В., Алдошкина Е.С., Вахнин А.В., Канухина А.Ю., Мельникова О.А. Мониторинг интегрального содержания водяного пара в атмосфере ГНСС-сигналами // Учёные записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2010. N 12. С. 50-59.

12. Karpik A.P., Gienko E.G., Ganagina I.G., Goldobin D.N. Network of continuously operating reference stations in Novosibirsk region: analysis of zenith tropospheric delay estimate // Proceedings of SPIE (The International Society for Optical Engineering. 2019. URL: <http://spiedl.org/>.

13. Карпик А.П., Сапожников Г.А., Дюбанов А.В. Реализация проекта наземной инфраструктуры глобальной навигационной спутниковой системы «ГЛОНАСС» на территории Новосибирской области // Гео-Сибирь. 2010. N S. С. 54-49.

14. Официальный сайт Сеть АБС ГЛОНАСС/GPS на территории НСО [Электронный ресурс] // [сайт]. URL: <http://glonass-nso.ru/>.

© Ч. В. Хунай-оол, Е. Г. Гиенко, 2020