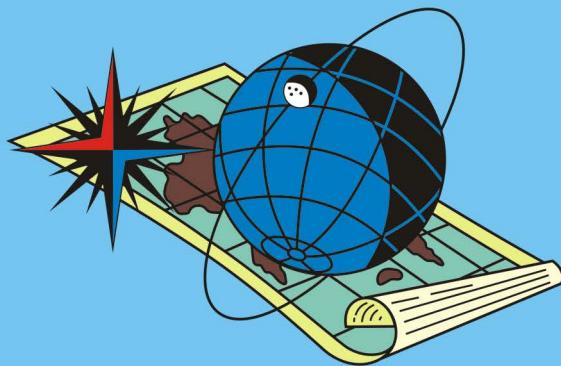


ISSN 2220-0983

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

№ 2 (75)
Июнь 2024

НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ



Санкт-Петербург

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

№ 2 (75)

Июнь 2024

Издаётся с 1995 года

Санкт-Петербург

**Главный редактор
к. т. н. В. М. Смолин**

Редакционная коллегия:

к. т. н. А. А. Якушев (заместитель главного редактора);
д. т. н. П. И. Малеев (научный редактор); к. г.-м. н. И. Ю. Бугрова (редактор);
к. в. н. В. Ю. Бахмутов (ответственный за выпуск);
д. т. н., профессор Э. С. Зубченко; д. в. н., проф. А. И. Исмаилов;
д. в. н., проф. В. А. Катенин; д. т. н. С. И. Мастрюков;
акад. РАН В. Г. Пешехонов; д. т. н., профессор К. Г. Ставров;
д. т. н. А. М. Шарков; д. ф.-м. н., профессор Г. Г. Щукин

Журнал «Навигация и гидрография» включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук»

Электронная версия журнала размещена на сайте www.gningi.ru

**© Акционерное общество
«Государственный научно-исследовательский
навигационно-гидрографический институт»
2024**

**THE STATE RESEARCH NAVIGATION-HYDROGRAPHIC
INSTITUTE**

NAVIGATION AND HYDROGRAPHY

No 2 (75) June 2024

Published since 1995

Saint-Petersburg

**Editor-in-chief
V. Smolin, CandSc**

Editorial board

- A. Yakushev, CandSc (deputy editor-in-chief); P. Maleyev, DSc (science editor);
I. Bugrova (editor), CandSc; V. Bakhmutov (the issue manager), CandSc;
E. Zubchenko, DSc, professor; A. Ismailov, DSc, professor;
V. Katenin, DSc, professor; S. Mastryukov, DSc;
V. Peshekhonov, DSc, Acad. RAS; K. Stavrov, DSc, professor;
A. Sharkov, DSc; G. Shchukin, DSc, professor

**© Joint Stock Company
«The State Research Navigation-Hydrographic Institute»**

2024

СОДЕРЖАНИЕ

НАВИГАЦИЯ

Модель формирования высокоточных измерений координат воздушных объектов наземными радионавигационными системами длинноволнового и средневолнового диапазонов на основе детального описания электрических параметров трасс распространения сигналов.	А. П. Алешкин, К. В. Бакурский, Т. О. Мысливцев, Р. Г. Никитин, С. В. Никифоров	7
---	---	---

Графоаналитический метод оценки погрешностей фазовых измерений в системе ГЛОНАСС с частотным разделением сигналов и разрешение их неоднозначности.	В. С. Бахолдин, Д. А. Леконцев.....	22
--	-------------------------------------	----

Математическая модель навигационного радиосигнала в различных базисах.	С. А. Луценко.....	34
--	--------------------	----

Исследование возможности размещения космической станции, функционирующей на супервысокоэллиптической орбите.	А. Н. Малетин, Т. В. Данилова	43
--	-------------------------------------	----

Расчет угла дрейфа корабля от ветра с помощью универсальной формулы, полученной с использованием трехфакторной линейной регрессии.	С. А. Ярошенко, Г. А. Французов.....	55
--	--------------------------------------	----

ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ

Концепция создания и развития морской подсистемы глобальной системы мониторинга геодезических параметров Земли.	В. А. Катенин, А. А. Чубыкин, А. К. Ойстрик	61
---	---	----

Проблемы высокоточного координирования гидрографических и других морских работ в акватории Северного морского пути в условиях санкционных ограничений и пути их решения. Часть III. Результаты тестирования PPP-сервиса высокоточного определения координат компании АО «ГЛОНАСС» с использованием отечественной мультисистемной навигационной аппаратуры.	В. М. Смолин, С. В. Решетняк, Д. Ф. Миляков, О. Л. Онищенко	76
--	---	----

Сравнительный анализ эффективности отечественной глобальной системы мониторинга геодезических параметров Земли с аналогичной международной глобальной системой геодезических наблюдений.	В. А. Катенин, А. А. Чубыкин	109
--	------------------------------------	-----

Нейросетевой алгоритм обнаружения аномалий на гидролокационных изображениях.	Н. А. Алексеев, С. Э. Юсупов, М. А. Короткий, И. А. Павелкин	124
--	--	-----

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

Синоптические условия образования метелей в Баренцевом море.	И. В. Лаврова, М. Д. Косовер, И. А. Иванова, Ю. В. Ефимова.....	139
--	---	-----

CONTENTS

NAVIGATION

Model for Forming High-Precision Measurements of the Coordinates of Airborne Objects by Ground-Based Radionavigation Systems in the Long-Wave and Medium-Wave Ranges Based on a Detailed Description of the Electrical Parameters of the Signal Propagation Paths.	A. P. Aleshkin, K. V. Bakursky, T. O. Myslivtsev, R. G. Nikitin, S. V. Nikiforov	7
Graph-Analytical Method for Assessing Phase Measurement Errors in the GLONASS System with Frequency Division of Signals and Resolving their Ambiguities.	V. S. Bakholdin, D. A. Lekontsev.....	22
Mathematical Model of Navigation Radio Signal in Various Bases.	S. A. Lutsenko.....	34
Study of the Possibility of Positioning a Space Station Operating in a Super-High-Elliptical Orbit Between the Earth and the Moon.	A. N. Maletin, T. V. Danilova.....	43
Calculation of the Ship's Drift Angle from the Wind Using a Universal Formula Obtained Using Three-Factor Linear Regression.	S. A. Yaroshenko, G. A. Frantsuzov.....	55

HYDROGRAPHY AND MARINE CARTOGRAPHY

Concept of the Creation and Development of the Maritime Subsystem of the Global System for Monitoring Geodetic Parameters of the Earth.	V. A. Katenin, A. A. Chubykin, A. K. Oystrik	61
Problems of High-Precision Coordination of Hydrographic and Other Marine Operations in the Waters of the Northern Sea Route Under Sanction Restrictions and Solutions. Part III. Test Results of the PPP Service for High-Precision Positioning by JSC "GLONASS" Using Domestic Multi-System Navigation Equipment.	V. M. Smolin, S. V. Reshetnyak, D. F. Milyakov, O. L. Onishchenko	76
Comparative Analysis of the Effectiveness of the Domestic Global System for Monitoring Geodetic Parameters of the Earth with a Similar International Global Geodetic Observing System.	V. A. Katenin, A. A. Chubykin	109
Neural Network Algorithm for Anomaly Detection in Sonar Images.	N. A. Alekseev, S. E. Yusupov, M. A. Korotkiy, I. A. Pavelkin	124

HYDROMETEOROLOGY

Synoptic Conditions for the Formation of Snowstorms in the Barents Sea.	I. V. Lavrova, M. D. Kosover, I. A. Ivanova, Yu. V. Efimova.....	139
--	--	-----

НАВИГАЦИЯ

УДК 629.052.3

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КООРДИНАТ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНЫМИ РАДИОНАВИГАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ ДЛИННОВОЛНОВОГО И СРЕДНЕВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНОВ НА ОСНОВЕ ДЕТАЛЬНОГО ОПИСАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРАСС РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ

Алешкин А. П., Бакурский К. В., Мысливцев Т. О., Никитин Р. Г., Никифоров С. В.

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

Аннотация. Предметом исследования является оценка точностных характеристик разностно-дальномерных радионавигационных систем длинноволнового и средневолнового диапазонов, а также влияния среды распространения и подстилающей поверхности на точность местоопределения. Метод повышения точности местоопределения основан на учете влияния трассы распространения на параметры радиосигналов. Новизна метода состоит в том, что учитываются реальные параметры трассы распространения радиосигналов непосредственно между передающей радионавигационной станцией и приемной аппаратурой потребителя, что не реализовано в существующих радионавигационных системах в полной мере. Оценка параметров радиосигнала производиться с помощью ряда Фока и рекуррентного соотношения Фейнберга для многокусочных трасс. Основными результатами исследований является модель формирования высокоточных измерений координат воздушных объектов на основе учета параметров трасс распространения радиосигналов в Арктическом регионе. Приведен пример расчета положения летательного аппарата в районе Карского моря при использовании радионавигационных станций средневолнового диапазона. Практическая значимость заключается в уменьшении погрешности местоопределения воздушного потребителя. В рассмотренном примере точность определения координат увеличена в десятки раз. Результаты могут быть интересны специалистам в области эксплуатации и разработки наземных радионавигационных систем.

Ключевые слова: радионавигационные системы, геометрический фактор, дополнительная фаза, поверхностная волна, напряженность электрического поля, определение координат.

Для цитирования: Алешкин А. П., Бакурский К. В., Мысливцев Т. О., Никитин Р. Г., Никифоров С. В. Модель формирования высокоточных измерений координат воздушных объектов наземными радионавигационными системами длинноволнового и средневолнового диапазонов на основе детального описания электрических параметров трасс распространения сигналов // Навигация и гидрография. – 2024. – № 2 (75). – С. 7–21.

MODEL FOR FORMING HIGH-PRECISION MEASUREMENTS OF THE COORDINATES OF AIRBORNE OBJECTS BY GROUND-BASED RADIONAVIGATION SYSTEMS IN THE LONG-WAVE AND MEDIUM-WAVE RANGES BASED ON A DETAILED DESCRIPTION OF THE ELECTRICAL PARAMETERS OF THE SIGNAL PROPAGATION PATHS

Aleshkin A. P., Bakursky K. V., Myslivtsev T. O., Nikitin R. G., Nikiforov S. V.

Military space Academy named after A. F. Mozhaisky, St. Petersburg.

Summary. The subject of the study is the evaluation of the accuracy characteristics of the difference-rangefinder radio navigation systems of the low-frequency and mid-frequency ranges and the influence of the propagation medium and the underlying surface on the accuracy of location. The method of increasing the accuracy of the location is based on taking into account the influence of the propagation path on the parameters of radio signals. The novelty of the method is that the real parameters of the radio signal propagation path are taken into account, directly between the transmitting radio navigation station and the consumer's receiving equipment, which is not fully implemented in existing radio navigation systems. The radio signal parameters are estimated using the Fock series and the Feinberg recurrence relation for multi-piece routes. The main results are a model for the formation of high-precision measurements of the coordinates of aerial objects based on taking into account the parameters of radio signal propagation routes in the Arctic region. An example of calculating the position of an aircraft in the Kara Sea area using radio navigation stations of the medium-wave range is given. The practical significance lies in reducing the error of determining coordinates. In the example considered, the accuracy of determining coordinates is increased tenfold. The results may be of interest to specialists in the field of operation and development of ground-based radio navigation systems.

Keywords: Radio navigation systems, geometric factor, additional phase, surface wave, electric field strength, coordinate determination.

For citation: Aleshkin A. P., Bakursky K. V., Myslivtsev T. O., Nikitin R. G., Nikiforov S. V. Model for Forming High-Precision Measurements of the Coordinates of Airborne Objects by Ground-Based Radionavigation Systems in the Long-Wave and Medium-Wave Ranges Based on a Detailed Description of the Electrical Parameters of the Signal Propagation Paths // Navigation and hydrography. – 2024. – No. 2 (75). – P. 7–21.

Введение

Интенсивное развитие высоких технологий практически во всех областях жизнедеятельности человека, а также наукоемких отраслей промышленности в настоящее время невозможно без использования глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Особую актуальность использование ГНСС приобрело в военной сфере, где вопросы повышенных требований к качеству координатно-временного и навигационного обеспечения являются определяющими.

Зависимость от систем спутниковой навигации стала всеобщей, что, естественно, породило и большое количество проблем. Для потребителей важно получать координатно-временную информацию непрерывно и без искажений, однако ГНСС не всегда может обеспечить выполнение этого требования [1, 2].

В настоящее время во многих сферах деятельности потребитель требует резервирования каналов получения координатно-временной информации, особенно это касается критически-важных объектов и систем. Ярким примером может служить организация навигационно-телеинформационной поддержки морской транспортной активности в Арктической зоне [3].

В связи с этим определяющим фактором является возможность дополнения или полного замещения ГНСС. При этом рассматриваются три основных варианта такого резервирования: на коротком временном интервале; глобально, на всем земном шаре; в локальных районах. Достаточно полный обзор перечисленных направлений дан в работе [1].

В данной статье кратко рассматривается вопрос оценки точностных характеристик, предоставляемых локальными радионавигационными системами с учетом геометрического фактора, обусловленного особенностями размещения

стационарных позиций в том или ином регионе и влияния подстилающей поверхности (ПП) на параметры радионавигационного сигнала. При формировании измерительной выборки используется модель движения летательного аппарата с размещенной на его борту аппаратурой потребителя радионавигационной системы (РНС) и высотомера.

Локальные РНС длинноволнового и средневолнового диапазонов

Использование длинноволнового диапазона (ДВ) (30–300 КГц) для нужд радионавигации обусловлено развитием технологий применения фазовых РНС «Чайка» и Loran-C, а также современной системы e-Loran (Enhanced Loran) [4, 2]. Для таких систем характерна высокая помехоустойчивость из-за использования мощных передающих систем. Использование ДВ диапазона позволяет определить местоположение потребителя в городской застройке, лесистой и горной местности, под поверхностью проникновения и пр. Особое значение приобретает возможность синхронизации по времени (до 50 нс), что делает такие системы источником системной временной шкалы в региональном масштабе. Что касается системы e-Loran, то заявленная точность определения координат 8–20 м на дальности более 1500 км и до высот 18 км делает ее источником координатно-временной информации, по своим свойствам сопоставимой с ГНСС.

Примером РНС средневолнового диапазона (СВ) (0,3–3 МГц) может служить перспективная система «Спрут-Н1», характеристики которой были заявлены в Плане развития радионавигации государств – участников СНГ на 2013–2017 годы. Это региональная разностно-дальномерная система с дальностью действия до 600 км, функционирующая в диапазоне частот 1,6–2,2 МГц и обеспечивающая точность позиционирования надводных объектов порядка 15–20 м.

В настоящее время используется РНС СВ диапазона «РС-10», которая является разностно-дальномерной системой с синхронизацией времени и фазы сигналов, излучаемых наземными передающими станциями. Средняя квадратическая погрешность измерений составляет 0,02–0,04 мкс (6–12 м) [5].

Необходимо отметить, что вопрос дополнения/замещения ГНСС региональными РНС является предметом исследования в каждом конкретном случае использования, однако на данном этапе необходима разработка и общих подходов к алгоритмам комплексирования.

Алгоритм определения координат ЛА в зоне действия региональной фазовой разностно-дальномерной системы

Определение координат осуществляется по точке пересечения линий положения потребителя (гипербол), образованных при измерении разности расстояний между двумя парами РНС и потребителем. Для вычисления координат потребителя необходимо решить систему уравнений [6]:

$$\begin{cases} r_A - r_B = \sqrt{(x + d_1)^2 + y^2} - \sqrt{(x - d_1)^2 + y^2} \\ r_A - r_C = \sqrt{(x + d_2)^2 + y^2} - \sqrt{(x - d_2)^2 + y^2}, \end{cases} \quad (1)$$

где r_A – расстояние от радионавигационной точки (РНТ) A (ведущей РНС) до потребителя;

r_B , r_C – расстояния от РНТ B и C (ведомых РНС) до потребителя, соответственно;

d_1 , d_2 – половина расстояний между РНС А – В и РНС А – С.

Основными причинами, влияющими на точность навигационных определений потребителей, являются геометрический фактор ($\Gamma\Phi$), который зависит от положения потребителя относительно РНС, а также геофизические условия распространения радиоволн.

Геометрический фактор показывает, во сколько раз возрастает ошибка определения местоположения потребителя по сравнению с ошибкой измерения радионавигационного параметра:

$$\sigma_r = \Gamma c \sigma_{\Delta t} \quad (2)$$

где σ_r – среднеквадратическое отклонение (СКО) ошибки определения местоположения потребителя;

Γ – геометрический фактор;

c – скорость света;

$\sigma_{\Delta t}$ – СКО ошибки измерения радионавигационного параметра.

Для разностно- дальномерной системы (РДС):

$$\Gamma = \frac{1}{2 \sin \alpha} \sqrt{\frac{1}{\sin^2(\frac{\psi_1}{2})} + \frac{1}{\sin^2(\frac{\psi_2}{2})}}, \quad (3)$$

где ψ_1 , ψ_2 – углы, под которыми видны базы станций относительно потребителя;

$\alpha = \psi_1 + \psi_2$ – угол, под которым пересекаются линии положения в точке наблюдения [7].

Анализ приведенных формул позволяет выбрать наиболее рациональное расположение станций наземной РНС для обслуживания заданного района, например, района интенсивных полетов. Для этого станции системы нужно расположить так, чтобы интересующий район находился в области наименьших значений $\Gamma\Phi$.

Рассмотрим вариант расположения РНТ ведущей и двух ведомых станций средневолновой РНС (частота 300 кГц – длина волны 1 км), обеспечивающих минимальный $\Gamma\Phi$ в районе Карских ворот и Карского моря (рис. 1).

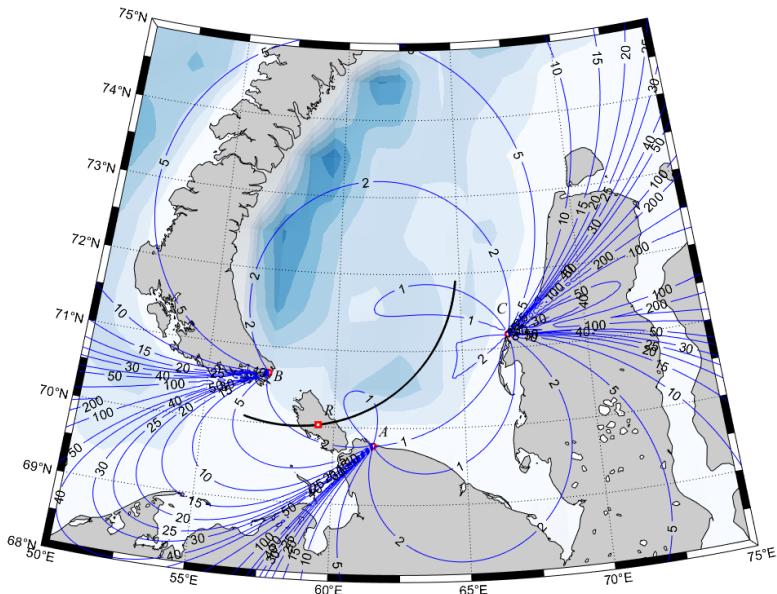


Рис. 1. Расположение радионавигационной точки и геометрический фактор в районе применения

На рисунке линиями уровня представлен ГФ для заданного региона, вычисленный с помощью выражения (3). Частью круговой трассы обозначено движение летательного аппарата. На о. Вайгач, над которым пролегает отмеченная трасса, в качестве примера выбрана точка R зафиксированного местоположения потребителя, где производится оценка характеристик трасс распространения сигналов РНС. Данные трассы понадобятся далее для демонстрации эффекта компенсации погрешностей, вызванных распространением сигнала поверхностью волны. Расстояния между РНТ ведущей и ведомыми трассами и характеристики трасс распространения сигнала приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика трасс распространения в выбранном районе

Трасса	Протяженность трассы, км	Характер трассы
AC	256	256 км над морем
AB	184	6 км над сушей, 52 км над морем, 68 км над сушей, 58 км над морем
AR	92	29 км над сушей, 17 км над морем, 46 км над сушей
CR	305,5	0,5 км над сушей, 281 км над морем, 24 км над сушей
BR	100	5 км над сушей, 54 км над морем, 41 км над сушей

На рис. 2 представлены зависимости дальностей от РНТ до летательного аппарата (ЛА), а на рис. 3 представлены зависимости разностей дальностей ($RA - RB$) и ($RC - RB$) вдоль всей трассы наблюдения. На рис. 4 построены гиперболы согласно выражению (1) и показана точка их пересечения, соответствующая точке R . Для определения координат точки пересечения гипербол может быть использован метод

Ньютона, численные методы или другие итерационные процедуры [8], рассмотрение которых выходит за рамки данной статьи.

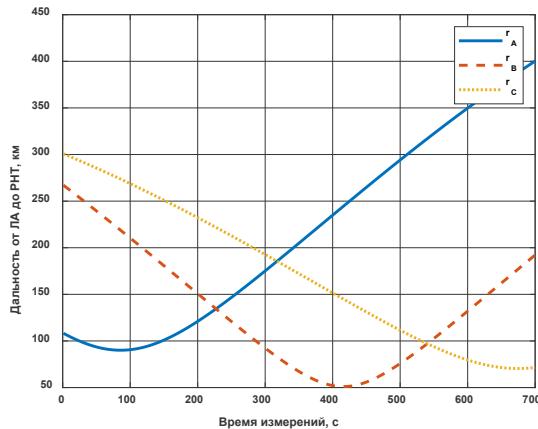


Рис. 2. Дальности от летательного аппарата до радионавигационной точки
(объяснения – в тексте)

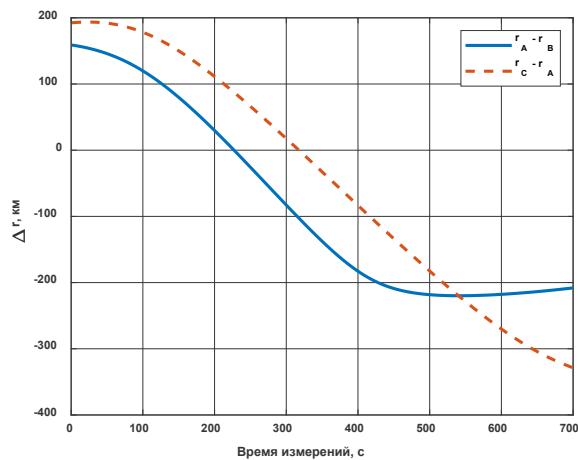
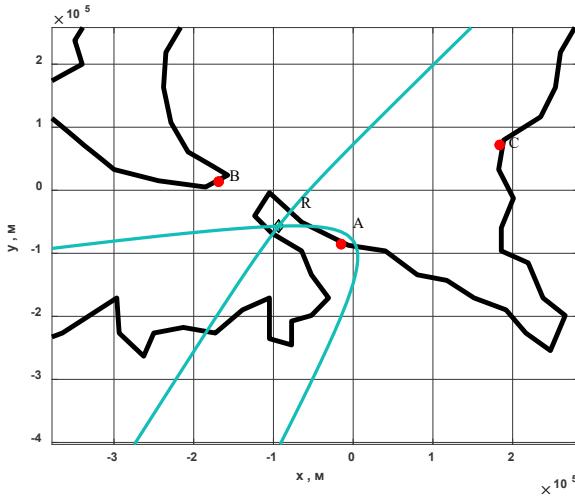


Рис. 3. Разность дальностей от летательного аппарата до радионавигационной точки
(объяснения – в тексте)



**Рис. 4. К определению координат летательного аппарата
(объяснения – в тексте)**

Учет влияния поверхности Земли на распространение радиоволн

Радиоволны ДВ и СВ диапазонов при распространении вблизи проводящей земной поверхности (над сушей, морем и слоем льда), приобретают дополнительный фазовый набег. Напряжённость электрического поля, создаваемого вертикальным диполем в дальней зоне, можно определить при помощи выражения:

$$E_B = \frac{300\sqrt{P}}{R} F(R) e^{ikR}, \quad (4)$$

где P – излучаемая мощность;

R – расстояние от источника до точки приема вдоль поверхности;

$F(R)$ – функция ослабления.

Функция ослабления (ФО) учитывает дополнительный фазовый набег и ослабление радиоволны для сферической модели Земли. Она может быть вычислена с помощью ряда Фока [9]:

$$F(x, y, q) = \sqrt{i\pi x} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{e^{ixt_s}}{t_s - q^2} \frac{w(t_s - y)}{w(t_s)}, \quad (5)$$

где x, y – параметры, зависящие от размеров радиолинии и высоты приема сигнала,

$$x = \frac{R}{a} \left(\frac{ka}{2} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad y = \left(\frac{ka}{2} \right)^{\frac{1}{3}} kh, \quad (6)$$

q – параметр, учитывающий электрические свойства поверхности, над которой распространяется радиоволна,

$$q = i\delta \left(\frac{ka}{2} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (7)$$

δ – приведённый поверхностный импеданс этой поверхности,

$$\delta = \frac{\sqrt{(\epsilon' - 1) + i \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}}}{\epsilon' + i \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}}, \quad (8)$$

ϵ' – относительная диэлектрическая проницаемость (ОДП) этой поверхности;

σ – удельная проводимость (УП) этой поверхности;

ϵ_0 – электрическая постоянная, $\epsilon_0 \approx 8,85418 \cdot 10^{-12}$, Ф/м;

a – радиус Земли, $a = 6378136$, м;

k – волновое число, $k = 2\pi / \lambda$;

h – высота над поверхностью Земли при приеме сигнала;

t_s – корни уравнения полюсов:

$$W'(t_s) - qW(t_s) = 0, \quad (9)$$

$W(t)$ – функция Эйри, определяемая выражением,

$$W''(t) - tW(t) = 0, \quad (10)$$

$W'(t)$ – производная функции Эйри;

$W''(t)$ – вторая производная функции Эйри.

Значения ОДП и УП для диапазонов СВ и ДВ для рассматриваемых трасс выбираются из табл. 2.

Таблица 2. Относительная диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость для разных видов земной поверхности

Вид земной поверхности или покрова	ОДП, ϵ	УП σ , См/м
Морская вода ($t = 20^\circ \text{ C}$)	78	5,0
Лед ($t = -10^\circ \text{ C}$)	4–5	$10^{-2} \text{--} 10^{-1}$
Мерзлая почва ($t = -35^\circ \text{ C}$)	3–7	$10^{-3} \text{--} 10^{-2}$

При распространении радиоволны над несколькими однородными участками с разными значениями электрических параметров земной поверхности, для вычисления функция ослабления можно использовать рекуррентное соотношение Фейнберга для многокусочных трасс [10].

Функция ослабления на трассе, состоящей из двух участков, для которых на первом участке $0 \leq x < x_1$ параметр, описывающий электрические свойства земной поверхности, равен q_1 , а на втором участке $x_1 < x \leq x_2$ – равен q_2 (рис. 5), может быть рассчитана при помощи выражения:

$$F(q_1, q_2, x_2) = F(q_1, x_2) + \sqrt{i\pi x_2} (q_2 - q_1) \int_{x_1}^{x_2} \frac{F(q_1, x) F(q_2, x_2 - x)}{\sqrt{x(x_2 - x)}} dx, \quad (11)$$

где $F(q_1, x)$ – функция ослабления при распространении на первом участке;
 $F(q_2, x)$ – функция ослабления при распространении на втором участке;
 $0 \leq x \leq x_2$ – координата вдоль трассы распространения.

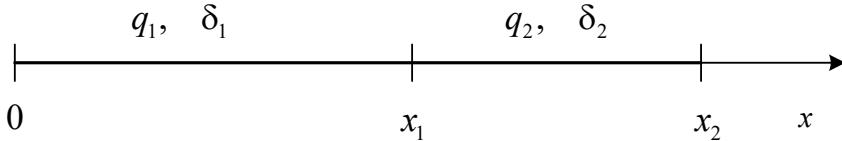


Рис. 5. Модель трассы из двух однородных участков (объяснения – в тексте)

Значения для q_1 и q_2 вычисляются при помощи выражений:

$$q_1 = i\delta_1 \left(\frac{ka}{2} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad q_2 = i\delta_2 \left(\frac{ka}{2} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (12)$$

Для трасс, состоящих из большего числа участков значение, ФО вычисляется аналогично [10]. С помощью предложенного рекуррентного соотношения проведен расчёт величины функции ослабления для трёхсуюточных однородных трасс *CR*, *AR* и *BR* для оценки влияния подстилающей поверхности на точность определения координат с помощью РДС СВ диапазона с частотой радиосигнала 300 кГц. Результаты расчётов приведены на рис. 6–11.

На рис. 6 и 7 представлены графики зависимостей модуля и аргумента ФО для высоты 1 м от расстояния. Для трассы *CR* набег фазы за счет влияния подстилающей поверхности составляет около 90 град (ошибка по дальности – 250 м), а для трассы *AR* около 25 град (ошибка по дальности – 70 м).

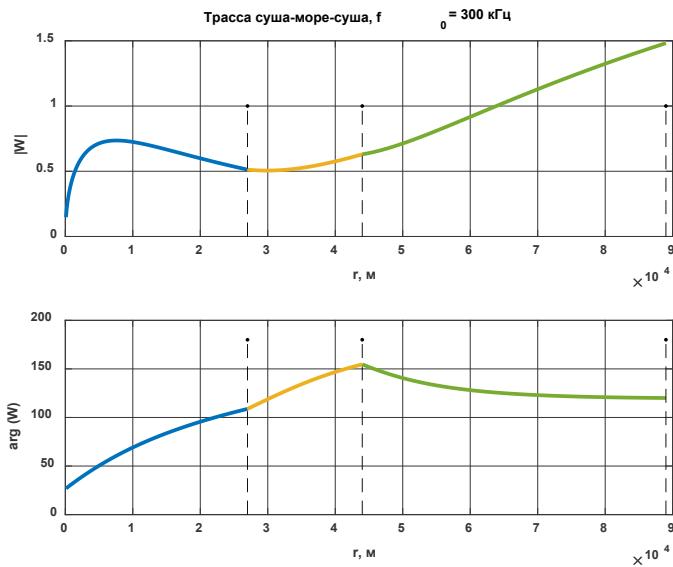


Рис. 6. Модуль и аргумент функции ослабления, высота приёма 1 м, трасса CR

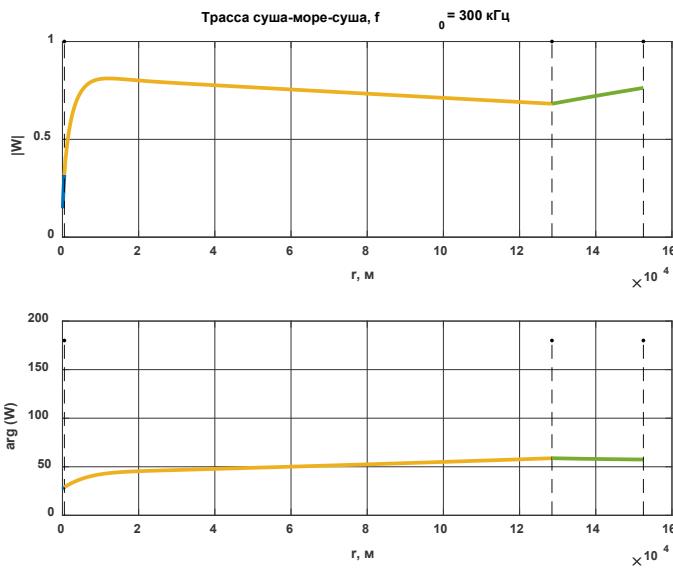


Рис. 7. Модуль и аргумент функции ослабления, высота приёма – 1 м, трасса AR

На рис. 8, 9 представлены аналогичные графики высоты 1000 м. Для трассы CR набег фазы за счет влияния подстилающей поверхности составляет около 53 град (ошибка по дальности – 147 м), а для трассы AR около 58 град (ошибка по дальности – 163 м).

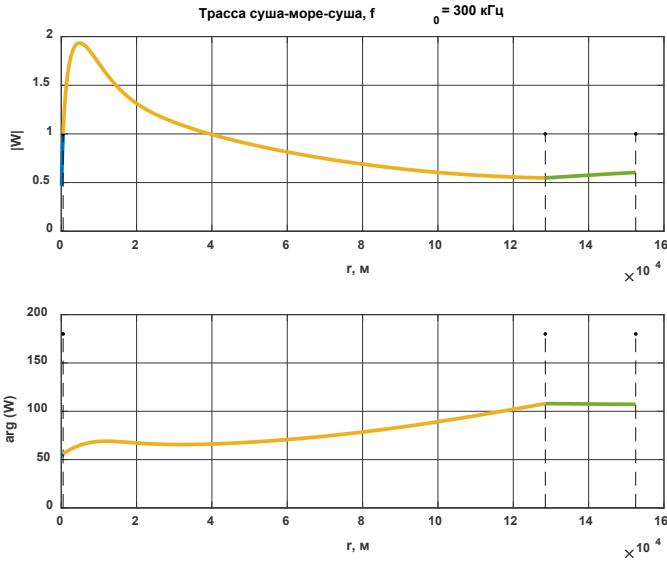


Рис. 8. Модуль и аргумент функции ослабления, высота приёма – 1000 м, трасса CR

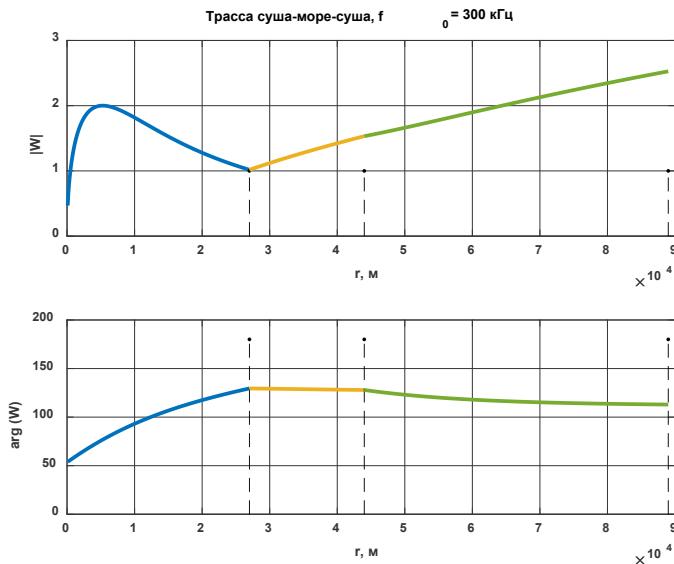


Рис. 9. Модуль и аргумент функции ослабления, высота приёма – 1000 м, трасса AR

Ошибка измерения разности дальностей ($CR - RA$) на высоте 1000 м составляет 178,95 м, а на трассе ($BR - RA$) – 195 м. Для высоты 1 м ошибка измерения разности дальностей ($CR - RA$) составит 173,66 м, а на трассе ($BR - RA$) – 104,24 м. При вычислении координат пересечения гипербол, наличие ошибки в измерении разности дальностей приводит к ошибкам вычисления координат ЛА. Зависимость СКО этой погрешности ($\sigma_{r0}, \sigma_{r1}, \sigma_{r2}$) и величины математического ожидания ($\mu_{r0}, \mu_{r1}, \mu_{r2}$) в точке наблюдения на о. Вайгач от величины СКО погрешности измерений разности

дальностей Δr показана на рис. 9 и 10 соответственно. Индексу 0 соответствуют характеристики для трассы с компенсацией дополнительной фазы, индексу 1 соответствуют характеристики для трассы на высоте 1 м над земной поверхностью, индексу 2 соответствуют характеристики для трассы 1 км над земной поверхностью.

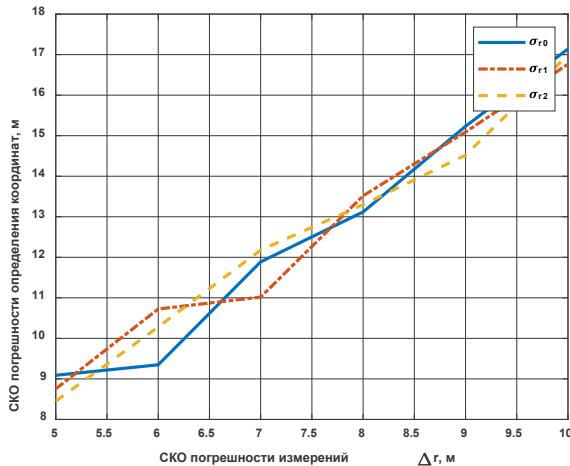


Рис. 10. Зависимость среднеквадратического отклонения погрешности определения координат летательного аппарата (объяснения – в тексте)

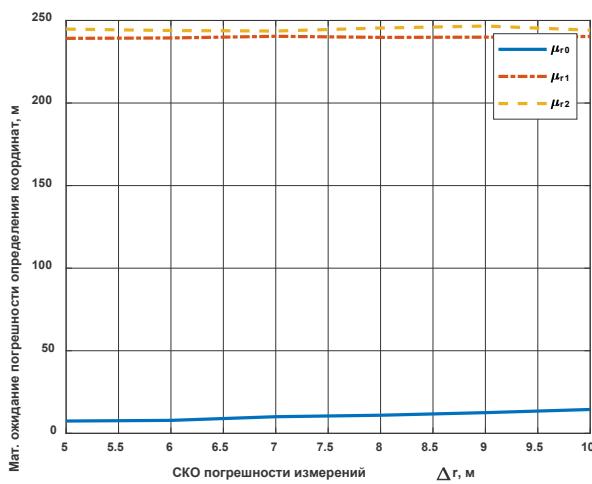


Рис. 11. Зависимость средней погрешности определения координат летательного аппарата

В табл. 3 представлены результаты моделирования процесса определения координат ЛА для различных вариантов ошибок измерений.

Таблица 3. Результаты моделирования процесса определения координат летательного аппарата для различных вариантов ошибок измерений

Ошибки определения координат ЛА с учетом действия ПП (без компенсации набега фаз $\Delta r_{RA-RB} = 180$ м, $\Delta r_{RC-RB} = 195$ м)		
СКО погрешности измерения дальности до РНТ, м	СКО погрешности определения координат, м	Математическое ожидание погрешности определения координат, м
5	7,47	239,16
6	9,19	239,41
7	9,54	240,40
8	11,33	239,75
9	12,51	239,88
10	14,13	240,29
Ошибки определения координат ЛА без учета действия ПП (с компенсацией набега фаз $\Delta r_{RA-RB} = 0$ м, $\Delta r_{RC-RB} = 0$ м)		
СКО погрешности измерения дальности до РНТ, м	СКО погрешности определения координат, м	Математическое ожидание погрешности определения координат, м
5	7,08	4,41
6	8,43	5,95
7	10,45	6,64
8	12,19	7,69
9	12,46	8,76
10	13,90	9,09

Третья координата определяется с учетом измерений высотомера с заданным СКО определения высоты. Для измерения высоты ЛА могут применяться высотомеры (радиовысотомеры и барометрические высотомеры). В самолётах ВКС России, таких как СУ-24М и Ту-160, используются радиовысотомеры РВ-21 «Импульс» (А-035) и барометрические высотомеры ВД-28. Высотомеры ВД-28 работают параллельно с радиовысотомерами для резерва и сверки измерений. Высотомеры РВ-21 непосредственно выдают результаты измерений в прицельно-навигационную систему ПНС-24М «Тигр» и навигационный комплекс НК-24МР.

Погрешность определения высоты составляет:

- радиовысотомер РВ-21: для высот 0–1500 м – (15 м – 50 м), для высот более 1500 м – (1,5–2 % от h), где h – измеренная высота [11];
- барометрический высотомер ВД-28: для высот 0–20 м – 2 м, для высот более 20 м – (0,1% от h), где h – измеренная высота [12].

Заключение

При навигационном обеспечении потребителя с использованием радиоволн ДВ и СВ диапазонов для точной оценки радионавигационных параметров необходимо учитывать влияние проводящей поверхности Земли. На расстояниях от передающих радионавигационных станций свыше десятков километров поверхность Земли может

быть представлена разнородными участками с отличающимися электрическими параметрами. Всю трассу распространения можно представить в виде однородных отрезков с соответствующими электрическими параметрами. Расчет влияния проводящей поверхности Земли можно осуществить при вычислении дополнительных фазовых набегов (аргументов ФО) на соответствующих трассах распространения с помощью соотношения Фейнберга для многокусочных трасс.

Для проведения предложенного способа учёта необходимо знать приближенное положение навигационного приемника и параметры трасс, над которыми происходит распространение радиосигнала. Учет дополнительного набега фазы производится в навигационном приемнике при введении корректирующей добавки, получаемой предложенным методом, в разность дальностей

$$r_A - r_B \text{ и } r_A - r_C.$$

В результате получим систему уравнений, определяющих координаты:

$$\begin{cases} r_A - r_B + \Delta r_{AB} = \sqrt{(x + d_1)^2 + y^2} - \sqrt{(x - d_1)^2 + y^2}, \\ r_A - r_C + \Delta r_{AC} = \sqrt{(x + d_2)^2 + y^2} - \sqrt{(x - d_2)^2 + y^2}, \end{cases} \quad (12)$$

где $\Delta r_{AB} = c \cdot k \cdot \arg(W_{AB})$,

$\Delta r_{AC} = c \cdot k \cdot \arg(W_{AC})$,

$\arg(W_{AB})$ – разность аргументов функции ослабления для трасс $A-R$ и $R-B$,

$\arg(W_{AC})$ – разность аргументов функции ослабления для трасс $A-R$ и $R-C$.

В ходе моделирования показано, что средняя погрешность определения координат для РНС СВ диапазона с учетом динамики электрических параметров вдоль трасс распространения может быть уменьшена с сотен до единиц метров и при СКО измерения радионавигационных параметров 5...10 м составляет 7...14 м.

ЛИТЕРАТУРА

- Пешехонов В. Г. Высокоточная навигация без использования информации глобальных навигационных спутниковых систем // Гирокопия и навигация. – 2022. – Т. 30. – № 1 (116). – С. 3–11.
- Czaplewski K., Weinrit A. The identification of possible applications of the e-loran system // Annual of navigation. – 2018. – Vol. 25. No. 1. Pp. 165–186.
- Миляков Д. Ф., Николашин Ю. Л., Щесняк С. С. Биденко С. И., Присяжнюк С. П., Черный С. Г. Направления организации альтернативного радионавигационно-телеинформационного обеспечения судоходства в арктической морской зоне // Информация и космос. – 2020. – № 3. – С. 102–111.
- Балов А. В. Радионавигация – настоящее и будущее // Гирокопия и навигация. – 2009. – № 4 (67). – С. 84–102.
- Радиотехнические средства навигационного оборудования России. Адм. № 3003 – С.-Пб: УНИО МО РФ, 2020. – 170 с.
- Астафьев Г. П., Шебшаевич В. С., Юрков Ю. А. Радиотехнические средства навигации летательных аппаратов. – М.: Сов. Радио, 1962. – 963 с.
- Баженов А. В., Захаренко Г. И., Бережнов А. Н. Радионавигационные системы: Учеб. пособие. – Ставрополь: Издание училища, 2007. – 202 с.
- Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. – М.: Лаборатория знаний, 2020. – 636 с.

-
9. Фок В. А., Проблемы дифракции и распространение электромагнитных волн. – М.: Советское радио, 1970. – 519 с.
 10. Фейнберг Е. Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. – М.: Физматлит, 1999. – 496 с.
 11. Ковалёв М. А., Хабло И. И., Золотарёв А. Л., Велижанин С. П., Елуфимов Д. С. Радиотехнические навигационные средства самолетовождения и посадки. Учебное пособие. – Самара: Издательство Самарского государственного аэрокосмического университета, 2011. – 76 с.
 12. Калашников А. В., Калинкин Н. Ф., Гаскевич Ю. А. Навигационно-пилотажные приборы / Учебное пособие. – М: Машиностроение, 1973. – 156 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/INFORMATION ABOUT AUTHORS

АЛЕШКИН Андрей Петрович, профессор 31 кафедры Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, доктор технических наук, профессор, vka@mil.ru.

Andrey P. ALESHKIN, Professor of the 31st Department of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky, Doctor of Sciences, Professor, vka@mil.ru.

БАКУРСКИЙ Клим Валерьевич, доцент 31 кафедры Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, кандидат технических наук, доцент, vka@mil.ru.

Klim V. BAKURSKY, Associate Professor of the 31st Department of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky, Candidate of Sciences, Reader, vka@mil.ru.

МЫСЛИВЦЕВ Тимофей Олегович, профессор 36 кафедры Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, доктор технических наук, профессор, vka@mil.ru.

Timofey O. MYSLIVTSEV, Professor of the 36th Department of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky, Doctor of Technical Sciences, Professor, vka@mil.ru.

НИКИТИН Роман Геннадьевич, адъюнкт 31 кафедры Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, vka@mil.ru.

Roman G. NIKITIN, Adjunct of the 31st Department of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky, vka@mil.ru

НИКИФОРОВ Сергей Валерьевич, доцент 31 кафедры Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, кандидат технических наук, доцент, vka@mil.ru.

Sergey V. NIKIFOROV, Associate Professor of the 31st Department of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky, Candidate of Technical Sciences, Reader, vka@mil.ru.

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В СИСТЕМЕ ГЛОНАСС С ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ СИГНАЛОВ И РАЗРЕШЕНИЕ ИХ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ

Бахолдин В. С., Леконцев Д. А.

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

Аннотация. В статье рассмотрены графоаналитический метод оценки погрешности фазовых измерений и двухчастотный беспереборный алгоритм разрешения неоднозначности фазовых измерений в системе ГЛОНАСС с частотным разделением сигналов с использованием технологии формирования некратных шкал. Приведены алгоритмы, реализующие данный метод на двух и трех несущих частотах. Представлены результаты экспериментальной обработки фазовых измерений псевдодальности в системе ГЛОНАСС.

Ключевые слова: глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС, погрешности измерения, фазовый цикл, фазовые измерения, разрешение неоднозначности.

Для цитирования: Бахолдин В. С., Леконцев Д. А. Графоаналитический метод оценки погрешностей фазовых измерений в системе ГЛОНАСС с частотным разделением сигналов и разрешение их неоднозначности // Навигация и гидрография. – 2024. – № 2 (75). – С. 22–33.

GRAPH-ANALYTICAL METHOD FOR ASSESSING PHASE MEASUREMENT ERRORS IN THE GLONASS SYSTEM WITH FREQUENCY DIVISION OF SIGNALS AND RESOLVING THEIR AMBIGUITIES

Bakhordin V. S., Lekontsev D. A.

Military space Academy named after A. F. Mozhaisky, St. Petersburg.

Summary. The article discusses a graphic-analytical method for estimating the error of phase measurements and a two-frequency non-exhaustive algorithm for resolving the ambiguity of phase measurements in the GLONASS system with frequency division of signals using the technology of forming multiple scales. Algorithms that implement this method at two and three carrier frequencies are presented. The results of experimental processing of phase measurements of pseudo-range in the GLONASS system are presented.

Keywords: Global navigation satellite system GLONASS, measurement error, phase cycle, phase measurements, ambiguity resolution.

For citation: Bakhordin V. S., Lekontsev D. A. Graph-Analytical Method for Assessing Phase Measurement Errors in the GLONASS System with Frequency Division of Signals and Resolving their Ambiguities // Navigation and hydrography. – 2024. – No. 2 (75). – P. 22–33.

Известно, что фазовые измерения (ФИ) обладают максимальной потенциальной точностью, зависящей только от отношения сигнал/шум, что определило их применение в навигационной аппаратуре потребителя (НАП) глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) для позиционирования с высокой точностью в режиме PPP (*precise point positioning*) и определения ориентации потребителя. При измерении дальности фазовым методом вся энергия сигнала используется для точного измерения, а предельные ошибки измерения дальности по фазовому запаздыванию меньше, чем при измерениях по временному запаздыванию. Ошибка следящей системы за фазой несущей частоты (НЧ) определяется по формуле:

$$\sigma_\lambda = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{B_{\text{ФАП}}}{P/N_0}},$$

где λ – длина волны, P/N_0 – отношение мощности сигнала к спектральной плотности мощности шума на входе приемника, а $B_{\text{ФАП}}$ – эквивалентная шумовая ширина полосы схемы слежения за фазой НЧ, т. е. предельная среднеквадратичная ошибка измерения дальности фазовым методом обратно пропорциональна корню квадратному из энергетического показателя. Еще более важно, что величина σ_λ обратно пропорциональна частоте, на которой производятся измерения. Соответствующим выбором этой частоты ошибка измерения может быть существенно осложнена. Так как ФИ изначально не предусматривались в ГНСС, то их реализация сталкивается с известной специалистам проблемой разрешения неоднозначности. В задачах навигации, не требующих высокой оперативности, успешно применяются методы, использующие статистическую избыточность измерений, однако в случае, определения ориентации применение данных методов невозможно. Проведенный анализ информативности измерений показал, что количество получаемой информации, определяемое как отношение диапазона однозначности к погрешности измерений [1], для различных способов и методов измерений существенно отличается [2].

Среди известных методов измерений и способов их реализации следует выделить метод совпадения дробных частей, обладающий уникальными свойствами с точки зрения эффективности использования информации, получаемой на каждой измерительной шкале. Первое свойство заключается в том, что при добавлении к одной шкале измерений второй, имеющей другую цену деления, увеличивается точность – реализуется принцип нониуса, и, следовательно, повышается информативность измерения. Принцип построения шкалы нониуса заключается в повышении точности отсчета, связанной с оценкой доли деления основной шкалы [3]. Метод совпадения применяется при приеме сигналов времени, когда передаваемые по радио ритмические сигналы сравнивают с ударами хронометра, а также в методах, использующих явления биений, интерференции и стробоскопического эффекта. Второе свойство метода совпадений заключается в том, что при добавлении к одной шкале второй можно повысить не точность, а увеличить диапазон однозначности измерения. Добавление последующих шкал позволяет или еще больше увеличить диапазон однозначности, или снизить требования к точности измерений дробной части фазового цикла (ФЦ).

В метрологии для получения эталонных мер широко используются лазерные интерференционные установки, позволяющие сравнивать длины образцов с длиной волны света и реализующие метод совпадения дробных частей порядка интерференции [4]. Анализ метода совпадения дробных частей и принципа формирования нониусных шкал приводит к заключению о том, что для построения информационно эффективных методов ФИ необходимо использовать такие шкалы, для которых отношение их длин или отношение цены деления представляется в виде подходящих дробей. Отношение длин измерительных шкал представляется дробью, соответственно, числитель и знаменатель ее являются взаимно простыми числами, а соответствующие им шкалы получаются некратными друг другу, т. е. в длине любой из шкал не укладывается целое число длин ни одной другой шкалы, и для вычисления

целого числа ФЦ можно использовать систему остаточных классов (СОК). При этом множество значений дробной части ФЦ отображается на класс вычетов по заданному модулю, а величине модуля соответствует длина волны. Построенную таким образом систему измерительных шкал будем называть системой некратных измерительных шкал [5]. В работах [6, 7] на основе математической теории чисел и рассмотренной технологии формирования некратных шкал приведены беспереборные способы разрешения неоднозначности (РН) ФИ, обладающие диапазоном однозначности равным диапазону метода совпадения дробных частей.

Рассмотрим сигналы ГЛОНАСС с частотным разделением в трех частотных диапазонах в соответствии с интерфейсными контрольными документами [8, 9]. Временные диаграммы для НЧ $f_1 = 1602$ МГц, $f_2 = 1246,0$ МГц и $f_3 = 1201,5$ МГц приведены на рис. 1.

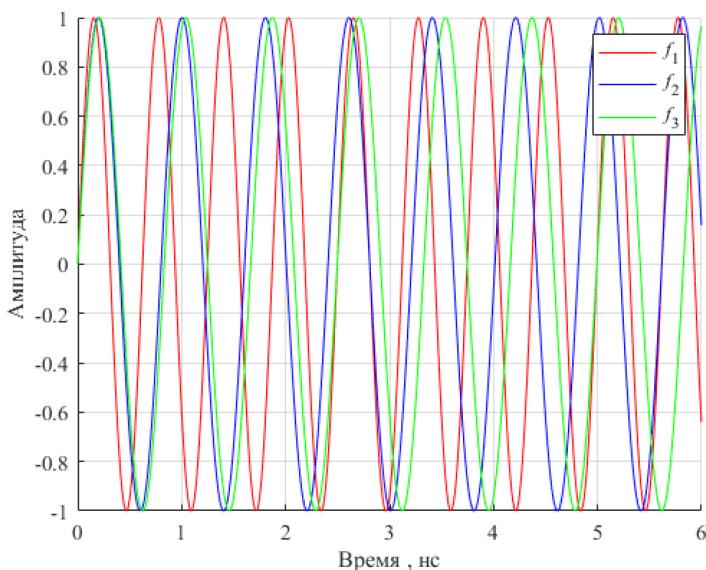


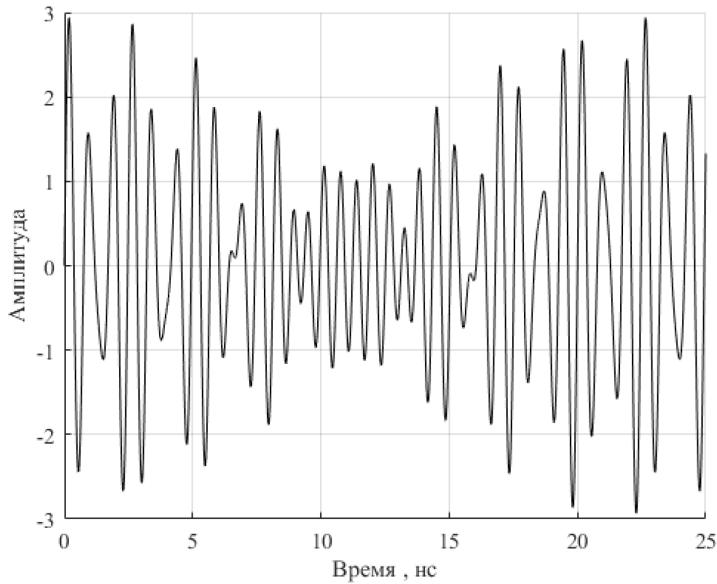
Рис.1. Временные диаграммы несущих частот ГЛОНАСС f_1, f_2 , и f_3
(объяснения – в тексте)

Фазы НЧ f_1 (красный цвет) и f_2 (синий цвет) совпадают в моменты времени $t = 0$ и $t \approx 5,62$ нс, а НЧ f_1 и f_3 (зеленый цвет) в моменты времени $t = 0$ и $t \approx 2,5$ нс. На рис. 2 приведена интерференционная картина, образованная тремя указанными частотами, из нее видно, что диапазон однозначности ФИ на трех частотах равен 27 ФЦ НЧ f_3 и 36 ФЦ НЧ f_1 . В методе некратных шкал диапазон однозначности ФИ вычисляется аналитически следующим образом:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{P_1}{\Theta_1} = \frac{9}{7}; \quad \frac{f_1}{f_3} = \frac{\lambda_3}{\lambda_1} = \frac{P_2}{\Theta_2} = \frac{4}{3}; \quad \frac{f_2}{f_3} = \frac{\lambda_3}{\lambda_2} = \frac{P_3}{\Theta_3} = \frac{28}{27}; \quad D_n = \text{НОК}(P_1, P_2).$$

Значение диапазона однозначности ФИ, выраженное в метрах, составляет:

$$\Lambda = P_3 \cdot \lambda_2 = \Theta_3 \cdot \lambda_3 \approx 6,7 \text{ м.}$$



**Рис. 2. Интерференция трех несущих частот ГЛОНАСС
(объяснения – в тексте)**

Метод формирования некратных шкал предполагает, что все фазометрические шкалы являются равноточными, т. е. погрешность измерения дробной части ФЦ на каждой шкале одинакова. В качестве меры точности измерений при формировании некратных шкал используется предельная погрешность δ_ϕ , определяемая в соответствии с РМГ 29-99 через среднюю квадратическую погрешность σ_ϕ в доверительных границах $\pm 3\sigma_\phi$. При указанных условиях вычисление целого числа ФЦ будет выполняться практически безошибочно, точнее, – с вероятностью 0,997, если для каждой пары шкал выполняется условие:

$$\delta n_i = \text{int} \left(\sqrt{\left(P_i^2 + \Theta_i^2 \right) \cdot \delta \phi^2} + 0,5 \right) = 0, \quad i = \overline{1, n},$$

где $\delta \phi = \delta_\phi / 2\pi$ – предельная погрешность измерения дробной части фазового цикла, принимающая значение от нуля до 1. Для каждой пары НЧ условия согласования некратных измерительных шкал – безошибочного РН, принимают вид:

$$|\delta \phi_{12}| \leq 0,043; |\delta \phi_{13}| < 0,1; |\delta \phi_{23}| \leq 0,012.$$

Оценка погрешности ФИ в НАП представляет собой достаточно сложную задачу, так как требует знания закона изменения доплеровского смещения частоты с учетом взаимного перемещения потребителя и спутника измерений, а также полного числа фазовых циклов, заключенных между двумя последовательными отсчетами.

Наличие скачков фазы (слипов) существенно усложняет эту задачу. В качестве альтернативы для оценки погрешности фазовых измерений предлагается использовать модифицированный графоаналитический метод, предложенный для оценки метрологических характеристик метода совпадения дробных частей порядка интерференции для многочастотной интерферометрии [10].

Для каждой пары НЧ метод некратных шкал в ГНСС, как и метод совпадений дробных частей, имеет достаточно простую геометрическую интерпретацию, основанную на том, что сочетание пар дробных частей ФЦ является уникальным в пределах диапазона однозначности. На рис. 3–5 приведены соответствующие диаграммы совпадений пар дробных частей ФЦ несущих частот f_1 и f_2 , f_1 и f_3 , f_2 и f_3 , а на рис. 6 – пространственная функция совпадения для трех несущих частот при отсутствии погрешностей фазовых измерений для случая, когда целое число ФЦ частоты f_1 лежит в диапазоне от 0 до 3.

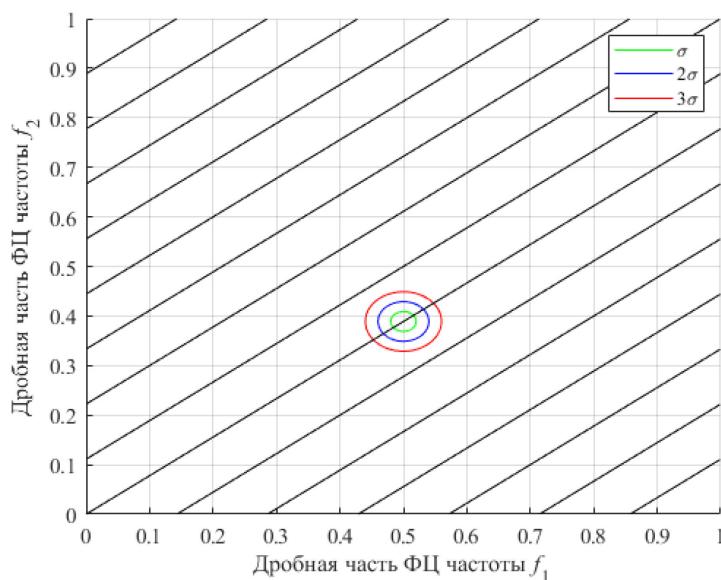


Рис. 3. Диаграмма совпадений дробных частей для несущих частот f_1 и f_2
(объяснения – в тексте)

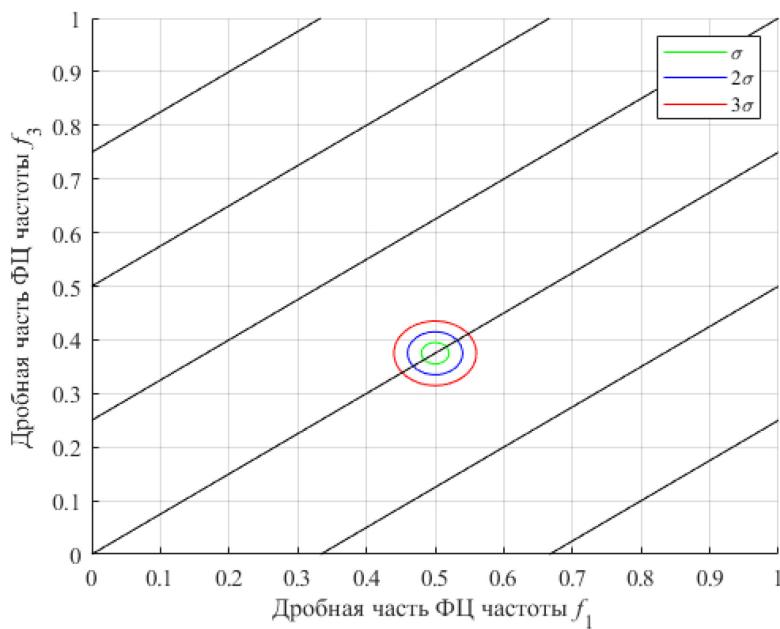


Рис. 4. Диаграмма совпадений дробных частей для несущих частот f_1 и f_3
(объяснения – в тексте)

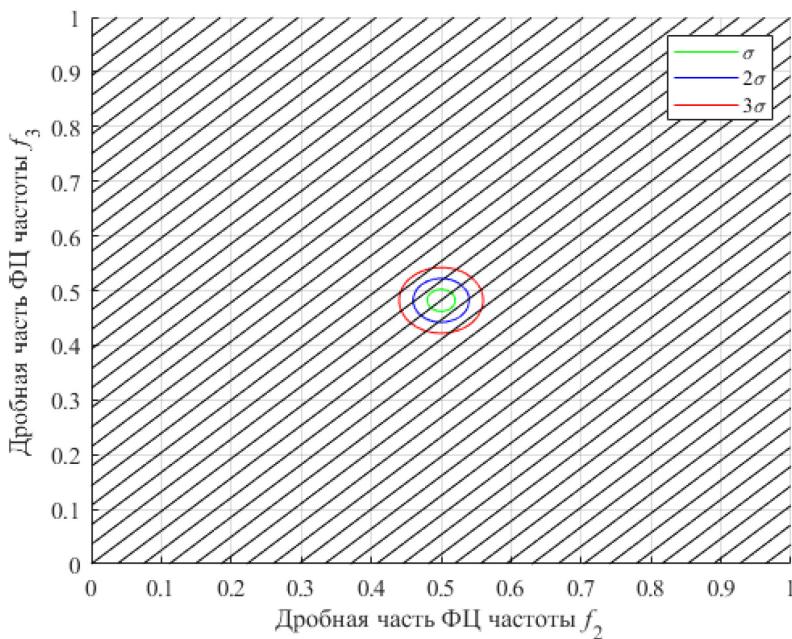
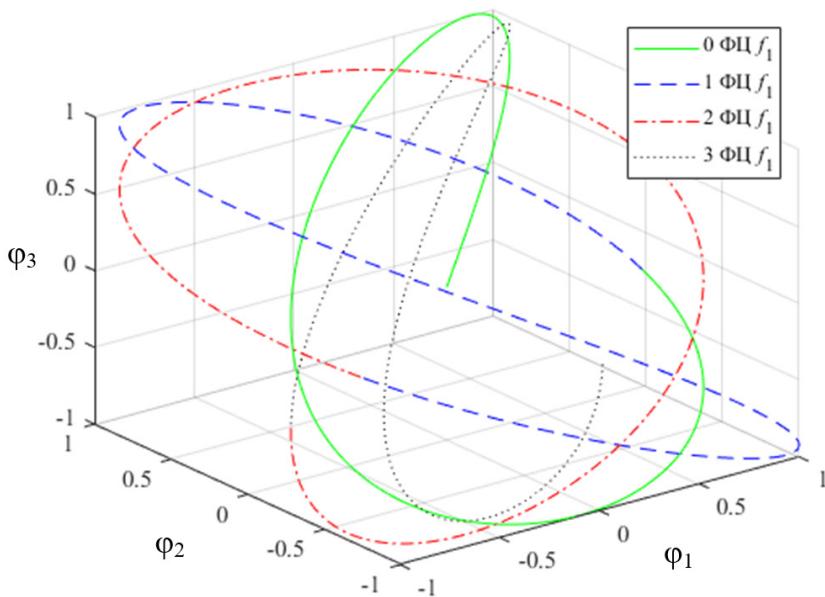


Рис. 5. Диаграмма совпадений дробных частей для несущих частот f_2 и f_3
(объяснения – в тексте)



**Рис. 6. Диаграмма совпадений дробных частей для трех несущих частот
(объяснения – в тексте)**

Каждая линия на рис. 3, 4 соответствует различным целым значениям числа ФЦ частоты f_1 , а также частоты f_2 на рис. 5. Линии, выходящие из начала системы координат, соответствуют случаям, когда целое число ФЦ частот f_1 и f_2 равны нулю. Число линий на диаграммах зависит от высоты дроби, описывающей отношение несущих частот.

Очевидно, что области между двумя соседними линиями соответствуют возможным значениям фаз для каждой пары при наличии погрешностей фазовых измерений. На диаграммах, приведенных на рис. 3–5, показаны три области, соответствующие ФИ с погрешностями, распределенными по нормальному закону в доверительных интервалах $\pm\sigma$, $\pm 2\sigma$ и $\pm 3\sigma$ при значении среднеквадратической погрешности измерений дробной части ФЦ равной 0,02. Таким образом, если полученные значения дробных частей ФЦ не выходят за пределы указанной области, то можно полагать, что РН будет выполнено правильно (рис. 3, 4). Для пары частот f_2 и f_3 высота дроби оказывается достаточно большой, и через область $\pm 3\sigma_\phi$ проходят пять линий, соответствующих различным сочетаниям дробных частей, а вероятность правильного РН не превышает 0,68.

Для оценки значений погрешностей экспериментальных ФИ в ГЛОНАСС были использованы результаты, записанные в файле формата RINEX v.3.04 24 декабря 2021 г. Обработке подвергались измерения, полученные по космическому аппарату системы ГЛОНАСС с PRN № 24. На рис. 7, 8 представлены выборки из 200 последовательных измерений дальности, доплеровского смещения, фазы и отношения сигнал/шум сигналов стандартной точности в диапазонах $L1$ и $L2$.

Начало интервала обработки было выбрано равным 11 часам 11 минутам 20 секундам, соответствуют малым значениям доплеровского смещения частоты принимаемого сигнала. Поскольку интерфейсной контрольный документ на сигнал с частотным разделением в диапазоне $L3$ не был утвержден и в соответствии

федеральной целевой программой поддержания и развития ГЛОНАСС, осуществляется переход к сигналам с кодовым разделением, в файле имеются результаты ФИ только для двух НЧ f_1 и f_2 .

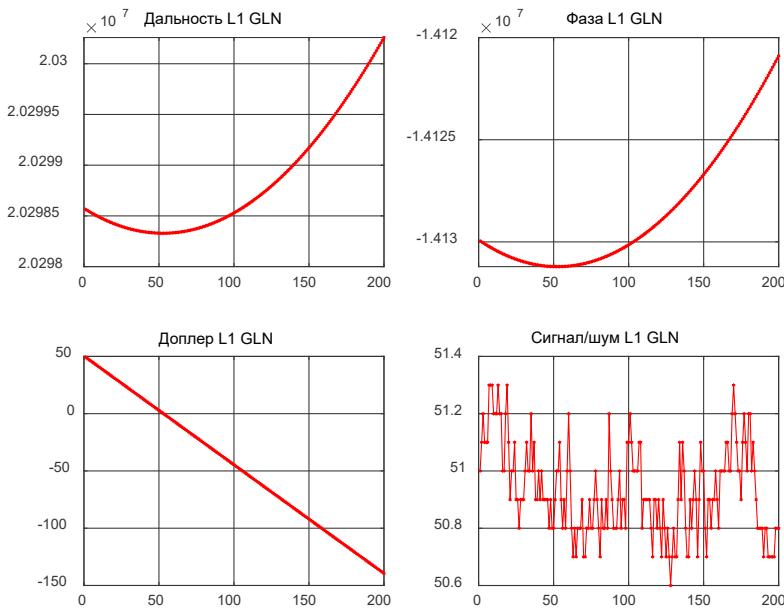


Рис. 7. Результаты измерений, выполненных на частоте f_1 (объяснения – в тексте)

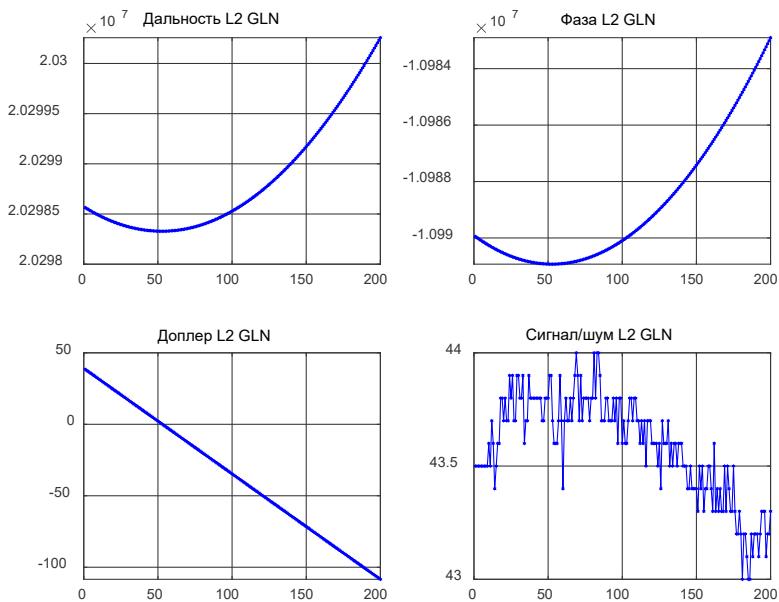


Рис. 8. Результаты измерений, выполненных на частоте f_2 (объяснения – в тексте)

Так как шаг записи ФИ в файле равен одной секунде, то для оценки их погрешностей была сделана выборка длительностью 45 минут, соответствующая 2700 значениям ФЦ и обеспечивающая практически все возможные сочетания дробных частей в диапазоне однозначности. Диаграмма совпадений дробных частей для несущих частот f_1 и f_2 в результатах экспериментальных измерений приведена на рис. 9.

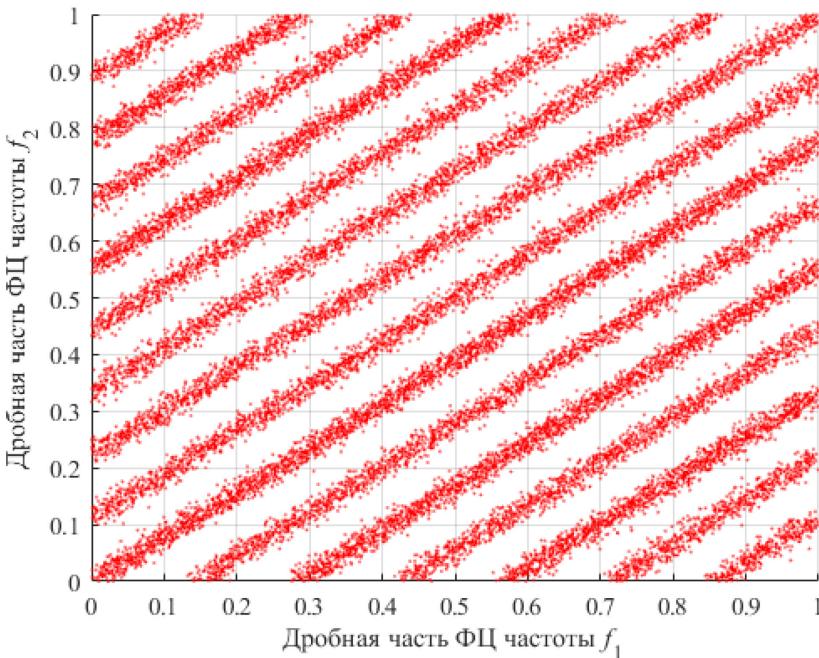


Рис. 9. Диаграмма совпадений дробных частей в результатах экспериментальных измерений (объяснения – в тексте)

Наличие погрешностей измерений приводит к образованию вместо линий полос, ширина которых зависит от величины погрешностей ФИ. Полученное графическое представление результатов ФИ позволяет сделать вывод о том, что предельные погрешности измерений дробных частей не превышают 0,01 ФЦ, и возможно использование разработанных алгоритмов для РН ФИ. При РН относительно частоты f_1 используются следующие математическое выражение [11]:

$$r_{12} = 4 \cdot \text{int} \left(\frac{\varphi_2}{2\pi} \cdot 9 - \frac{\varphi_1}{2\pi} \cdot 7 + 0,5 \right) \bmod 9,$$

где r_{12} – число ФЦ в диапазоне однозначности фазовой измерительной системы, а φ_1 и φ_2 – измеренное значение фазы в радианах. В случае выбора в качестве основной частоты f_2 формула приобретает следующий в вид:

$$r_{21} = 4 \cdot \text{int} \left(\frac{\varphi_1}{2\pi} \cdot 7 - \frac{\varphi_2}{2\pi} \cdot 9 + 0,5 \right) \bmod 7.$$

Результаты работы беспереборных алгоритмов РН ФИ приведены на рис. 10.

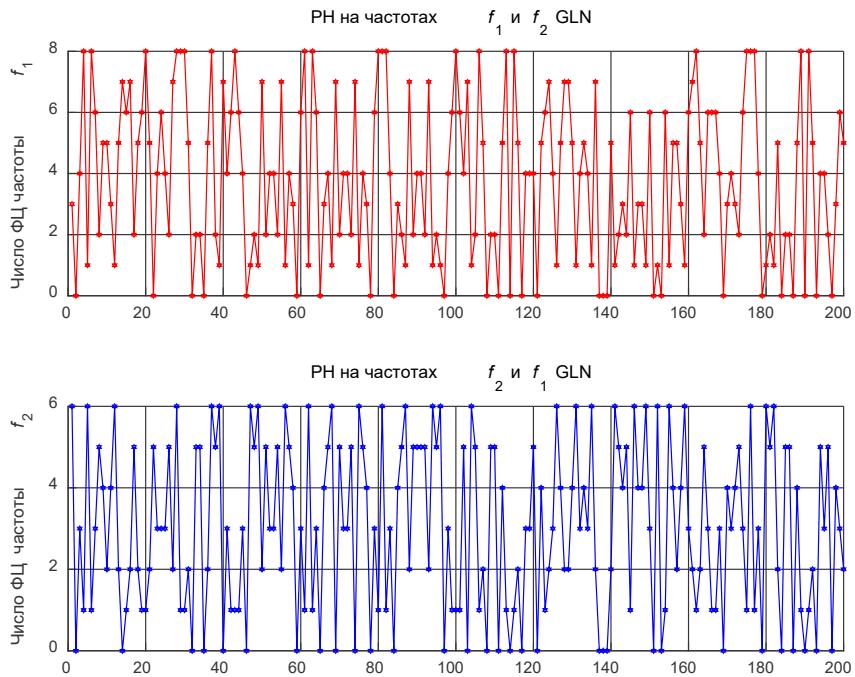


Рис. 10. Число ФЦ при РН на частотах f_1 и f_2
(объяснения – в тексте)

Для вычисления полного числа ФЦ, укладывающихся в измеряемой дальности, используем в качестве грубого значения кодовое измерение дальности R_K , тогда полная фазовая дальность на частотах f_1 и f_2 вычисляется в соответствии со следующими выражениями:

$$R_{f_1} = \left(r_{12} + \frac{\Phi_1}{2\pi} \right) + \text{int} \left(\frac{\text{int} \left(\frac{R_K + 0,5}{\lambda_1} \right) - r_{12}}{9} + 0,5 \right) \cdot 9 \cdot \lambda_1,$$

$$R_{f_2} = \left(r_{21} + \frac{\Phi_2}{2\pi} \right) + \text{int} \left(\frac{\text{int} \left(\frac{R_K + 0,5}{\lambda_2} \right) - r_{21}}{7} + 0,5 \right) \cdot 7 \cdot \lambda_2,$$

где R_{f_1} и R_{f_2} – полные вычисленные фазовые дальности, а λ_1 и λ_2 – соответствующие им длины волн. Результаты обработки в виде значений целого числа ФЦ, соответствующих выборке из 200 последовательных измерений дробной части фазового цикла, приведены на рис. 11.

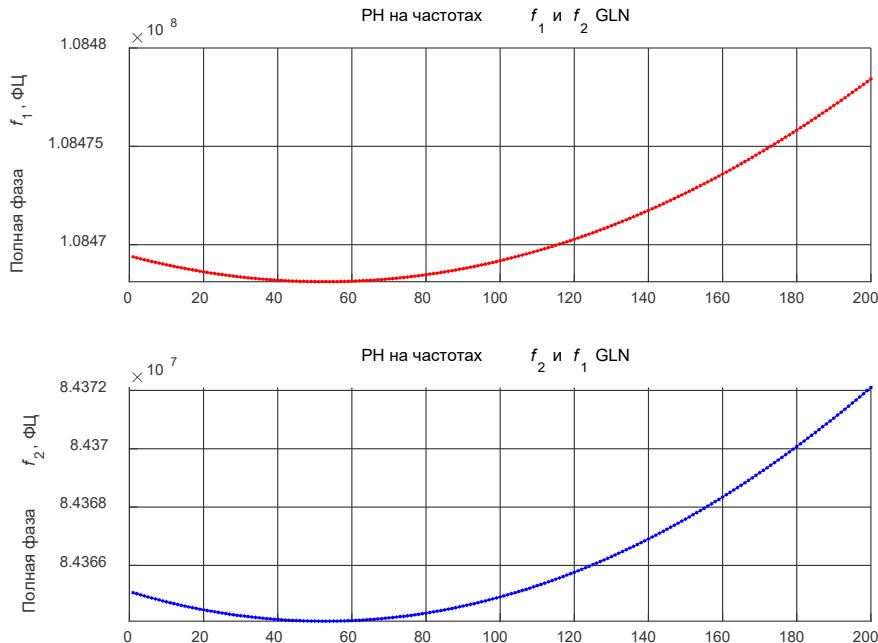


Рис. 11. Полная фазовая дальность на частотах f_1 и f_2 (объяснения – в тексте)

Для системы GPS также были разработаны беспереборные алгоритмы РН ФИ и проведена их экспериментальная апробация с использованием графоаналитического метода оценки погрешностей фазовых измерений [12].

Таким образом, результаты экспериментальной обработки полностью подтверждают работоспособность предложенных графоаналитического метода оценки погрешности ФИ и двухчастотного беспереборного алгоритма РН ФИ в системе ГЛОНАСС с использованием технологии формирования некратных шкал. Они также могут получить практическое применение, поскольку позволяют полностью автоматизировать процесс совместной обработки результатов измерения многошкольных фазометров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств. – М.: Энергия, Лен. отделение, 1968. – 248 с.
2. Алешкин А. П., Бахолдин В. С., Леконцев Д. А. Анализ информационных характеристик сигналов систем космической радиолокации и радионавигации и предложения по их улучшению // Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. – 2015. – № 647. – С. 37–42.
3. Городецкий И. Е. Основы технических измерений в машиностроении. – Л: Машгиз, 1950. – 219 с.

-
4. Забелин А. В. Математическая модель метода совпадения дробных частей порядка интерференции // Измерительная техника. – 2011. – № 7. – С. 8–12.
 5. Бахолдин В. С., Леконцев Д. А. Концептуальная модель радиотехнической системы траекторных измерений на основе технологии формирования некратных измерительных шкал // Вопросы радиоэлектроники. – 2020 – №11 – С. 14–21.
 6. Способ разрешения неоднозначности фазовых измерений Пономарев В. А., Бахолдин В. С. Патент на изобретение RU 2157547 C1, 10.10.2000. Заявка № 99120425/09 от 24.09.1999 г.
 7. Способ разрешения неоднозначности фазовых измерений в системе GPS Пономарев В. А., Бахолдин В. С. Патент на изобретение RU 2213979 C2, 10.10.2003. Заявка № 2000132342/09 от 22.12.2000 г.
 8. Глобальная навигационная спутниковая система. Интерфейсный контролльный документ. Навигационный радиосигнал в диапазоне L3. Частотное разделение сигналов. – М.: РНИИ КП, 2008 – 35 с.
 9. Глобальная навигационная спутниковая система. Интерфейсный контролльный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2. Редакция 5.1. – М.: РНИИ КП, 2008 – 74 с.
 10. Забелин А. В. Графоаналитический расчёт метрологических характеристик метода совпадения дробных частей порядка интерференции для многочастотной интерферометрии // Вестник МГТУ «Станкин». – 2009. – №3 (7). – С. 24–30.
 11. Бахолдин В. С. Беспереборный метод разрешения неоднозначности фазовых измерений в системе ГЛОНАСС // Радиотехника. – 2015. – № 11. – С. 105–111.
 12. Бахолдин В. С., Леконцев Д. А. Результаты моделирования и экспериментальной обработки фазовых измерений системы GPS с использованием беспереборных алгоритмов разрешения неоднозначности // Навигация и гидрография. – 2023. – № 71. – С. 34–46.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

БАХОЛДИН Владимир Станиславович, доцент Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, доктор технических наук, доцент, vka@mil.ru.

Vladimir S. BAKHOLDIN, associate professor of the A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Doctor of Science, Reader, vka@mil.ru.

ЛЕКОНЦЕВ Дмитрий Александрович, доцент Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, кандидат технических наук, vka@mil.ru.

Dmitriy A. LEKONTSEV, associate professor of the A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Candidate of Science, vka@mil.ru.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАВИГАЦИОННОГО РАДИОСИГНАЛА
В РАЗЛИЧНЫХ БАЗИСАХ**

Луценко С. А.

Военная академия связи им. С. М. Будённого, г. Санкт-Петербург.

Аннотация. В статье представлен новый подход к формированию навигационных радиосигналов Глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС на основе теории систем базисных функций. В математической записи навигационных радиосигналов типа фазоманипулированных широкополосных радиосигналов в качестве манипуляционного параметра использует непосредственно базисная функция. Сформулированы частные случаи для разработанной математической модели, включающие в себя математические выражения для пространств сплайн-Понтрягина–Виленкина–Крестенсона-функций, сплайн-Виленкина–Крестенсона-функций, функций сплайн-Крестенсона, классических сплайн-функций, сплайн-функций Галуа, сплайн-функций Рейдера и сплайн-функций Гаусса. Процедура формирования сигналов в различных базисах сводится к замене формирующих базисных функций путем выбора соответствующих генераторов и фильтров, при этом сам принцип модуляции остается прежним.

Ключевые слова: базисные функции, навигационные радиосигналы, ГЛОНАСС, сплайн-характеры, фазоманипулированный широкополосный радиосигнал.

Для цитирования: Луценко С. А. Математическая модель навигационного радиосигнала в различных базисах // Навигация и гидрография. – 2024. – № 2 (75). – С. 34–42.

**MATHEMATICAL MODEL OF NAVIGATION RADIO SIGNAL
IN VARIOUS BASES**

Lutsenko S. A.

Military Academy of Communications named after S. M. Budyonny, St. Petersburg.

Summary. This article presents a new approach to the generation of GNSS GLONASS navigation radio signals based on the theory of basis function systems. In the mathematical notation of navigation radio signals of the DSSS type, the basis function is used directly as a manipulation parameter. Special cases for the developed mathematical model are formulated, including mathematical expressions for the spaces SPVKF, SVKF, spline-Chrestenson functions, classical spline functions, Galois spline functions, Rader spline functions and Gauss spline functions. The procedure for generating signals in various bases comes down to replacing the forming basis functions by selecting appropriate generators and filters, while the modulation principle itself remains the same.

Keywords: basis function, navigation radio signal, GLONASS, spline characters, DSSS.

For citation: Lutsenko S. A. Mathematical Model of Navigation Radio Signal in Various Bases // Navigation and hydrography. – 2024. – No. 2 (75). – P. 34–42.

Введение

Актуальность использования глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) обусловлена несколькими ключевыми факторами [1, 2]. Во-первых, ГНСС обеспечивают точное определение местоположения в любой точке земной поверхности, что критически важно для широкого спектра отраслей, включая транспорт, геодезию, картографию, спасательные операции и военную сферу. Во-

вторых, ГНСС предоставляют необходимую информацию для навигации и ориентирования обычных людей в пространстве через использование навигационных приложений на смартфонах и планшетах, что позволяет прокладывать маршрут в незнакомых местах, сокращая время на перемещение между точками. В-третьих, ГНСС имеют важное значение для многих аспектов экономической и социальной деятельности, способствуют повышению эффективности бизнес-процессов, сокращению временных затрат и улучшению качества услуг.

В Российской Федерации существует собственная ГНСС ГЛОНАСС, являющаяся важным элементом инфраструктуры и имеющая стратегическое значение для национальной безопасности и экономики [3]. В условиях современных геополитических и экономических вызовов, введения беспрецедентных санкционных ограничений со стороны западных стран остро встают вопросы импортозамещения и технологического развития критически важных систем (к которым относятся и системы навигационного обеспечения) на базе отечественных технологических решений. Учитывая существующие реалии к перспективным и необходимым направлениям развития ГНСС ГЛОНАСС можно отнести повышение степени автономности навигационного комплекса в целом за счет развитие внутренней производственной, в первую очередь, аппаратной базы, улучшение качества и надежности навигационных сервисов и услуг, совершенствование алгоритмов формирования и обработки навигационных сигналов.

Стоит отметить, что если в случае с первым направлением временные рамки на развитие аппаратных технологий достаточно велики и могут исчисляться годами/десятилетиями, то исследование новых подходов к формированию и обработке навигационных радиосигналов требует наличия только программных средств имитационного моделирования. Особую роль в навигационном обеспечении дружественных войск (сил) играет требование помехозащищенности, от которого напрямую зависит точность и стабильность системы позиционирования абонентов.

Основными методами повышения помехозащищенности навигационных радиосигналов являются спектральные методы, развитие новых и усовершенствование существующих сигнально-кодовых конструкций, алгоритмов формирования и обработки радиосигналов.

Одна из главных проблем результивного решения задач формирования и обработки радиосигналов связана с адекватными формами их представления. С одной стороны, учитывая современные тенденции в передаче информации, целесообразным видится применение дискретных форм описания, для которых разработаны продуктивные методы цифровой обработки сигнала (ЦОС). С другой стороны, непрерывность по времени несущего колебания предполагает использование континуальных описаний. Таким образом, объективно возникает необходимость в разработке принципиально нового математического аппарата, объединяющего преимущества как дискретного, так и непрерывного представления радиосигналов, учитывющего их гладкость [4].

В работах С. Н. Агиевича предложена новая теория систем базисных функций (например, базисных функций сплайн-характеров (БФХ), базисов сплайн-Виленкина-Крестенсона функций (СВКФ), базисов сплайн-Понтрягина-Виленкина-Крестенсона-функций (СПВКФ) и др.), строящихся на основе методов сплайн-алгебраического гармонического анализа (САГА) и позволяющих существенно расширить круг используемых базисных функций при формировании радиосигналов.

Частными случаями систем базисных функций являются и непрерывные экспоненциальные функции синуса/косинуса, что позволяет получать обобщенные математические модели для всех типов радиосигналов, построенных на их основе. Базовые определения и свойства базисных функций представлены в группе статей [4–8] и в данной работе не рассматриваются.

Математическая модель навигационного радиосигнала в различных базисах и ее частные случаи

Принципы формирования, технические характеристики и параметры интерфейса навигационных радиосигналов ГНСС ГЛОНАСС приведены в серии интерфейсных контрольных документов от АО «Российские космические системы» – производителя спутниковой компоненты ГНСС ГЛОНАСС [9–13].

Каждый навигационный космический аппарат (НКА) модификации «ГЛОНАСС-М» излучает навигационные радиосигналы с частотным разделением в поддиапазонах $L1$ и $L2$. НКА модификаций «ГЛОНАСС-М» излучают в поддиапазонах $L1$ и $L2$ сигнал стандартной точности (СТ), доступный любым потребителям, и сигнал высокой точности (ВТ), доступный только специальным потребителям. Поддиапазон $L1$ ГНСС ГЛОНАСС занимает полосу частот 1598,0625... 1605,375 МГц, поддиапазон $L2$ – 1242,9375 ... 1248,625 МГц. Распределение несущих частот между НКА определяется интерфейсным контрольным документом и содержится в альманахе системы [10, 11].

Сигнал $L1$ используется для основных навигационных вычислений в системе ГНСС ГЛОНАСС. Физически сигнал $L1$ состоит из нескольких компонентов, включая кодовую последовательность, которая используется для определения псевдодальности и абсолютного времени, и несущую частоту, которая служит для измерения фазовых разностей между приемником и спутником. Сигнал $L2$ обычно используется для повышения точности позиционирования, а также для коррекции ошибок, связанных с ионосферными эффектами, кодовая структура идентична с сигналом $L1$, но с другой относительной частотой. Использование сигнала $L2$ позволяет уменьшить влияние ионосферных эффектов на измерения для обеспечения более точных результатов.

По своей физической сути навигационный радиосигнал, передаваемый на собственной несущей частоте в поддиапазонах $L1$ и $L2$, является многокомпонентным фазоманипулированным сигналом. Фазовая манипуляция несущей осуществляется на π радиан с максимальной погрешностью не более $\pm 0,2$ радиана. Фаза несущего колебания поддиапазона $L1$, передаваемого НКА «ГЛОНАСС», и фазы несущих колебаний поддиапазонов $L1$ и $L2$, передаваемого НКА «ГЛОНАСС-М», модулируется двоичной последовательностью, образованной суммированием по модулю два псевдослучайного (ПС) дальномерного кода, цифровой информации навигационного сообщения и вспомогательного колебания типа меандра.

В данной статье в качестве примера рассмотрена схема формирования навигационных радиосигналов $L1$ (рис. 1). Стоит отметить, что схемы формирования $L1, L2$ в целом схожи.

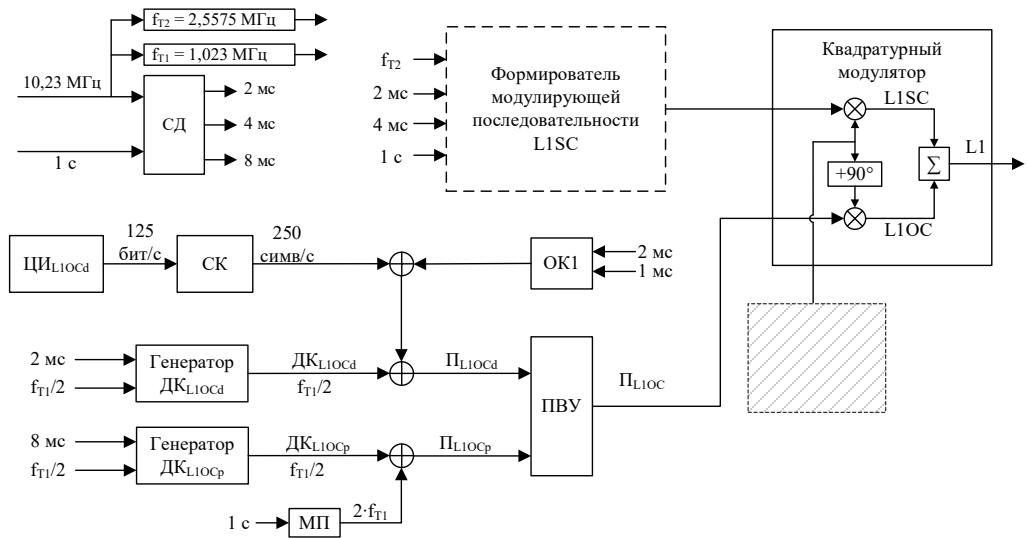


Рис. 1. Схема формирования навигационного радиосигнала L1 [10]:
СД – синхронный делитель; ЦИ – цифровая информация; ОК – оверлейный код;
ПВУ – почиповый временной уплотнитель; ДК – дальнометрический код;
Π – последовательность

Навигационные радиосигналы ГНСС ГЛОНАСС относятся к классу фазоманипулированных широкополосных радиосигналов (ФМШПС). При прямоугольной форме символов информационной последовательности ФМШПС на длительности одного бита можно описать следующим выражением [14–17]:

$$s(t) = A \cdot b_{flow}(t) \cdot \text{eseq}(t) \cos(\omega t + \theta), \quad 0 \leq t \leq T_s, \quad (1)$$

где A – амплитуда радиосигнала; ω – начальная частота радиосигнала; θ – начальная фаза несущего колебания, $\theta \in [0, 2\pi]$; $b_{flow}(t)$ – информационная последовательность ЦИ навигационного сообщения, $\text{eseq}(t)$ – расширяющая спектр радиосигнала функция (в ГНСС ГЛОНАСС применяются дальнометрические коды на основе кодов Голда).

В статьях [7–8] предложены прикладные математические модели радиосигналов, сформированные на основе теории систем базисных функций, однако, в проведенных исследованиях при математических записях радиосигналов использовались только классические манипуляционные признаки амплитуда/частота/фаза. В выражении (2) показаны математическая запись радиосигналов типа ФМШПС, где в качестве манипуляционного параметра используется непосредственно базисная функция:

$$\tau_{L(H_{jr}, K_{jr})}^{(H_{jr}, K_{jr})} S_n^p(t) = \tau_{L(H_{jr}, K_{jr})}^{(H_{jr}, K_{jr})} A_{ir}(t) \cdot b_{flow}(t) \cdot \text{eseq}(t) \cdot \tau_{L(H_{jr}, K_{jr})}^{(H_{jr}, K_{jr})} \lambda_{nr}^p(t, \varphi_{kr}), \quad (2)$$

где $ir = 1 \dots IR$ – изменение пределов амплитуды радиосигнала в пределах пространства $L(H_{jr}, K_{jr})$, IR – размерность амплитуды; $nr = 1 \dots NR$ – изменение

пределов частоты радиосигнала в пределах пространства $L(H_{jr}, K_{jr})$, NR – размерность частоты; $kr = 1 \dots KR$ – изменение пределов фазы радиосигнала в пределах пространства $L(H_{jr}, K_{jr})$, KR – размерность фазы; $jr = 1 \dots JR$ – изменение пределов базиса радиосигнала в пределах пространства $L(H_{jr}, K_{jr})$, JR – размерность базисной функции; $b_{flow}(t)$ – информационная последовательность; $\text{eseq}(t)$ – расширяющая спектр радиосигнала функция; $0 \leq t \leq T$, $T \leq \tau(H_{jr}, K_{jr}) \leq {}_{L(H_{jr}, K_{jr})}T$, T – длительность символа; $\tau(H_{jr}, K_{jr})$ – длительность передачи информации в пределах базиса; ${}_{L(H_{jr}, K_{jr})}T$ – длительность передачи информации; ${}_{L(H_{jr}, K_{jr})}^{\tau(H_{jr}, K_{jr})}A_{ir}(t)$ – амплитуда радиосигнала; ${}_{L(H_{jr}, K_{jr})}^{\tau(H_{jr}, K_{jr})}\lambda_{nr}^p(t, \varphi_{kr})$ – базисная функция из пространства ${}_{L(H_{jr}, K_{jr})}G_{nr}^p$ с номером nr .

Тогда на основе работы [4] можно выделить следующие частные случаи для модели (2).

Случай 1. Для пространства $L(H_{\mu_1} + H_{\mu_2} + \dots + H_{\mu_{jr}}, C)G_{nr}^p$ (пространство СПВКФ), полученного из пространства ${}_{L(H_{jr}, K_{jr})}G_{nr}^p$, где $H = H_{\mu_1} + H_{\mu_2} + \dots + H_{\mu_{jr}}$ и $K = C$ есть поле комплексных чисел, а $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{jr}$ – произвольные целые числа, справедливо:

$$\begin{aligned} & {}_{L(H_{\mu_1} + H_{\mu_2} + \dots + H_{\mu_{jr}}, C)}^{\tau(H_{\mu_1} + H_{\mu_2} + \dots + H_{\mu_{jr}}, C)}S_{ir}^p(t) = {}_{L(H_{\mu_1} + H_{\mu_2} + \dots + H_{\mu_{jr}}, C)}^{\tau(H_{\mu_1} + H_{\mu_2} + \dots + H_{\mu_{jr}}, C)}A_i(t) \\ & b_{flow}(t) \cdot \text{eseq}(t) {}_{L(H_{\mu_1} + H_{\mu_2} + \dots + H_{\mu_{jr}}, C)}^{\tau(H_{\mu_1} + H_{\mu_2} + \dots + H_{\mu_{jr}}, C)}\lambda_n^p(t, \varphi_{kr}), \end{aligned} \quad (3)$$

$$ir = 1 \dots IR, \quad 0 \leq t \leq T, \quad T \leq \tau(H_{\mu_1} + H_{\mu_2} + \dots + H_{\mu_{jr}}, C) \leq {}_{L(H_{\mu_1} + H_{\mu_2} + \dots + H_{\mu_{jr}}, C)}T.$$

Случай 2. Для пространства $L(H_{\mu} + H_{\mu} + \dots + H_{\mu}, C)G_{nr}^p$ (пространство СВКФ), полученного из пространства ${}_{L(H, K)}G_{nr}^p$, где $H = H_{\mu} + H_{\mu} + \dots + H_{\mu}$ и $K = C$ есть поле комплексных чисел, а μ – произвольное целое число, справедливо:

$$\begin{aligned} & {}_{L(H_{\mu} + H_{\mu} + \dots + H_{\mu}, C)}^{\tau(H_{\mu} + H_{\mu} + \dots + H_{\mu}, C)}S_{ir}^p(t) = {}_{L(H_{\mu} + H_{\mu} + \dots + H_{\mu}, C)}^{\tau(H_{\mu} + H_{\mu} + \dots + H_{\mu}, C)}A_{ir}(t) \cdot b_{flow}(t) \cdot \\ & \cdot \text{eseq}(t) {}_{L(H_{\mu} + H_{\mu} + \dots + H_{\mu}, C)}^{\tau(H_{\mu} + H_{\mu} + \dots + H_{\mu}, C)}\lambda_{nr}^p(t, \varphi), \end{aligned} \quad (4)$$

$$ir = 1 \dots IR, \quad 0 \leq t \leq T, \quad T \leq \tau(H_{\mu} + H_{\mu} + \dots + H_{\mu}, C) \leq {}_{L(H_{\mu} + H_{\mu} + \dots + H_{\mu}, C)}T.$$

Случай 3. Для пространства $L(H_{\rho} + H_{\rho} + \dots + H_{\rho}, C)G_{nr}^p$ (пространство функций сплайн-Крестенсона), полученного из пространства ${}_{L(H, K)}G_{nr}^p$, где $H := H_{\rho} + H_{\rho} + \dots + H_{\rho}$ и $K = C$ есть поле комплексных чисел, а ρ – простое целое число, справедливо:

$$\begin{aligned} & \tau(H_\rho + H_\rho + \dots + H_\rho, C) S_{ir}^p(t) = \\ & = \tau(H_\rho + H_\rho + \dots + H_\rho, C) A_{ir}(t) \tau(H_\rho + H_\rho + \dots + H_\rho, C) \lambda_{nr}^p(t, \varphi), \end{aligned} \quad (5)$$

$$ir = 1 \dots IR, \quad 0 \leq t \leq T, \quad T \leq \tau(H_\rho + H_\rho + \dots + H_\rho, C) \leq_{L(H_\rho + H_\rho + \dots + H_\rho, C)} T.$$

Случай 4. Для пространства $L(H_N, C)G_{nr}^p$ (пространство классических сплайн-функций), полученного из пространства $L(H, K)G_{nr}^p$, где $H = H_N$, $\mu = N$ и $K = C$ есть поле комплексных чисел, справедливо:

$$\begin{aligned} \tau(H_N, C) S_{ir}^p(t) &= \tau(H_N, C) A_{ir}(t) \cdot b_{flow}(t) \cdot \text{eseq}(t) \tau(H_N, C) \lambda_n^p(t, \varphi), \\ ir &= 1 \dots IR, \quad 0 \leq t \leq T, \quad T \leq \tau(H_N, C) \leq_{L(H_N, C)} T. \end{aligned} \quad (6)$$

Случай 5. Для пространства $L(H_N, C)G_{nr}^p$ при $p \rightarrow \infty$, полученного из пространства $L(H, K)G_{nr}^p$, где $H = H_N$, $\mu = N$ и $K = C$ – поле комплексных чисел, справедливо:

$$\begin{aligned} \lim_{p \rightarrow \infty} \tau(H_N, C) S_{ir}^p(t) &= \lim_{p \rightarrow \infty} \tau(H_N, C) A_{ir}(t) \cdot b_{flow}(t) \cdot \text{eseq}(t) \tau(H_N, C) \lambda_n^p(t, \varphi) = \\ &= A_{ir}(t) \exp(j2\pi nt/N), \end{aligned}$$

$$ir = 1 \dots IR, \quad 0 \leq t \leq T, \quad T \leq \tau(H_N, C) \leq_{L(H_N, C)} T. \quad (7)$$

Случай 6. Для пространства $L(H_{2l}, GF(r^v))G_{nr}^p$ (пространство сплайн-функций Галуа), полученного из пространства $L(H, K)G_{nr}^p$, где $H := H_{2l}$ и $K = GF(r^v)$ есть поле Галуа, $v = 1, 2, 4, l = 1, 2, \dots$, справедливо:

$$\begin{aligned} \tau(H_{2l}, GF(r^v)) S_{ir}^p(t) &= \tau(H_{2l}, GF(r^v)) A_{ir}(t) \cdot b_{flow}(t) \cdot \text{eseq}(t) \tau(H_{2l}, GF(r^v)) \lambda_{nr}^p(t, \varphi), \\ ir &= 1 \dots IR, \quad 0 \leq t \leq T, \quad T \leq \tau(H_{2l}, GF(r^v)) \leq_{L(H_{2l}, GF(r^v))} T. \end{aligned} \quad (8)$$

Случай 7. Для пространства $L(H_{2l}, GF(r^v))G_f^p$ (пространство сплайн-функций Рейдера), полученного из пространства $L(H, K)G_f^p$, где $H = H_{2l}$ и $K = GF(r^v)$ – поле Галуа, $v = 1, l = 1, 2, \dots$, справедливо:

$$\begin{aligned} \tau(H_{2l}, GF(r^v)) S_{ir}^p(t) &= \tau(H_{2l}, GF(r^v)) A_{ir}(t) \cdot b_{flow}(t) \cdot \text{eseq}(t) \tau(H_{2l}, GF(r^v)) \lambda_{nr}^p(t, \varphi), \\ ir &= 1 \dots IR, \quad 0 \leq t \leq T, \quad T \leq \tau(H_{2l}, GF(r^v)) \leq_{L(H_{2l}, GF(r^v))} T. \end{aligned} \quad (9)$$

Случай 8. Для пространства $L(\Gamma, Z_{\dot{\mu}}[i])G_{nr}^p$ (пространство сплайн-функций Гаусса), полученного из пространства $L(H, K)G_{nr}^p$, где $H = \Gamma$ – группа целых чисел, $K = Z_{\dot{\mu}}[i]$ –

кольцо целых комплексных чисел, $\dot{\mu} = a + ib$ – целое комплексное число, справедливо:

$$\begin{aligned} \tau(\Gamma, Z_{\dot{\mu}}[i]) S_{ir}^p(t) &= \tau(\Gamma, Z_{\dot{\mu}}[i]) A_{ir}(t) \cdot b_{flow}(t) \cdot \text{eseq}(t) \tau(\Gamma, Z_{\dot{\mu}}[i]) \lambda_{nr}^p(t, \varphi), \\ ir &= 1 \dots IR, \quad 0 \leq t \leq T, \quad T \leq \tau(\Gamma, Z_{\dot{\mu}}[i]) \leq_{L(\Gamma, Z_{\dot{\mu}}[i])} T. \end{aligned} \quad (10)$$

Схема формирования навигационного радиосигнала $L1$ с использованием генератора различных базисных функций представлена на рис. 2. Принцип, положенный в основу синтеза навигационных радиосигналов в различных базисах, аналогичен классическому подходу к формированию навигационных радиосигналов, показанному на рис. 1.

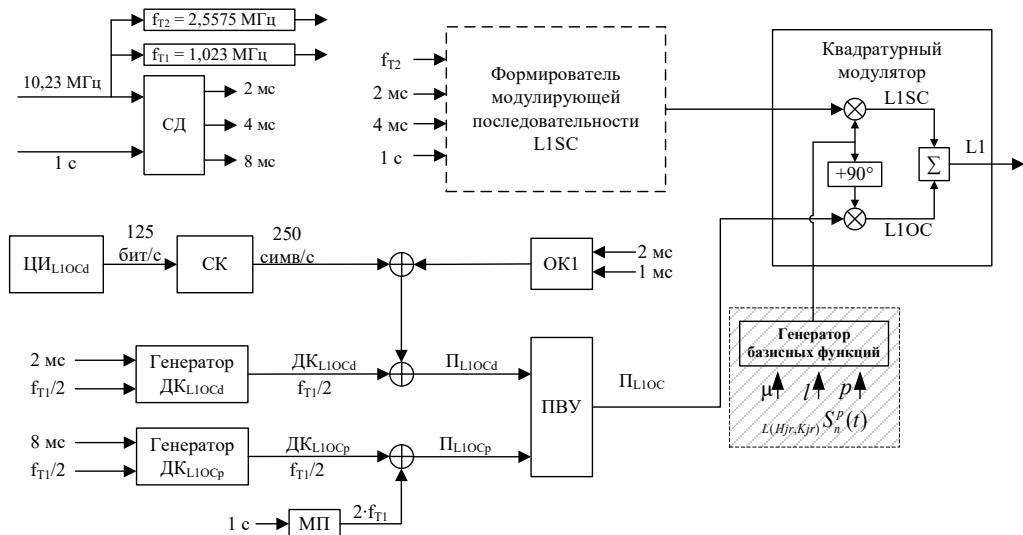


Рис. 2. Схема формирования навигационного радиосигнала $L1$ в различных базисах:
СД – синхронный делитель; ЦИ – цифровая информация; ОК – оверлейный код;
ПВУ – почищовый временной уплотнитель; ДК – дальнометрический код;
 Π – последовательность

Заключение

Таким образом, представлен новый подход к формированию навигационных радиосигналов ГНСС ГЛОНАСС на основе теории систем базисных функций. В математической записи навигационных радиосигналов типа ФМШПС в качестве манипуляционного параметра использует непосредственно базисная функция. Сформулированы частные случаи для разработанной математической модели, включающие в себя математические выражения для пространств СПВКФ, СВКФ, функций сплайн-Крестенсона, классических сплайн-функций, сплайн-функций Галуа, сплайн-функций Рейдера и сплайн-функций Гаусса. Саму процедуру формирования сигналов в различных базисах можно свести к замене формирующих базисных функций путем выбора соответствующих генераторов и фильтров, при этом сам принцип модуляции остается прежним.

Учитывая результаты предыдущих исследований, можно полагать, что скорость обработки радиосигналов в различных базисных функциях может быть существенно выше (в два – три раза) даже без аппроксимации по сравнению с аналогичной обработкой классических радиосигналов в дискретно-экспоненциальных функциях.

К основным достоинствам разработанной математической модели навигационного радиосигнала в различных базисах следует отнести:

- увеличение размерности внутренних характеристик навигационных радиосигналов, позволяющих варьировать их свойства для адаптации к сложившейся радиоэлектронной обстановке;
- сочетание преимуществ дискретной и непрерывной форм их описания, обусловленное двойственной природой базисных функций (являются непрерывными функциями, но построеными по дискретным данным), что позволяет наилучшим образом учитывать то, что навигационный сигнал формируется и обрабатывается в дискретной форме, а излучается в виде непрерывного колебания;
- возможность учета степени гладкости обрабатываемых процессов, что позволит достичь более высоких точностей при интерполяции и, следовательно, при определении значений спектральных параметров, а также экстремумов корреляционных функций;
- физическую реализуемость при конечном значении степени гладкости;
- удобство реализации и получение возможности существенного сокращения объема вычислений средствами цифровой обработки сигналов;
- возможность выбора необходимой системы базисных функций для формирования навигационных радиосигналов с требуемыми свойствами.

К направлениям дальнейших исследований в предметной области статьи можно отнести разработку методик формирования и обработки навигационных радиосигналов в различных базисах, а также проведение имитационного моделирования с целью оценки помехоустойчивости и вычислительной сложности обработки предложенных навигационных радиосигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болотнов А. С., Чепурнов И. А., Потапов В. А., Закрутный А. Е. Тенденции развития навигационных систем подвижных наземных комплексов военного назначения // Актуальные вопросы состояния и перспектив развития сложных технических систем военного назначения. – IV Всероссийская научно-практическая конференция военного учебного центра Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана: Сборник научно-методических трудов. – 2020. – С. 396-401. EDN: KKDCZS.
2. Терентьев В. В. Внедрение интеллектуальных систем на автомобильном транспорте // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – №. 1 (21). – С. 117–122.
3. Абдурахманова Ш. А. ГЛОНАСС – конкурирующая глобальная навигационная спутниковая система // Московский журнал международного права. – 2021. – № 2. – С. 217–225.
4. Агиевич С. Н. Формирование и обработка радиосигналов в базисах функций сплайн-характеров. – СПб.: Воен. акад. связи, 2014. – 224 с.
5. Агиевич С. Н. Сплайн-Виленкина-Крестенсона функции в представлении сигналов // Научное приборостроение. – 2002. Т. 12. – №. 1. – С. 79–89. EDN: HSQMXX.
6. Агиевич А. С., Луценко С. А., Тихонов С. С. Моделирование сигналов спутниковых систем связи и ретрансляции данных с применением методов сплайн-алгебраического гармонического анализа // Телекоммуникации. – 2019. – № 1. – С. 16–22. EDN: VRLYON.
7. Агиевич С. Н., Пономарев А. А., Коробкин Д. И. Применение функций сплайн-Понтрягина-Виленкина-Крестенсона при формировании сигналов OFDM // Вестник Воронежского

- государственного технического университета. – 2011. – Т. 7. – № 6. – С. 194–198. EDN: NULRVH.
- 8. Агиевич С. Н., Гусельников А. С. Слайды и аналитическая модель с квадратурно-амплитудной манипуляцией // Информация и космос. – 2008. – № 4. – С. 18–25. EDN: KWRGBX.
 - 9. Интерфейсный контрольный документ, редакция 5.1. – М.: АО «Российские космические системы». – 2008. – 105 с.
 - 10. Интерфейсный контрольный документ для сигналов ГЛОНАСС с кодовым разделением в диапазоне L1, редакция 1.0. – М.: АО «Российские космические системы» – 2016. – 64с.
 - 11. Интерфейсный контрольный документ для сигналов ГЛОНАСС с кодовым разделением в диапазоне L2, редакция 1.0. – М.: АО «Российские космические системы». – 2016. – 61с.
 - 12. Интерфейсный контрольный документ для сигналов ГЛОНАСС с кодовым разделением в диапазоне L3, редакция 1.0 – М.: АО «Российские космические системы». – 2016. – 63 с.
 - 13. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС – общее описание системы с кодовым разделением сигналов, редакция 1.0 – М.: АО «Российские космические системы». – 2016. – 115с.
 - 14. Борисов В. И., Зинчук В. М., Лимарев А. Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты // под ред. В.И. Борисова; изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: РадиоСофт, 2008. – 12 с. EDN: SMIHSV
 - 15. Луценко С. А. Модель функционирования спутниковой системы радиосвязи с фазоманипулированными широкополосными сигналами в условиях постановки преднамеренных помех // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – № 9. – С. 2. EDN: SANYNT
 - 16. Агиевич С. Н., Луценко С. А. Применение ретранслированных помех в целях воздействия на спутниковые системы радиосвязи с фазоманипулированными широкополосными сигналами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 7. – С. 411–416. EDN: VQUDDQ
 - 17. Агиевич С. Н., Луценко С. А. Оценка помехоустойчивости спутниковых систем радиосвязи с фазоманипулированными широкополосными сигналами // Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2018. – Т. 16. – С. 132–137.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

ЛУЦЕНКО Сергей Александрович, доцент кафедры Военной академии связи им. С. М. Будённого, Санкт-Петербург, кандидат технических наук, sergei_lutsenko@inbox.ru.
Sergey A. LUTSENKO, Associate Professor, Military Academy of Communications named after S. M. Budyonny, St. Petersburg, Candidate of Sciences, sergei_lutsenko@inbox.ru.

УДК 521.313

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕЙ НА СУПЕРВЫСОКОЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ОРБИТЕ

Малетин А. Н., Данилова Т. В.

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

Аннотация. Рассмотрено влияние Луны, Солнца и верхней атмосферы Земли на супервысокоэллиптическую орбиту космической станции. Показано, что стабильность данной орбиты может сохраняться около девяти месяцев. Необходимая коррекция орбиты может производиться периодически с помощью манёвров. Приведены задачи, которые могут решать космонавты на орбитальной станции в условиях длительного полёта и повышенного комфорта. Предложено использовать рассматриваемую станцию вместо двух – околоземной и окололунной.

Ключевые слова: орбитальная станция, супервысокоэллиптическая орбита, облётная и долётная траектории, апогей, перигей, Луна.

Для цитирования: Малетин А. Н., Данилова Т. В. Исследование возможности размещения космической станции, функционирующей на супервысокоэллиптической орбите // Навигация и гидрография. – 2024. – № 2 (75). – С. 43–54.

STUDY OF THE POSSIBILITY OF POSITIONING A SPACE STATION OPERATING IN A SUPER-HIGH-ELLIPTICAL ORBIT

Maletin A. N., Danilova T. V.

Military space Academy named after A.F. Mozhaisky, St. Petersburg.

Summary. The influence of the Moon, Sun and the Earth's upper atmosphere on the superhighly elliptical orbit of the space station is considered. It has been shown that the stability of this orbit can be maintained for about nine months. The necessary orbital correction can be made periodically using maneuvers. The problems that can be solved by astronauts on an orbital station under conditions of a long flight and increased comfort are presented. It is proposed to use the station in question instead of two – near-Earth and lunar.

Keywords: Orbital station, superhighly elliptical orbit, flight and landing trajectories, apogee, perigee, Moon.

For citation: Maletin A. N., Danilova T. V. Study of the Possibility of Positioning a Space Station Operating in a Super-High-Elliptical Orbit // Navigation and hydrography. – 2024. – No. 2 (75). – P. 43–54.

Введение

В соответствии с Основами государственной политики России в области космической деятельности на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу одной из задач является исследование и освоение Луны [1].

Несколько лет назад Соединённые Штаты Америки предложили всем своим партнерам по Международной космической станции стать участниками строительства новой международной орбитальной станции (ОС), известной как Lunar Orbital Platform-Gateway. Разместить эту конструкцию было предложено не на околоземной,

как все предыдущие станции, а на окололунной орбите. Поначалу американская инициатива была встречена с энтузиазмом, в том числе и в России. Однако довольно скоро отношение к проекту в нашей стране претерпело кардинальное изменение. В первую очередь потому, что нашей стране в окололунной международной ОС отводилась второстепенная роль. Это и привело, в конце концов, к тому, что Россия отказалась участвовать в проекте (рис. 1) [2].

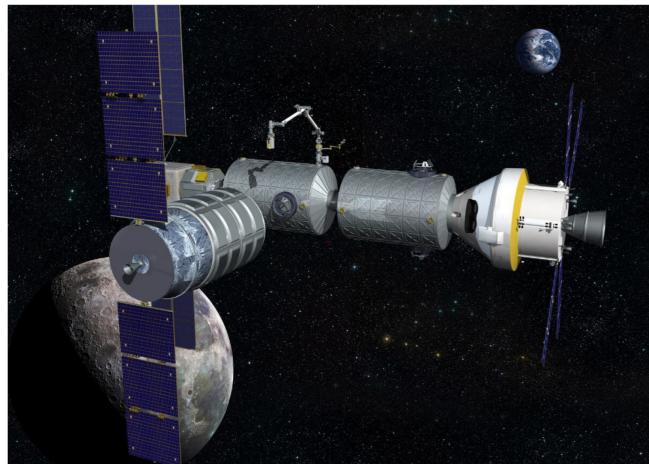


Рис. 1. Возможная конфигурация международной окололунной станции

Ракетно-космической корпорацией «Энергия» имени С. П. Королёва также сформирована концепция отечественной посещаемой платформы на окололунной орбите (рис. 2) [1].



Рис. 2. Возможная конфигурация отечественной посещаемой платформы

Далее приведён анализ облётных и долётных траекторий Луны [3, 4], чтобы выбрать оптимальную для размещения на ней ОС.

Траектории симметричного облёта в геоцентрических координатах состоят из двух половин, являющихся зеркальным отражением друг друга. Это означает, что после выхода из сферы действия Луны ОС движется как бы по продолжению той траектории, по которой она достигла сферы действия, но это продолжение повернуто на некоторый угол, т. е. обе части траектории являются составляющими одинаковых по форме, но по-разному расположенных кеплеровских орбит. Пройдя вторую часть своей симметричной траектории и обогнув Землю (если не задета атмосфера), ОС вновь восстановит свои начальные условия, но в другой точке пространства. Дальше она будет двигаться по продолжению второй части облётной траектории. Это продолжение по форме не будет отличаться от первой части облётной траектории, однако будет иначе расположено и приведёт ОС в новый район орбиты Луны. Пример такой траектории приведён на рис. 3 [3].

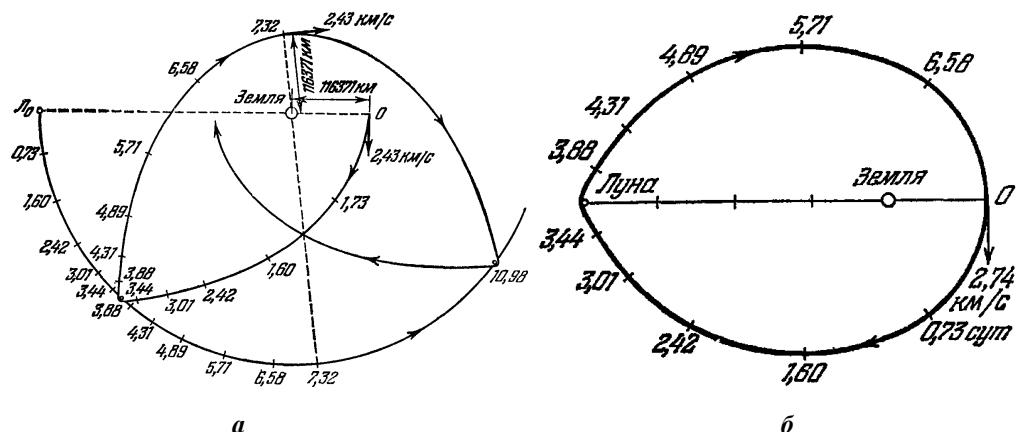


Рис. 3. Траектория периодического облёта Луны (а – в геоцентрической системе координат, б – во вращающейся системе координат)

Получив на высоте 110000 км над поверхностью Земли горизонтальную начальную гиперболическую скорость 2,43 км/с, ОС через 3,66 суток окажется над центром обратной стороны Луны на расстоянии 2000 км от него. Лунное тяготение отбросит ОС затем к Земле по симметричной ветви гиперболы, и по истечении 7,32 суток после старта восстановятся начальные условия. Следующая встреча с Луной произойдет вновь через 3,66 суток, т. е. через 10,98 суток после старта, и так далее.

В силу того, что для рассмотренной траектории минимальное расстояние от центра Земли составляет 94800 км, из-за столь большой удалённости располагать ОС на ней нецелесообразно.

Несколько менее наглядными, но не менее изящными оказываются периодические долётные траектории. На рис. 4а показана одна из них. В момент, когда Луна находится в точке Л0, ОС, получив эллиптическую горизонтальную скорость, начинает движение по траектории с апогеем А1, лежащим за орбитой Луны. Оставив позади место пересечения орбиты Луны и не встретив там Луну (она ещё туда не

дошла), она минует затем свой апогей А1 и, возвращаясь к Земле, вновь подходит к орбите Луны.

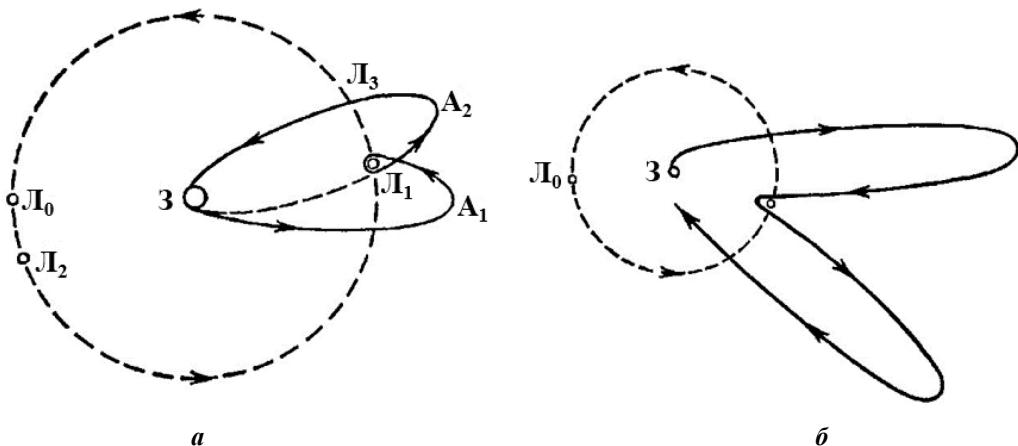


Рис. 4. Периодические долётные траектории (объяснение в тексте)

С момента отлёта с Земли прошло немного более полумесяца. За это время Луна подошла к точке Л1, и ОС попадает в сферу действия Луны. Описав под действием притяжения Луны петлю вокруг неё, станция выходит из сферы её действия «наружу» по отношению к орбите Луны с эллиптической геоцентрической скоростью и начинает движение по новой эллиптической орбите. Эта орбита отличается от предыдущей только положением большой оси в пространстве. Пройдя апогей А2, ОС вновь направляется к Земле. На этот раз, пересекая орбиту Луны, она уже не находит там Луну, которая переместилась за это время далеко вперёд, и беспрепятственно продолжает свой путь к Земле. Через полмесяца с небольшим после встречи с Луной, когда сама Луна уже оказалась в точке Л2, станция снова проходит вблизи Земли. Это происходит через месяц с небольшим после её вывода на орбиту Земли. Хотя траектория ОС не замыкается, но она проходит над поверхностью Земли в точности на той же высоте и имеет ту же по величине горизонтальную скорость, что и в начальный момент. Поэтому её новая эллиптическая траектория, показанная пунктиром, отличается от первоначальной только положением большой оси.

На рис. 4б показана другая периодическая долётная траектория. При движении по ней от встречи ОС с Луной до встречи с Землей проходит несколько менее полутора месяцев.

Далее приведены причины, которые делают периодическое сближение с возвращением практически нереальным. Во-первых, траектории периодического облёта Луны должны быть плоскими. Эта трудность преодолима. Но, во-вторых, периодический облёт возможен лишь теоретически в предположении, что орбита Луны – идеальная окружность. В-третьих, требуется высокая точность начальных условий. Например, в случае траектории, изображенной на рис. 3, начальную скорость необходимо соблюдать с погрешностью до 1 мм/с. При ошибке 1 мм/с ОС через несколько оборотов покинет сферу действия Земли [3]. В-четвёртых, здесь не учтены возмущения от Солнца и атмосферы Земли.

Постановка задачи

В связи с вышеизложенным в данной работе предлагается вариант размещения ОС, функционирующей на супервысокоэллиптической орбите (СВЭО) [5], близкой к параболической (рис. 5).

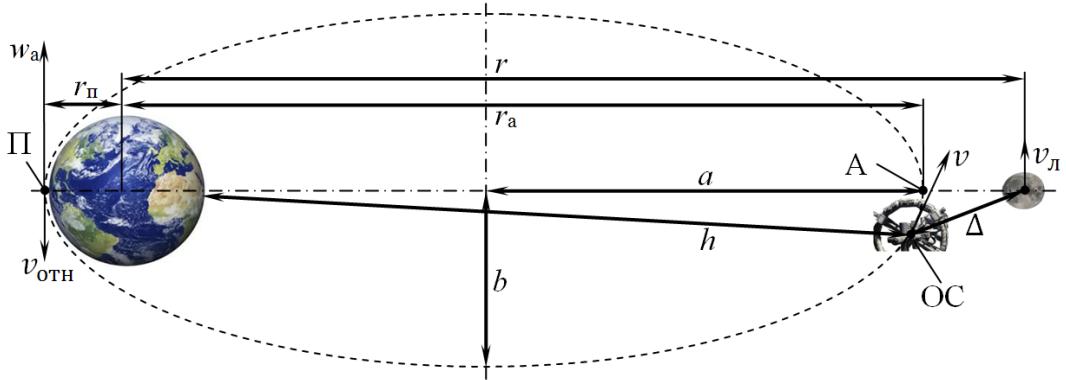


Рис. 5. Орбитальная станция, функционирующая на СВЭО (показана схематично, объяснения – в тексте)

На рис. 5 введены следующие сокращения и обозначения: a – большая полуось орбиты ОС; b – малая полуось орбиты ОС; h – текущая высота орбиты ОС; r – геоцентрическое расстояние до возмущающего тела (Луны); A – апогей орбиты ОС; Π – перигей орбиты ОС; r_a – радиус апогея орбиты ОС; r_π – радиус перигея орбиты ОС; v – текущая линейная скорость ОС; v_L – текущая линейная скорость Луны; Δ – расстояние от ОС до возмущающего тела (Луны); w_a – ускорение, обусловленное воздействием атмосферы; $v_{\text{отн}}$ – скорость ОС относительно атмосферы.

В общем виде гравитационный потенциал возмущающих сил от Солнца и Луны для ОС можно представить одинаково в следующем виде [6]:

$$U = \mu \left(\frac{1}{\Delta} - \frac{x \cdot x_B + y \cdot y_B + z \cdot z_B}{r^3} \right), \quad (1)$$

где

$$\Delta = \sqrt{(x_B - x)^2 + (y_B - y)^2 + (z_B - z)^2}, \quad (2)$$

$$r = \sqrt{x_B^2 + y_B^2 + z_B^2}, \quad (3)$$

x, y, z – геоцентрические экваториальные координаты ОС;

x_B, y_B, z_B – соответствующие координаты возмущающего тела;

μ – гравитационная постоянная возмущающего тела.

Ускорение, обусловленное воздействием атмосферы, может определяться следующей формулой [7]:

$$w_a = \frac{k_\sigma \rho v_{\text{OTH}}^2}{2}, \quad (4)$$

где $k_\sigma = c S/m$ – баллистический коэффициент;

c – безразмерный коэффициент аэродинамического сопротивления;

S – площадь максимального сечения ОС плоскостью, перпендикулярной к вектору его скорости;

m – масса ОС;

ρ – плотность верхней атмосферы Земли [8].

Принятая в данной работе модель атмосферы [7] учитывает активность Солнца по десятибалльной шкале и имеет следующее экспоненциальное представление плотности:

$$\rho = 9,81 \cdot 10^3 \cdot e^{(a_1 - a_2 \sqrt{h - a_3})}, \quad (5)$$

где коэффициенты a_i выбираются из ГОСТ Р 25645.166–2004 [9].

Методика решения задачи навигации

Для расчёта начальных значений (с индексом «0») параметров орбиты ОС («критических» между СВЭО и параболической орбитами) разработана следующая методика, которая включает последовательность выполнения следующих операций.

1. Выбор отношения числа n периодов обращений Луны T_L и ОС T_{OC} вокруг Земли и расчёт последнего:

$$T_{\text{OC}} = \frac{T_L}{n} \quad (6)$$

2. Расчёт большой полуоси орбиты ОС (см. рис. 5):

$$a_0 = \left(\frac{T_{\text{OC}} \sqrt{\mu_3}}{2\pi} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (7)$$

где μ_3 – гравитационный параметр Земли.

3. Расчёт малой полуоси орбиты ОС:

$$b_0 = a_0 \sqrt{1 - \left(\frac{a_0 v_0^2 - \mu_3}{a_0 v_0^2 + \mu_3} \right)^2}, \quad (8)$$

где v_0 – скорость, близкая ко второй космической, но не превышающая её.

4. Расчёт эксцентриситета орбиты ОС:

$$e_0 = \frac{\sqrt{a_0^2 - b_0^2}}{a_0}. \quad (9)$$

Для проведения расчётов по приведённой методике (6–9) принятые следующие исходные данные:

$$n = 5, T_{\text{л}} = 2,36 \cdot 10^6 \text{ с}, \mu_{\text{з}} = 3,98 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2, v_0 = 10,5 \cdot 10^3 \text{ м/с.}$$

Расчёты по приведённой методике показывают следующие результаты:

$$T_{\text{oc}} = 4,72 \cdot 10^5 \text{ с}, a_0 = 1,31 \cdot 10^8 \text{ м}, b_0 = 4,24 \cdot 10^7 \text{ м}, e_0 = 0,95.$$

Для проведения моделирования с использованием зависимостей (1–5) принятые следующие начальные исходные данные на 1 февраля 2024 г.:

- наклонение орбит Луны и ОС к плоскости экватора, $i_0 = 28,31^\circ$;
- аргумент восходящего узла Луны и ОС, $\Omega_0 = 61,74^\circ$;
- аргумент перигея ОС, $\omega_0 = 277^\circ$;
- истинная аномалия ОС, $\vartheta_0 = 50^\circ$;
- гравитационная постоянная Луны, $\mu_{\text{л}} = 4,9 \cdot 10^9 \text{ м}^3/\text{с}^2$;
- гравитационная постоянная Солнца, $\mu_{\text{с}} = 1,33 \cdot 10^{20} \text{ м}^3/\text{с}^2$;
- баллистический коэффициент ОС, $k_{\sigma} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{кг}$;
- время моделирования, $t = 2,12 \cdot 10^7 \text{ с}$ (9 мес.).

Интегрирование дифференциальных уравнений проводилось при использовании разработанного программного комплекса [10] методами Рунге–Кутта и Адамса четвертого порядка с учётом влияния Луны, Солнца и верхней атмосферы с шагом интегрирования 50 с. Результаты моделирования представлены на рис. 6–10.

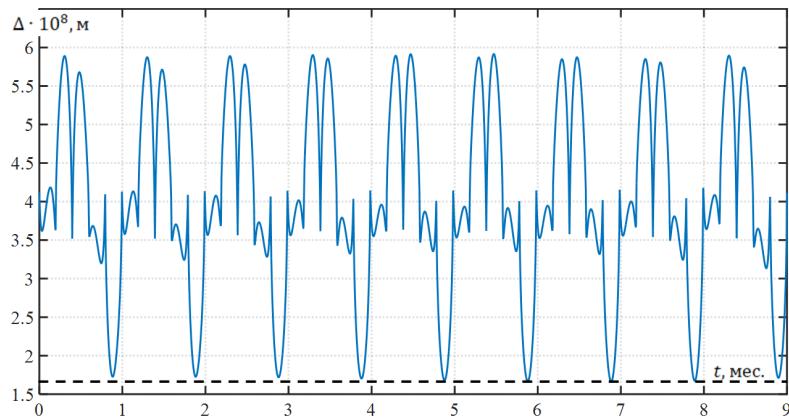


Рис. 6. Расстояние от ОС до Луны в течение 9 месяцев

Из графика на рис. 6 следует, что минимальное расстояние до Луны (локальный минимум) периодически один раз в месяц сначала незначительно уменьшается до 5-го месяца, а после 8-го месяца начинает увеличиваться (см. пунктирую линию на рис. 6), что связано с изменением фазы орбиты ОС относительно естественного спутника Земли под его влиянием.

Изменение фазы также отчётливо видно примерно через 9 месяцев полёта ОС (рис. 7).

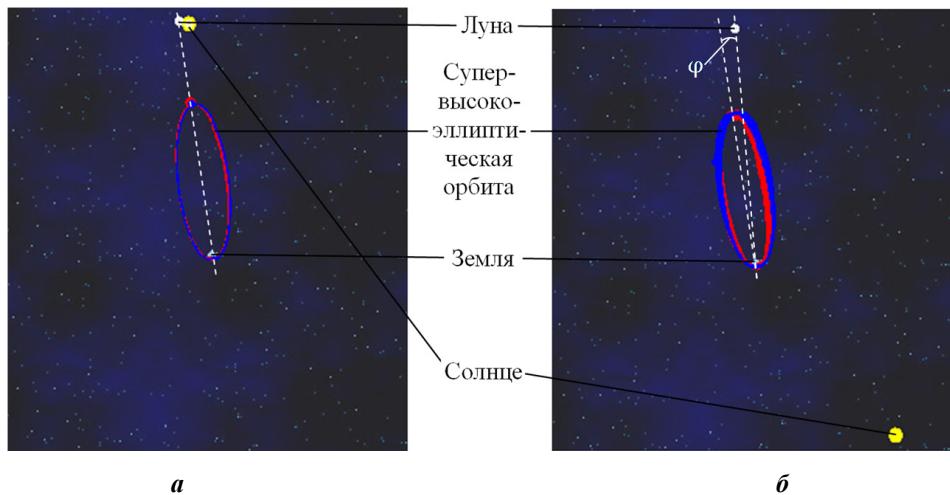


Рис. 7. Фаза между орбитами ОС и Луны примерно через 1 (а) и 9 месяцев полёта (б)

Из рис. 7а следует, что ОС (показана красной точкой), Луна (показана белой точкой) и Земля (показана голубой точкой) расположены на одной прямой, а, значит, фаза φ примерно равна нулю. Из рис. 7б следует, что ОС опережает Луну на некоторый угол φ , значит, через 9 месяцев необходимо принимать решение о проведении коррекции орбиты станции (показана красно-синим цветом). Солнце показано жёлтой точкой и расположено без соблюдения масштаба.

Рассмотрим изменение высоты орбиты ОС в течение 9 месяцев (рис. 8).

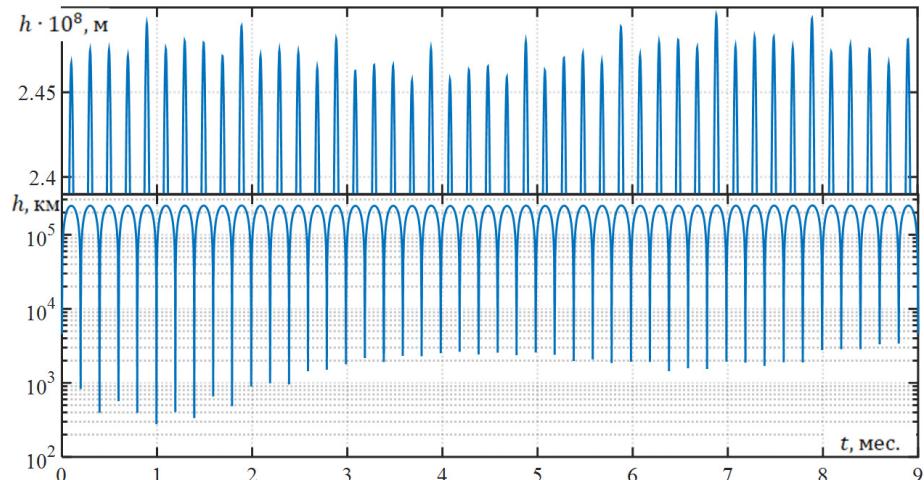


Рис. 8. Высота орбиты ОС в течение 9 месяцев

Из верхней части рис. 8, представленного в линейном масштабе, следует, что апогей орбиты ОС периодически изменяется. Также периодически один раз в месяц в связи с минимальным расстоянием между ОС и Луной под её влиянием каждые 5 периодов обращений апогей увеличивается до некоторого локального максимума. Из нижней части графика на рис. 8, представленном в полулогарифмическом масштабе,

следует, что перигей орбиты ОС изменяется плавно. Глобальный минимум наблюдается через месяц полёта ОС после возмущения орбиты Луной в апогее (см. верхнюю часть рис. 8). Через 9 месяцев необходимо принимать решение о проведении коррекции орбиты. Для этого необходимо совершить соответствующий корректирующий манёвр.

Дополнительно рассмотрим изменение модуля скорости ОС в течение 9 месяцев (рис. 9).

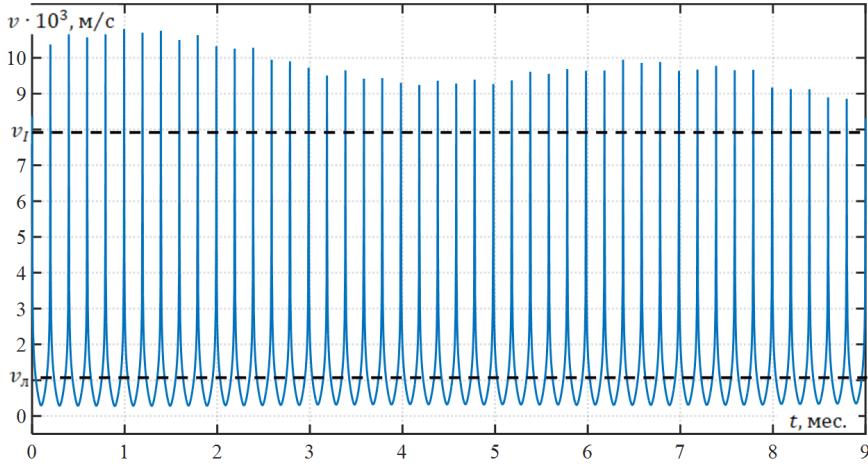


Рис. 9. Модуль скорости ОС в течение 9 месяцев

Из графика на рис. 9 следует, что максимальная скорость ОС в перигее сначала находится на уровне заданной $v_0 \approx 10,5 \cdot 10^3$ м/с, а затем плавно изменяется. Этот факт также коррелируется с результатами (изменение перигея), представленными на рис. 8. При достижении ОС первой космической скорости $v_l \approx 7900$ м/с в окрестности перигея со станцией на низкой околоземной орбите может состыковаться космический корабль (КК) с космонавтами и научной аппаратурой (НА). Примерно через месяц при достижении ОС скорости движения Луны $v_p \approx 1000$ м/с и соответствующего минимального расстояния при подлёте к ней (см. рис. 6) в окрестности апогея КК может расстыковаться со станцией и совершить корректирующий манёвр для выхода на орбиту естественного спутника Земли. В этот момент другой экипаж (смена) на втором КК стыкуется со станцией. Второй КК расстыковывается со станцией в перигее либо в его окрестности и приземляется.

В связи с изменениями орбиты ОС рассмотрим зависимости эксцентриситета, наклонения, аргументов перигея и восходящего узла от времени функционирования станции на СВЭО (рис. 10).

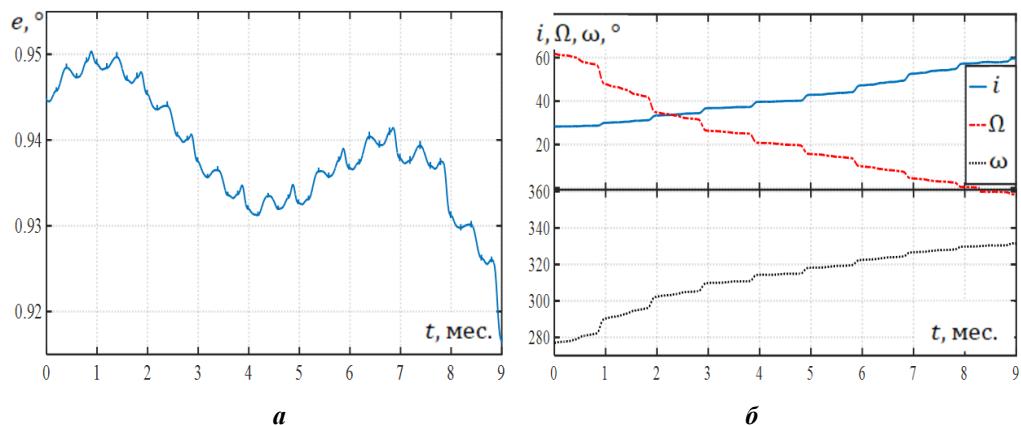


Рис. 10. Эксцентриситет (а), наклонение, аргументы восходящего узла и перигея орбиты ОС (б) в течение 9 месяцев

Из графика на рис. 10 a следует, что эксцентриситет орбиты ОС плавно изменяется до 8 месяцев полёта ОС, а затем начинает быстро уменьшаться. Локальные экстремумы наблюдаются два раза в месяц, что соответствует апогею и перигею орбиты станции. Напротив, наклонение, аргументы восходящего узла и перигея орбиты ОС до 4 месяцев изменяются ежемесячно, скачкообразно и динамично в апогее орбиты, а затем более плавно (рис. 10 b).

Основные задачи, которые может решать рассматриваемая ОС:

- безопасный и комфортный периодический перелёт космонавтов, космических туристов и колонизаторов Луны, а также доставка грузов;
- сборка и запуск со станции космических аппаратов (КА) на околоземные и окололунные орбиты, а также в точку либрации с использованием межорбитального буксира либо с помощью манёвра аппарата;
- техническое обслуживание, заправка, зарядка, ремонт и утилизация выработавших свой ресурс КА с использованием межорбитального буксира либо с помощью манёвра аппарата [11];
- доставка на Луну продовольствия, воды, НА, оборудования и топлива;
- доставка на Землю лунных полезных ископаемых;
- проведение исследований в интересах народного хозяйства, фундаментальной и прикладной науки;
- отработка НА на наружной поверхности станции в условиях воздействия факторов космического пространства (ближнего и дальнего космоса);
- опытное производство в условиях микрогравитации, невесомости и (или) вакуума;
- сборка крупногабаритных космических конструкций (антенн, телескопов, зеркал, космических платформ);
- наблюдение за космическими объектами с апогея и перигея орбиты;
- отработка новых КК, а также операций стыковки на рассматриваемой орбите;
- периодическая коррекция орбиты с помощью мощного электроракетного двигателя с незначительным расходом рабочего тела;

– использование станции в качестве базы для сборки межпланетного экспедиционного комплекса [12], а также космопорта.

Рассматриваемая станция при полномасштабном освоении Луны, в первую очередь, может использоваться как безопасное и комфортное периодическое средство доставки и возвращения космонавтов, космических туристов и колонизаторов Луны. В этом случае не нужно будет эксплуатировать две станции – околоземную (Российскую орбитальную станцию) и окололунную, а достаточно будет иметь только предлагаемый вариант станции, функционирующей между Землёй и Луной. Предлагаемая супервысокоэллиптическая ОС может быть, как посещаемой, так и обитаемой. В последнем случае разработка ОС будет представлять собой дорогостоящий проект, но она будет эксплуатироваться длительное время за счёт замены её модулей и ремонта, проводимого космонавтами.

Станция с мощными стенками корпуса может защитить экипаж от значительной части радиации, а также мелких космогенных и техногенных частиц. Модульное исполнение станции может обеспечить защиту космонавтов также от крупных метеоритов, так как при пробое одного модуля экипаж сможет быстро перейти в другой. При невозможности ремонта вышедший из строя модуль возможно заменить на новый при пролёте Земли в окрестности перигея рассматриваемой СВЭО.

Одним из методов создания искусственной гравитации является приведение станции во вращение вокруг оси, проходящей через центр масс [3]. Для этих целей возможно использовать двигатель-маховик, который раскрутит ОС до необходимой угловой скорости, а затем выключится. Угловая скорость будет далее оставаться практически неизменной, если внутри станции расстояния крупных масс от оси вращения не будут существенно изменяться, а прибывающие на станцию КК будут прикачивать только вблизи оси вращения.

Для комфорта экипажа и проведения исследований может быть установлена центрифуга малого радиуса [13], которая позволит создавать искусственную микрогравитацию хотя бы в одном из модулей. При этом полёт можно сравнить с путешествием на поезде с туалетом, душем, вагоном-рестораном и тренажёрным залом.

Остальное время на ОС могут находиться космонавты, проводя космические эксперименты и исследования. Также станция может функционировать и в автономном (законсервированном) режиме.

В дальнейшей перспективе такая ОС может стать искусственной планетой Солнца, а также прототипом межпланетного (межзвёздного) КК.

Выводы

1. Предложено эксплуатировать ОС на СВЭО с наклонением и аргументом восходящего узла Луны, а также заменяющей две станции – околоземную и окололунную.

2. С помощью разработанного программного комплекса установлено, что наибольшее возмущение на рассмотренную орбиту ОС оказывает Луна, затем Солнце и атмосфера Земли. Изменение значений параметров орбиты в апогее происходит скачкообразно при подлёте Луны.

3. Рассмотренная «критическая» СВЭО, близкая к параболической, стабильна без проведения коррекции около 8–9 месяцев при 5 периодах обращений ОС вокруг Земли за месяц.

4. Коррекцию орбиты возможно производить с помощью двигательной установки коррекции ОС.

5. Стыковку КК с ОС возможно производить в окрестности перигея орбиты на скорости, близкой к первой космической, а расстыковку – в окрестности апогея орбиты при достижении станцией линейной скорости Луны (≈ 1000 м/с) при подлёте к ней. Возвращение с Луны может происходить в обратной последовательности.

6. Приведены задачи, которые может решать рассматриваемая ОС в условиях ближнего и дальнего космоса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Микрин Е. А. Научно-технические проблемы реализации проекта «Пилотируемые космические системы и комплексы» // Космическая техника и технологии. – 2019. – № 3 (26). – С. 5–19.
2. Железняков А. Б. Форпосты человечества на околоземной орбите // Воздушно-космическая сфера. – № 4 (109). – 2021. – С. 44–54.
3. Левантовский В. И. Механика космического полёта в элементарном изложении. – М.: Наука, 1980. – 512 с.
4. Сихарулидзе Ю. Г. Баллистика и наведение летательных аппаратов. – М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2013. – 407 с.
5. Микрин Е. А., Михайлов М. В. Ориентация, выведение, сближение и спуск КА по измерениям от глобальных спутниковых навигационных систем. – М.: Издательство Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана, 2017. – 357 с.
6. Основы теории полёта КА / под общ. ред. Г. С. Нариманова. – М.: Машиностроение, 1972. – 606 с.
7. Кузнецов В. И. Автоматизированная система научных исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации КА: монография. – СПб.: Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, 2010. – Ч. 1. – 289 с.
8. Голяков А. Д., Ананенко В. М., Фоминов И. В. Системы навигации летательных аппаратов: учебник. – СПб.: Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, 2018. – 274 с.
9. ГОСТ Р 25645.166–2004 Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для баллистического обеспечения полётов искусственных спутников Земли. – М.: Издательство стандартов, 2004. – 28с.
10. Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Многофункциональная астрономическая самоорганизующаяся система автономной навигации и ориентации искусственных спутников Земли // Космические исследования. – 2017. – Т. 55. – № 2. – С. 150–166.
11. Маринин И. А. К высоким широтам // Русский космос. – 2022. – № 8. – С. 6–15.
12. Пугаченко С. Е., Козедуб Д. А. Исследование режимов обслуживания экипажем окололунной орбитальной станции-космопорта. – Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2019. – № 4. – С. 31–43.
13. Ячменникова Н. В. Следующая станция – Российская орбитальная станция // Российская газета. – 2023. – № 78 (9023). – С. 1, 14.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/INFORMATION ABOUT AUTHORS

МАЛЕТИН Андрей Николаевич, старший научный сотрудник Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, кандидат технических наук, vka@mil.ru.

Andrey N. MALETIN, Senior Researcher, Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky, Candidate of Technical Sciences, vka@mil.ru.

ДАНИЛОВА Тамара Валентиновна, старший научный сотрудник Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, кандидат технических наук, vka@mil.ru.

Tamara V. DANILOVA, Senior Researcher, Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky, Candidate of Technical Sciences, vka@mil.ru.

УДК 78.21.41.19, 78.25.31

РАСЧЕТ УГЛА ДРЕЙФА КОРАБЛЯ ОТ ВЕТРА С ПОМОЩЬЮ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ФОРМУЛЫ, ПОЛУЧЕННОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХФАКТОРНОЙ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ

Ярошенко С. А.,¹ Французов Г. А.²

¹АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», г. Санкт-Петербург.

²ВУНЦ ВМФ «Военно-Морская академия им. Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова», г. Санкт-Петербург.

Аннотация. В статье рассматривается универсальная формула расчета угла дрейфа корабля с оценкой его точности. Определены ее достоинства и недостатки. Сделано предположение о повышении точности координат места корабля при решении задачи счисления пути с автоматическим учетом угла дрейфа на основе гидрометеорологических данных, вырабатываемых корабельной гидрометеостанцией.

Ключевые слова: дрейф корабля, оценка точности, счисление, координаты, угол дрейфа, гидрометеорологические данные.

Для цитирования: Ярошенко С. А., Французов Г. А. Расчет угла дрейфа корабля от ветра с помощью универсальной формулы, полученной с использованием трехфакторной линейной регрессии // Навигация и гидрография. – 2024. – № 2 (75). – С. 55–60.

CALCULATION OF THE SHIP'S DRIFT ANGLE FROM THE WIND USING A UNIVERSAL FORMULA OBTAINED USING THREE-FACTOR LINEAR REGRESSION

Yaroshenko S. A.,¹ Frantsuzov G. A.²

¹State Research Navigation-Hydrographic Institute, JSC, St. Petersburg.

²Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N. G. Kuznetsov, St. Petersburg.

Summary. The article considers a universal formula for calculating the ship's drift angle with an assessment of its accuracy. Its advantages and disadvantages are identified. An assumption is made about improving the accuracy of the ship's position coordinates when solving the problem of dead reckoning with automatic consideration of the drift angle based on hydrometeorological data produced by the ship's hydrometeorological station.

Keywords: ship drift, accuracy assessment, dead reckoning, coordinates, drift angle, hydrometeorological data.

For citation: Yaroshenko S. A., Frantsuzov G. A. Calculation of the Ship's Drift Angle from the Wind Using a Universal Formula Obtained Using Three-Factor Linear Regression // Navigation and hydrography. – 2024. – No. 2 (75). – P. 55–60.

Угол дрейфа корабля – это угол между линией истинного курса и линией пути корабля (судна), обусловленный его сносом под слиянием ветра [1]. Учет дрейфа корабля приводит к повышению точности координат места корабля при решении задачи счисления.

По результатам испытаний для дискретных значений скоростей корабля V , скоростей кажущегося ветра W и курсовых углов между ними (далее – курсовых углов

кажущегося ветра) KU_W определяются углы дрейфа кораблей одного проекта, и составляется «Таблица углов дрейфа корабля» [1].

Современные корабли и суда ВМФ оборудуются автоматическими корабельными гидрометеостанциями (ГМСК). При сопряжении ГМСК с навигационным комплексом или прибором, реализующим аналитическое счисление, появляется возможность автоматизации процесса расчета угла дрейфа корабля за счет непрерывной выдачи ГМСК гидрометеорологических данных о скорости W и курсовом угле кажущегося ветра KU_W .

Для автоматизации процесса расчета угла дрейфа корабля целесообразно перейти от дискретных значений угла дрейфа, полученных в ходе испытаний, к непрерывным на основе функциональной зависимости вида:

$$\alpha = f(V, W, KU_W), \quad (1)$$

где α – угол дрейфа корабля, градусы;

W – скорость кажущегося ветра, узлы;

V – скорость корабля, узлы;

KU_W – курсовой угол кажущегося ветра, градусы.

В соответствии с требованиями руководящих документов ВМФ для расчета угла дрейфа используется формула Н. Н. Матусевича, разработанная в 1945 году [1]:

$$\alpha = K_\alpha \left(\frac{W}{V} \right)^2 \sin(KU_W), \quad (2)$$

где α – угол дрейфа корабля, градусы;

K_α – коэффициент дрейфа кораблей одного проекта, учитывающий их конструктивные особенности;

W – скорость кажущегося ветра, узлы;

V – скорость корабля, узлы;

KU_W – курсовой угол кажущегося ветра, градусы.

Коэффициент дрейфа кораблей одного проекта K_α в формуле (2) определяется экспериментально. Среднеквадратическое отклонение (СКО) рассчитанного угла дрейфа корабля (2) может достигать $1,6^\circ$ при соотношении скоростей кажущегося ветра и корабля $W/V \leq 3,5$ для малых судов [2].

В 1961 году для уменьшения СКО рассчитываемого угла дрейфа корабля был предложен способ математической обработки результатов испытаний, при котором полученные значения K_{α_i} осреднялись с использованием метода наименьших квадратов (МНК) [3]. Использование МНК позволило уменьшить СКО угла дрейфа корабля до $0,6^\circ$ – $1,0^\circ$, однако в действующих руководящих документах этот способ отражения не нашел.

В настоящей статье предлагается расчет углов дрейфа корабля без экспериментального определения коэффициента дрейфа кораблей одного проекта K_α и без использования отношения скоростей кажущегося ветра и корабля W/V , а не их фактических значений.

Для осреднения полученных в результате испытаний дискретных значений скоростей корабля V_i , кажущегося ветра W_i , и курсовых углов между ними KU_{W_i} как независимых переменных, а углов дрейфа корабля α_i как зависимых переменных,

используем аппарат регрессионного анализа. С учетом приведенных ниже ограничений и допущений:

- дрейф корабля на стопе не рассматривается;
- в зависимости от курсового угла кажущегося ветра угол дрейфа корабля принимается симметричным относительно мидель шпангоута [3, 2];
- водоизмещение корабля принимается стандартным.

Тогда универсальное уравнение трехфакторной линейной регрессии угла дрейфа корабля будет иметь вид:

$$\alpha'_i = b_0 + b_1 \text{KY}_{w_i} + b_2 W_i + b_3 V_i, \quad (3)$$

где b_1, b_2, b_3 – коэффициенты уравнения;

$\text{KY}_{w_i}, W_i, V_i$ – независимые переменные;

α'_i – модельное значение угла дрейфа (зависимая переменная);

b_0 – свободный член уравнения.

Для нахождения коэффициентов b_1, b_2, b_3 и свободного члена b_0 универсального уравнения трехфакторной линейной регрессии (3) построим систему уравнений:

$$\begin{cases} nb_0 + b_1 \sum \text{KY}_{w_i} + b_2 \sum W_i + b_3 \sum V_i = \sum \alpha'_i \\ b_0 \sum \text{KY}_{w_i} + b_1 \sum \text{KY}_{w_i}^2 + b_2 \sum \text{KY}_{w_i} W_i + b_3 \sum \text{KY}_{w_i} V_i = \sum \alpha'_i \text{KY}_{w_i} \\ b_0 \sum W_i + b_1 \sum \text{KY}_{w_i} W_i + b_2 \sum W_i^2 + b_3 \sum W_i V_i = \sum \alpha'_i W_i \\ b_0 \sum V_i + b_1 \sum \text{KY}_{w_i} V_i + b_2 \sum W_i V_i + b_3 \sum V_i^2 = \sum \alpha'_i V_i \end{cases}. \quad (4)$$

Решив систему уравнений (4) методом Крамера по исходным данным для четырех проектов надводных кораблей водоизмещением от 700 до 7000 тонн, получим:

$$\begin{cases} b_0 = 0,07 \\ b_1 = 0,02 \\ b_2 = 0,07 \\ b_3 = -0,09 \end{cases}, \quad (5)$$

где коэффициенты b_1, b_2, b_3 (5) являются статистически значимыми на уровне $\alpha_{\text{зн}} = 0,05$, при проверке с помощью t -критерия Стьюдента.

Подставив полученные коэффициенты b_1, b_2, b_3 (5) в уравнение (3) и пренебрегая свободным членом (что увеличит СКО всего на $0,02^\circ$), получим универсальную формулу угла дрейфа корабля:

$$\alpha = 0,02 \text{KY}_w + 0,07W - 0,09V. \quad (6)$$

Основными достоинствами универсальной формулы угла дрейфа корабля (6) можно считать простоту выполняемых расчетов и отсутствие требований к знанию конструктивных особенностей различных проектов кораблей, учитываемых через коэффициент K_α .

Оценим СКО углов дрейфа, рассчитанных с использованием универсальной формулы (6):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\alpha_i - \alpha'_i)^2}{n-m-1}} = 1,07^\circ \approx 1,1^\circ, \quad (7)$$

где n – объем выборки для четырех проектов надводных кораблей ($n = 651$);
 m – число факторных признаков ($m = 3$);
 α_i – i -е значение угла дрейфа;
 α'_i – i -е модельное значение угла дрейфа.

Полученное СКО меньше, чем у формулы Н. Н. Матусевича (2), но больше, чем формулы Н. Н. Матусевича, уточненной с использованием метода наименьших квадратов для осреднения коэффициента K_{α_i} [3].

Для оценки качества полученной формулы (6), вычислим ее скорректированный совокупный коэффициент детерминации:

$$R_{\text{скор}}^2 = 1 - \left(1 - \frac{\sum(\alpha'_i - \mu_\alpha)^2}{\sum(\alpha_i - \mu_\alpha)^2}\right) \cdot \frac{n-1}{n-m-1} = 0,43, \quad (8)$$

где μ_α – математические ожидание угла дрейфа.

Рассчитанный с помощью выражения (8) скорректированный совокупный коэффициент детерминации, равный 0,43, является статистически значимым на уровне $\alpha_{3n} = 0,05$ при проверке с помощью F -критерия Фишера, однако величина коэффициента 0,43 свидетельствует о низком качестве приведенной выше универсальной формулы угла дрейфа корабля (6). Для повышения качества модели угла дрейфа корабля, полученной с применением регрессионного анализа, в дальнейшем представляется целесообразным перейти от линейной к нелинейным трехфакторным регрессионным моделям, применительно к конкретному проекту корабля.

Кроме того, в формуле (6) дисперсия остатков неодинакова для каждого модельного значения угла дрейфа α'_i , т. е. отсутствует гомоскедастичность остатков. Такой же недостаток наблюдается и у формулы Н. Н. Матусевича (2), что подтверждено отрицательными результатами тестов Голдфелда-Куандта на уровне $\alpha_{3n} = 0,05$ при проверке с помощью F -критерия Фишера [3].

При всех рассмотренных выше недостатках предлагаемой формулы (6) использование универсальной формулы угла дрейфа корабля представляется целесообразным для априорного формирования предварительной таблицы дрейфа корабля нового проекта до проведения заводских и государственных ходовых испытаний с последующим ее уточнением по результатам определения углов дрейфа кораблей одного проекта на выходах в море. Результаты расчетов углов дрейфа корабля, выполненные по универсальной формуле (6) представлены в таблице.

Углы дрейфа корабля, рассчитанные по универсальной формуле (6)

<i>W</i>	5	5	5	10	10	10	15	15	15	20	20	20
<i>KUw/V</i>	6	10	15	6	10	15	6	10	15	6	10	15
15	0,1	0,0	0,0	0,5	0,1	0,0	0,8	0,5	0,0	1,2	0,8	0,4
30	0,4	0,1	0,0	0,8	0,4	0,0	1,1	0,8	0,3	1,5	1,1	0,7
45	0,7	0,4	0,0	1,1	0,7	0,3	1,4	1,1	0,6	1,8	1,4	1,0
60	1,0	0,7	0,2	1,4	1,0	0,6	1,7	1,4	0,9	2,1	1,7	1,3
75	1,3	1,0	0,5	1,7	1,3	0,9	2,0	1,7	1,2	2,4	2,0	1,6
90	1,6	1,3	0,8	2,0	1,6	1,2	2,3	2,0	1,5	2,7	2,3	1,9

Отметим достоинства приведенной выше таблицы углов дрейфа корабля, полученной на основе формулы (6):

- на первых выходах корабля нового проекта в море в целях обеспечения безопасности плавания она может использоваться для учета углов дрейфа;
- оценено СКО значений, рассчитанных по формуле (6) и приведенных в таблице;
- появление у штурмана возможности выбора для включения в таблицу углов дрейфа, рассчитанных по дискретным значениям скоростей кажущегося ветра и корабля, актуальным для ведения счисления при решении специальных задач.

Выводы

1. Предложена универсальная формула для расчета углов дрейфа корабля, полученная с использованием трехфакторной линейной регрессии. Определены ее достоинства и недостатки.
2. Оценено среднеквадратическое отклонение (СКО) угла дрейфа, полученного с использованием универсальной формулы.

3. Выдвинута гипотеза о повышении точности счисления пути корабля при сопряжении корабельной гидрометеостанции (ГМСК) с навигационным комплексом или прибором, реализующим аналитическое счисление, за счет непрерывной выдачи ГМСК гидрометеорологических данных о скорости *W* и курсовом угле кажущегося ветра *KUw*.

Представляется целесообразным дальнейшее решение задачи расчета угла дрейфа корабля с меньшим СКО и наличием гомоскедастичности модели путем построения трехфакторной нелинейной регрессионной модели угла дрейфа для конкретного проекта корабля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник гидрографа по терминологии: справочник / Е.Л. Филиппов, Н.Н. Никитин и др. – СПб.: ЦКП ВМФ, 1984. – 286 с. Практическое кораблевождение. Книга первая / под ред. адмирала Михайловского А. П.; гл. ред. и автор А. Н. Мотрохов и др. – СПб.: ГУНиО МО, ЦКФ ВМФ, 1988. – 896 с.
2. Матусевич, Н.Н. Методы определения ветрового дрейфа малых кораблей: / Н.Н. Матусевич – Ленинград: Военно-Морская ордена Ленина Академия имени К. Е. Ворошилова, 1945. – 95 с.
3. Курс кораблевождения: Том I: Навигация / Г. П. Попенко, Е. П. Соломатин. Управление гидрографической службы военно-морского флота. – СПб.: Картфабрика ВМФ, 1961. – 546 с.
4. Кадочникова Е. И., Варламова Ю. А. Статистический анализ пространственных данных. Учебное пособие. – Казань: Издательство Казанского университета, 2023. – 140 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

ЯРОШЕНКО Сергей Андреевич, заместитель начальника лаборатории АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», доктор технических наук, доцент, serg-tk13@yandex.ru.

Sergei A. YAROSHENKO, Deputy Head of the Laboratory of State Research Navigation-Hydrographic Institute, Doctor of Technical Sciences, Reader, serg-tk13@yandex.ru.

ФРАНЦУЗОВ Геннадий Андреевич, адъюнкт кафедры Штурманской службы ВУНЦ ВМФ «Военно-Морская академия им. Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова», shturmanssv@mail.ru.

Gennadiy A. FRANTSUZOV, Adjunct of the Department of Navigation service at the Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N. G. Kuznetsov, shturmanssv@mail.ru.

ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ

УДК 621.396

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ И РАЗВИТИЯ МОРСКОЙ ПОДСИСТЕМЫ ГЛОБАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛИ

Катенин В. А.,¹ Чубыкин А. А.,¹ Ойстрик А. К.²

¹АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», г. Санкт-Петербург.

²Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П. С. Нахимова, г. Севастополь.

Аннотация. Рассматриваются вопросы повышения эффективности навигационного обеспечения ГЛОНАСС за счет учета геодезических параметров Земли прецизионной точности, полученных с помощью перспективной Глобальной системы мониторинга геодезических параметров Земли.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, Глобальная система мониторинга геодезических параметров Земли, эффективность навигационного обеспечения, гравитационное поле, дерево целей.

Для цитирования: Катенин В. А., Чубыкин А. А., Ойстрик А. К. Концепция создания и развития морской подсистемы глобальной системы мониторинга геодезических параметров Земли // Навигация и гидрография. – 2024. – № 2 (75). – С. 61–75.

CONCEPT OF THE CREATION AND DEVELOPMENT OF THE MARITIME SUBSYSTEM OF THE GLOBAL SYSTEM FOR MONITORING GEODETIC PARAMETERS OF THE EARTH

Katenin V. A.,¹ Chubykin A. A.,¹ Oystrik A. K.²

¹State Research Navigation-Hydrographic Institute, JSC, St. Petersburg.

²Admiral Nakhimov Naval Academy, Sevastopol.

Summary. The article addresses issues of improving the efficiency of GLONASS navigation support by accounting for high-precision geodetic parameters of the Earth obtained through the prospective Global System for Monitoring Geodetic Parameters of the Earth.

Keywords: GLONASS, Global Geodetic Observing System (GGOS), navigation support efficiency, gravitational field, goal tree.

For citation: Katenin V. A., Chubykin A. A., Oystrik A. K. Concept of the Creation and Development of the Maritime Subsystem of the Global System for Monitoring Geodetic Parameters of the Earth // Navigation and hydrography. – 2024. – No. 2 (75). – P. 61–75.

Эффективность навигационного обеспечения Вооруженных сил и экономики Российской Федерации во многом обусловлена качеством глобальной навигационной

спутниковой системы ГЛОНАСС. К сожалению, характеристики отечественной ГЛОНАСС значительно уступают американской GPS, в том числе и по причине недостаточной изученности геодезических параметров Земли.

Повышение эффективности функционирования ГЛОНАСС может быть достигнуто за счёт повышения точности геодезического обеспечения, которое заключается в предоставлении данных по фундаментальным параметрам Земли, геодезической координатной системы, параметрам гравитационного поля Земли. Данная задача может быть решена на основе создания отечественной Глобальной системы мониторинга геодезических параметров Земли.

Первым шагом при совершенствовании существующих и разработке новых средств измерения геодезических параметров Земли, формирующих их качественный облик, является этап обоснования и выработки тактико-технических требований к ним. Этот этап является наиболее сложным, поскольку в большинстве случаев не существует формальных (аналитических) способов определения количественных характеристик исследуемых средств. Приходится опираться на экспертное мнение или произвольно (в определенной пропорции) ужесточать технические характеристики существующих средств. Такой подход, очевидно, не является оптимальным. Тем не менее он дает приближенное решение имеющейся проблемы.

Фундаментальный сегмент глобальной навигационной системы не входит в состав космической системы ГЛОНАСС, однако его развитие в предыдущие годы осуществлялось в рамках федеральной целевой программы ФЦП «ГЛОНАСС 2012–2020» [1], а в настоящее время выполняется в соответствии с федеральным проектом «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» в рамках государственной программы Российской Федерации «Космическая деятельность России в 2021–2030 годах». К концу 2020 г. ГЛОНАСС не достигла требуемых в ФЦП «ГЛОНАСС 2012–2020» показателей точности, таких как $Q_{2.2}$; Q_2 ; $Q_{4.1}$ и Q_5 (расшифровка и требуемые значения этих параметров приводятся в первой строке табл.1).

В ходе выполнения ФЦП «ГЛОНАСС 2012–2020» разработаны и отработаны в космических экспериментах на навигационных космических аппаратах (НКА) «Глонасс-М» лазерные средства обеспечения точности космического сегмента ГЛОНАСС. В результате натурных экспериментов и моделирования показано, что конкурентоспособная точность ГЛОНАСС может быть достигнута только при развёртывании следующих лазерных систем:

- МЛНСС – межспутниковой лазерной навигационно-связной системы;
- ЛНИСП – лазерного наземного измерительно-связного пункта наземного терминала МЛНСС;
- КОС-НБКОС – колокации квантово-оптической системы (КОС – лазерного дальномера) и наземной беззапросной КОС, формирующей синхроимпульсы наземной лазерной шкалы времени;
- ББКОС – бортовой беззапросной КОС, принимающей наземные лазерные импульсы и определяющей их положения относительно импульсов бортовой (спутниковой) шкалы времени;
- КРС – спутниковой круговой ретрорефлекторной системы, обеспечивающей ретрансляцию лазерных импульсов наземной КОС для измерения двухпутевой (истинной) дальности между КОС и навигационным КА (НКА) ГЛОНАСС.

Ожидаемое улучшение целевых показателей точности космического сегмента ГЛОНАСС в случае частичного и полного развертывания разработанных в рамках ФЦП «ГЛОНАСС 2012–2020» лазерных средств и сети радиотехнических средств наземной поддержки беззапросных измерительных станций (БИС) представлено в табл. 1.

Развёртывание лазерных средств в составе космической системы начато в 2021 году. Пока точность космического сегмента ГЛОНАСС примерно соответствует состоянию 2014 года.

Лазерные средства обладают недостижимой для других средств точностью и скрытностью, поэтому перспективны как для оперативного (особенно в условиях массированного помехового подавления радиотехнических каналов навигационного и эфемеридно-временного обеспечения), так и фундаментального (в локации с геодезическими, астрономическими средствами) обеспечения глобальной навигации. Таким образом, развитие лазерных средств имеет ключевое значение для решения основной технической задачи отечественной спутниковой навигации, а именно интегрирование средств и методов фундаментального сегмента в реальный контур управления системой ГЛОНАСС к 2030 году [2] с целью обеспечения технологической независимости системы и достижения целевых показателей дециметровой точности.

Таблица 1. Улучшение целевых показателей точности космического сегмента при использовании ГЛОНАСС при комплексном использовании БИС и лазерных средств (МЛНСС, ББКОС, КРС, ЛНИСП, КОС-НБКОС)

Целевые показатели	Составляющая эквивалентной погрешности измерений псевдодальности за счёт погрешности бортовой ЭВИ $(Q_{2.2})$ (0,3 м в 2020 г.)	Погрешность определения местоположения в реальном времени в государственной геоцентрической системе координат за счёт космического сегмента без использования систем функциональных дополнений (Q_2) (0,6 м в 2020 г.)	Погрешность определения времени потребителя по системной шкале времени за счёт космического сегмента $(Q_{4.1})$	Погрешность согласования системной шкалы времени с национальной шкалой времени UTC (SU) (Q_5)	Погрешность Δt БШВ конкретного НКА по отношению к среднему ансамблю НКА	Возможность и время предупреждения потребителей о нарушении целостности навигационного обеспечения (с) через космический комплекс ГЛОНАСС	
Состав измерительного комплекса	1	2	3	4	5	6	7
10 станций БИС НКУ территории РФ*)		1,4 м	2,8 м	5 нс	10...35 нс	до 3 нс	Невозможно вследствие отсутствия глобальных средств измерения и закладки на КА
Международная сеть БИС и МЛНСС на всех КА		0,3 м*)	0,6 м	1÷2 нс	4...10 нс	1 нс	Невозможно вследствие отсутствия глобальных средств закладки на КА с требуемой частотой до 6...10 с
10 станций БИС НКУ территории РФ и МЛНСС на всех КА «Глонасс-К2»		0,7 м**) Улучшение почти в 4,7 раза	1,4 м Улучшение почти в 4,7 раза	2,1 нс Улучшение в (2,5÷5) раз	4...8 нс Улучшение в (3,5÷8,7) раз	<1 нс Улучшение в три раза	Невозможно вследствие отсутствия глобальных средств измерения

Гидрография и морская картография

1	2	3	4	5	6	7
10 станций БИС НКУ территории РФ и ББКОС на всех КА «Глонасс» К1 и К2 и ежечасное обновление ЭВИ с использованием МЛНСС и БАМИ	0,3 м ^{***})	0,6 м	0,5	4 нс, не более	(0,5÷1) нс	Невозможно вследствие отсутствия глобальных средств измерения
Международная сеть БИС с полномасштабным развертыванием МЛНСС и БКОС	0,1 м ^{****})	0,1 м ^{****})	0,5 нс	1 нс, не более	0,5 нс	Закладка на КА с требуемой частотой до 6...10 с с использованием МЛНСС
Примечания	По результатам КЭ «Смерч-Л» СКО МЛНСС $\sigma = 3$ см, не более; По результатам КЭ на КА «Глонасс-М» № 748 СКО оценки расхождения шкал времени на основе сравнения одно- двухпутевых дальностей ББКОС-КОС НБКОС, $\sigma_{\Delta t} = (0,036-0,1)$ нс.					

*) Для суточной нестабильности БСУ $5 \cdot 10^{-14}$ (Глонасс-М, Глонасс-К1).

**) При использовании МЛНСС точность ЧВП, определяемых на борту, по оценкам будет определяться с погрешностью 0,3 нс. С учётом точности эфемерид 0,7 м получим ЭПД порядка 0,7 м.

***) При нестабильности БСУ равной (или большей) 10^{-13} без лазерных средств выполнение требований ФЦП «ГЛОНАСС 2012–2020» невозможно.

****) На основе ежеминутной закладки с помощью МЛНСС для обеспечения высокоточной навигации, обеспечивающей технологию «PPP».

Такой высокий уровень требований может быть реализован на принципиально новом уровне геодезического обеспечения и, в частности, путем учета вариаций гравитационного поля Земли (ГПЗ) под воздействием различных факторов.

Результаты проведённого анализа требований к геодезическому обеспечению дальнейшего развития ГЛОНАСС можно обобщить в виде данных о требуемых геодезических параметрах и их точности для их использования при эфемеридно-временном обеспечении ГЛОНАСС. Эти данные представлены в табл. 2 [3, 4].

Таблица 2. Фундаментальные геодезические постоянные и параметры гравитационного поля Земли, требуемые для геодезического обеспечения ГЛОНАСС

№ п/п	Наименование параметра	Ед. изм.	Известное значение параметра (диапазон изменения)	Пространственный охват	Требуемая точность	Пространственная дискретность
1	2	3	4	5	6	7
1	Геоцентрическая гравитационная постоянная	$\text{м}^3/\text{с}^2$	$398600441 \cdot 10^6$	глобальный	$2 \cdot 10^{-9}$	
2	Средняя угловая скорость суточного вращения Земли	рад/с	$7292115 \cdot 10^{-11}$	глобальный	$1 \cdot 10^{-7}$	
3	Разность главных центральных моментов инерции Земли			глобальный	$1,5 \cdot 10^{-8}$	
4	Большая полуось эллипсоида вращения, уровенного для нормального потенциала силы тяжести	м	$6378136,6 \pm 0,1$	глобальный	$1,5 \cdot 10^{-8}$	
5	Коэффициенты разложения потенциала тяготения по сферическим функциям C_{nk}, S_{nk}	безразмерный	от 10^{-6} до 10^{-3}	степень и порядок разложения: $n = 360$ $m = 360$		
6	Ускорение силы тяжести	мГал	от 977200 до 982400	Глобальный	1	$30' \times 30'$
7	Высота геоида	м	от (-100) до (+80)	Глобальный	0,1–0,5	$30' \times 30'$
8	Статистическая модель геоида	мм			1	10 км
9	Изменяющаяся во времени модель геоида	мм			1	50 м

Известно, что Мировой океан составляет 70% земной поверхности, поэтому морская гравиметрическая съемка занимает важнейшее место в получении исходных данных для моделирования ГПЗ, в том числе и для геодезического обеспечения ГЛОНАСС. Удовлетворить столь жесткие требования к геодезическим параметрам нам представляется возможным за счет комплексного использования новых средств и методов.

На рис. 1 изображен возможный качественный состав Глобальной системы мониторинга геодезических параметров Земли (ГСМГПЗ). Красным цветом отмечены элементы ГСМГПЗ, отсутствующие в отечественной практике изучения Земли.

ГСМГПЗ представлена древовидной иерархической структурой, получившей название «дерево целей».

Первый уровень – название и назначение системы.

Второй уровень – решаемые ГСМГПЗ задачи. В сжатом виде их можно сформулировать следующим образом:

1. **Геокинематика** – определение размера, формы, движения, деформации Земли.

Цель измерений: определение формы и временных вариаций поверхности суши/льдов/океанов (движение тектонических плит, вулканическая активность, землетрясения, ледники, уровень океанов).

2. **Вращение Земли** – определение прецессии, нутации, движения полюса, вариаций продолжительности суток.

Цель измерений: определение изменений углового момента и тензора инерции (изменение масс в атмосфере, криосфере, океанах, коре и мантии Земли).

3. **Гравитационное поле Земли** – определение ГПЗ.

Цель измерений: определение геоида, статического гравитационного потенциала Земли и его вариаций.

4. **Общеземная система координат.**

Цель измерений: создание глобального кластера опорных точек, определённых на миллиметровом уровне точности.

Третий уровень определяет сегменты и основные элементы системы.

Четвертый уровень определяет методы измерений. Среди них следует выделить наиболее перспективные методы, которыми являются:

- метод многоспутниковой альтиметрии [5];
- спутниковые методы, в том числе с использованием лазерных средств измерения межспутниковых расстояний, а также лазерных средств для контроля навигационных космических аппаратов в орбитальной группировке [6];
- метод высокоточного мониторинга ГПЗ с использованием малых космических аппаратов [6, 7];
- методы лазерного картографирования морского дна [8];
- методы градиентометрии [9];
- метод мониторинга ГПЗ с использованием океанографических ИСЗ, глобальной сети океанографических буев и геодезических полигонов.

Пятый уровень определяет основные средства измерений. Особое место здесь занимают средства измерения гравитационного поля Земли (ГПЗ), которые в части морской составляющей ГСМГПЗ имеют исключительно важное значение для подводной навигации, применения ракетного оружия морского базирования и космической навигации. Для решения задач высокоточной навигации и геодезии необходимо знать абсолютное значение ускорения силы тяжести (ускорение свободного падения) в текущем местоположении объекта, поэтому одной из ключевых проблем современной гравиметрии является высокоточное измерение полного значения ускорения силы тяжести с динамических объектов [9].

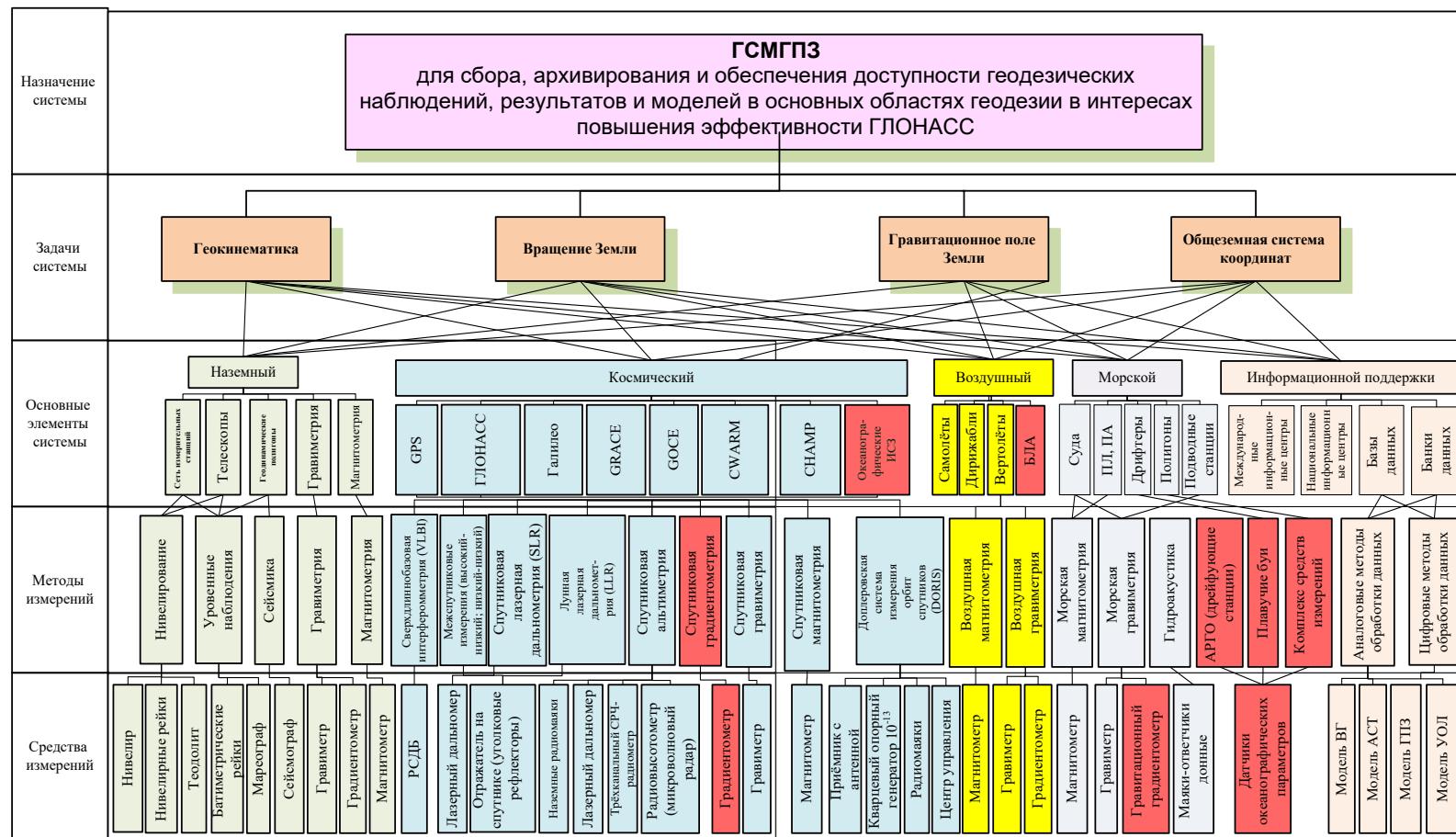


Рис. 1. Возможный качественный состав отечественной Глобальной системы мониторинга геодезических параметров Земли

В настоящее время выявились перспективные направления развития средств изучения гравитационного поля Земли в интересах фундаментальной науки и практики. К ним в первую очередь следует отнести:

- методы векторной аэрогравиметрии на основе бескарданных инерциальных навигационных систем;
- средства измерения вторых производных геопотенциала на подвижном основании;
- градиентометры для высокоточной автономной навигации и космических миссий.

Создание качественно новых средств изучения ГПЗ требует решения, помимо технических вопросов, и ряда проблем, связанных с географией их использования. Например, одной из существенных проблем создания и функционирования отечественной ГСМГПЗ является пространственное расширение сети наземных пунктов измерения.

Поскольку пространственное расширение национальной сети наземных измерительных станций ограничено, решение проблемы представляется возможным двумя путями:

- в международной кооперации с известными международными сервисами путем предоставления территории для взаимообратной организации измерительных станций на зарубежной территории, участие в совместных космических проектах и обмене информацией гравиметрической информацией с зарубежными центрами;
- в разработке отечественной ГСМГПЗ с преимущественным влиянием космических геодезических систем и применением лазерных технологий получения прецизионных геодинамических данных о Земле, а также океанографических исследовательских подводных лодок, якорных и дрейфующих (плавучих) исследовательских буев.

В связи с непрекращающимися международными санкциями по отношению к РФ, в том числе и по обмену научной и другой информацией, предпочтительным является второй путь.

Отдельно следует выделить проблему получения данных о ГПЗ из труднодоступных районов Мирового океана, к которым можно отнести, в первую очередь, Арктический бассейн (острова Северная Земля, Новосибирские острова и Земля Франца Иосифа), а также размещение донных станций в Баренцевом, Карском морях, море Лаптевых и Восточно-Сибирском море. В этих районах для нужд исследования морского дна и других измерений ГПЗ целесообразно развернуть сеть океанологических станций, а в отдельных районах – геодезические полигоны. При необходимости целесообразно развернуть сеть дрейфующих буев, в том числе и на льду. Особую роль в изучении Арктического бассейна и других труднодоступных мест Мирового океана должны сыграть океанографические искусственные спутники Земли (ИСЗ) и подводные лодки. Данные, получаемые от перечисленных средств, оперативно (по каналам спутниковой связи) могут передаваться в береговые центры обработки, анализа и хранения информации.

Изучение гравитационного поля осуществляется в настоящее время двумя способами: по моделям и непосредственно с помощью измерений (чисто гравиметрическим методом).

В мировой практике разработаны модели переменного во времени поля силы тяжести, основанные на использовании геофизических моделей окружающей среды. К

последним относятся модели планетарной атмосферы, Мирового океана, континентальной гидрологии и ледового покрытия суши. Кроме того, поле силы тяжести изменяется из-за геотектонических процессов в земной коре, таких как непрерывное ледниковое изостатическое выравнивание и внезапные землетрясения с со-сейсмическими и постсейсмическими сигналами.

Объединённая модель преобразована в сферический гармонический ряд поля силы тяжести Земли с коэффициентами степени до 180-й и пространственным глобальным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ широты и долготы.

С другой стороны, в этой области степеней коэффициентов разложения влияние переменной составляющей океанского прилива возрастает и становится одним из важнейших факторов, определяющих точность модели ГПЗ. В связи с этим перспективная отечественная ГСМГПЗ должна не уступать достигнутому мировому уровню, т.е. при создании глобальных моделей ГПЗ требуется увеличивать степень N разложения геопотенциала в ряд по сферическим функциям до 180 степени.

Чисто гравиметрический метод имеет разрешающую способность, ограниченную разрешающей способностью съёмки. Точность метода зависит от точности и полноты исходной информации для гармонического анализа аномалий силы тяжести, измеренных на земной поверхности, а также от методов их предварительной обработки (вывода средних значений для элементарных трапеций, учёта влияния рельефа) и наибольшей степени учитываемых гармоник.

Значительный круг задач геофизики, геодезии, навигации в настоящее время успешно решается при использовании аномалий силы тяжести, осреднённых по стандартным равновеликим трапециям $1^\circ \times 1^\circ$ с точностью порядка $10^{-5}g$.

Сети постоянных гравиметрических пунктов должны быть дополнены авиационными и судовыми съёмками, чтобы собрать данные по большим площадям, которые лишены гравиметрических измерений.

Анализ элементов пятого уровня позволяет сформировать программу разработки перспективных средств и методов изучения Мирового океана с научным обоснованием тематических карточек на конкретные образцы измерительной техники и их носителей.

Парк необходимых для ГСМГПЗ бортовых (спутниковых) средств представлен на рис. 2.

Лазерные локационные методы и средства получения данных для ГСМГПЗ с использованием средств космического сегмента можно условно квалифицировать на:

– глобальные и крупномасштабные, которые оцениваются на основе первых коэффициентов разложения геопотенциала по сферическим функциям;

– региональные и локальные явления, в том числе, случайно изменяющиеся на коротких интервалах времени, которые оцениваются по вариациям силы тяжести (гравитационного ускорения) при детальном мониторинге с высокоточной картографической привязкой изменений гравитационного поля.



Рис. 2. Необходимый парк спутниковых средств Глобальной системы мониторинга геодезических параметров Земли

Для получения данных о глобальных и крупномасштабных явлениях, таких как неравномерность вращения Земли, изменение положения центра масс и осей инерции Земли и др. бортовыми средствами являются среднеорбитальные пассивные лазерные спутники («ЛАГЕОС», «БЛИК» и т. п.), а также панели ретрорефлекторов на навигационных («Глонасс-М», «Глонасс-К», «БЛОК-III») и геодезических спутниках. Двухпутевые дальности относительно этих спутников являются основными лазерными данными ГСМГПЗ. Эти данные собираются наземной сетью лазерных (квантово-оптических) станций КОС.

Для решения задач картографического обеспечения навигации по гравитационному полю Земли, оценки влияния локальных и региональных вариаций гравитационного поля на траектории движения низкоорбитальных и баллистических объектов, а также изменения положения наземных КОС необходим высокодетальный мониторинг гравитационных аномалий. Для этого целесообразно использование лазерных орбитальных средств с высотами полёта, лежащими в диапазоне 500–1000 км и 200–300 км. Орбитальная платформа первого диапазона (активный лазерный геодезический КА) должна оснащаться лазерными средствами для получения данных в интересах детального мониторинга вариаций гравитационного поля Земли.

К этим данным относятся:

- результаты плотного (с шагом до десятков метров) мониторинга вариаций гравитационного поля по изменениям траекторий низкоорбитальных пассивных лазерных спутников-зондов;
- высокоточный (с разрешением по высоте – единицы сантиметров) контроль гравитационных деформаций геоида в Мировом океане на основе спутниковой лазерной альтиметрии;
- высокоточная лазерная привязка координат геодезического спутника относительно орбитальных (КА «Глонасс-К2» и др.), а также наземных ориентиров (в

частности, КОС, если последние находятся в зоне видимости геодезических КА при проведении измерительного сеанса).

Лазерные средства для диапазона высот полёта 200–300 км могут быть реализованы в виде сферических наноспутников, вся внешняя поверхность которых оснащена (покрыта) ретрорефлекторами. Эти лазерные средства предназначены для выполнения функций орбитальных пробных масс (спутников-зондов) при мониторинге вариаций гравитационного поля, а также зондов вариаций плотности остаточной атмосферы. Измеряемым параметром с использованием этих средств является двухпутевая дальность между пассивным спутником-зондом и активным лазерным геодезическим спутником, а также (с целью эталонирования модели получения данных о вариациях гравитационной силы) между спутником-зондом и наземной КОС, комплексируемой с высокоточным гравиметром.

Одной из ключевых задач комплексов управления и фундаментального обеспечения ГЛОНАСС является синхронизация шкал времени разнесённых наземных эталонов (основного и резервного синхронизаторов между собой, а также с национальной шкалой координатного времени UTC (SU)). Задача получения данных для высокоточной синхронизации может быть сведена к совокупному измерению лазерных однопутевой и двухпутевой дальностей с субсантиметровой точностью.

Парк необходимых лазерных средств подсистемы морской геодезии ГСМГПЗ представлен на рис. 3.



Рис. 3. Необходимые лазерные средства подсистемы морской геодезии Глобальной системы мониторинга геодезических параметров Земли

Качественно новое решение задач морской геодезии с использованием космических средств могут быть получены на основе создания сети подводных пассивных (ППО) и активных (АПО) ответчиков.

Для решения задач фундаментального геодезического обеспечения ГЛОНАСС, а также обеспечения картографирования гравитационного поля Земли большое значение имеет мониторинг с сантиметровой точностью изменения уровней водной

поверхности в Мировом океане, внутренних водоёмов, прибрежных зон морей. Одним из значимых факторов, препятствующих достижению сантиметровой точности определения уровней моря космическим радиолазерным альтиметром, является помеховое влияние ветрового волнения.

Появление модели случайного поля волнения водной поверхности, пригодной для решения задачи оптимальной фильтрации информации об уровне водной поверхности с сантиметровой точностью, в обозримом будущем не предвидится.

Для статистической интерполяции модели уровня моря необходимо контролировать уровень водной поверхности в эталонных (калибровочных) точках с сантиметровой и субсантиметровой точностью квазинезависимо от влияния волнения (т.е. при минимально возможном влиянии волнения водной поверхности). Эта проблема может быть решена на основе создания сети адаптивных подводных лазерных ответчиков, размещаемых на глубинах 10–50 м (для ППО) и до 300 м (для АПО). Пространственное положение таких ответчиков практически не зависит от изменений волнения моря. Медленно меняющиеся смещения этих ответчиков за счёт изменения подводных течений может контролироваться с высокой точностью известными методами и средствами при установке и в процессе эксплуатации.

При системном проектировании и разработках опытных образцов лазерных адаптивных активных (АПО) и пассивных (ППО) приёмоответчиков целесообразно исследование возможности многоцелевого использования сетей и отдельных приёмоответчиков с целью получения данных для решения задач:

- мониторинга океанской геодезической сети;
- исследования приливно-отливных явлений;
- самоопределения низкоорбитальных космических аппаратов, оснащённых лазерными дальномерами сине-зелёного диапазона волн, в частности, группировки низкоорбитальных геодезических спутников, обеспечивающих создание и мониторинг океанской геодезической сети;
- обеспечения режима дифференциальной высокоточной космической навигации летательных аппаратов, оснащённых лазерной аппаратурой при полёте над океаном;
- скрытной помехозащищённой лазерной координатной коррекции инерциальных систем наведения высокоточных потребителей при полёте над морем.

Большое практическое значение, существенно более широкое, чем задачи ГСМГПЗ, имеет решение проблем мониторинга малых глубин океана с использованием лазерных средств различного базирования.

Для решения задач получения геодинамических и геодезических данных на качественно новом уровне целесообразно создание лазерных профилометров морского дна, размещаемых на мобильных дрейфующих, надводных и подводных носителях. В интересах ГСМГПЗ целесообразно обеспечить высокоточный мониторинг геодинамических активных глубинных зон Мирового океана, в частности, оперативного контроля деформаций дна, обусловленных эффектами эрозии дна, аккумуляции наносов, сейсмическими явлениями и т. п.

Большое значение имеет обеспечение высокоточной координатной привязки данных лазерного профилометрирования, а также локационных 3D изображений дна, и гравиметрическая калибровка (съёмка), полученных лазерными методами профилей и изображений.

Лазерные методы морской геодезии и технические решения, реализующие эти методы, могут быть адаптированы для решения ключевых проблем командного

(информационного) и навигационного обеспечения потребителей. В сложных условиях помехового подавления, нахождения под водой, экранирования проводящей плазмой и т.п.

Парк наземных лазерных средств, необходимых для решения задач ГСМГПЗ представлен на рис. 4.

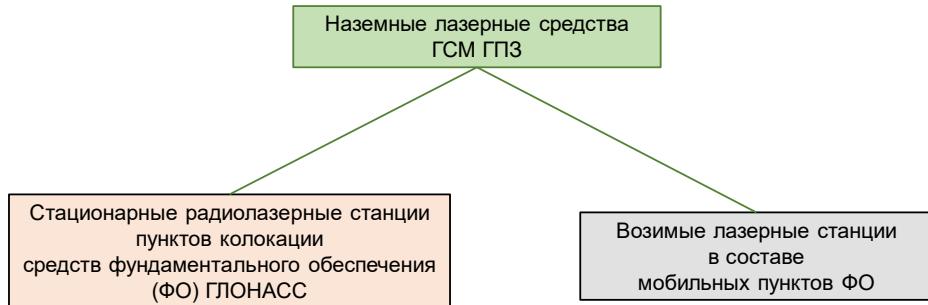


Рис. 4. Необходимые наземные лазерные средства Глобальной системы мониторинга геодезических параметров Земли

ГСМГПЗ является составной частью фундаментального обеспечения (ФО) ГЛОНАСС. Наземные лазерные средства в комплексе средств ФО целесообразно использовать для следующих целей:

- синхронизации бортовых шкал времени (ШВ) со шкалой центрального синхронизатора (ЦС);
- сличения шкал времени разнесённых наземных эталонов времени и частоты (основного и резервного ЦС, а также ЦС и национального госэталона, т. е. ШВ ЦС и UTC (SU));
- определения вариаций времени суток;
- реализации Земной системы (каталогов координат и скоростей опорных лазерных станций);
- определения пространственных параметров вращения Земли (координат полюса, углов нутации и прецессии);
- построения эфемерид тел Солнечной системы;
- мониторинга параметров гравитационного поля Земли.

На основе лазерного локирования высокостабильных среднеорбитальных ретрорефлекторных спутников решаются задачи получения данных:

- о вариации времени суток;
- для реализации и поддержания общеземной системы координат ПЗ-90-11, а также согласования её с параметрами гравитационного поля Земли (неоднородностью поля, обусловленной крупномасштабными аномалиями гравитационного поля, которые обычно уточняются по первым низкочастотным коэффициентам разложения гравитационного поля).

Для повышения эффективности целесообразна постановка работ по расширению сети наземных квантово-оптических станций увеличения их пропускной способности на основе повышения оперативности получения «нормальных точек» (в частности, увеличения частоты следования и уменьшения длительности зондирующих лазерных импульсов, а также обеспечения круглосуточного режима работы).

Модернизация и расширение сети радиолазерных станций миллиметровой точности «Точка», созданной в рамках ФЦП «ГЛОНАСС-12-20», в значительной мере обеспечит эти потребности ФО.

Вместо заключения

В настоящее время разработаны технические задания и технико-экономические обоснования более 20 НИОКР, проведение которых необходимо для создания системы ГСМГПЗ, включения её в контур управления ГЛОНАСС и превращения самой ГЛОНАСС в самосинхронизирующуюся, самоопределяющуюся систему координатно-информационного обеспечения дециметровой точности в условиях полномасштабного помехового противодействия противника, использующего сети поставщиков помех наземного, воздушного и космического базирования.

Судя по работе [2] (2019 г.) можно предположить, что руководство Космических войск понимает проблемы конкурентоспособности и боевой устойчивости ГЛОНАСС, однако в 2021 г. утверждён федеральный проект «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС (ГЛОНАСС-21-30), в котором не предусмотрено продолжение работ по лазерным средствам ГСМГПЗ, развитию морской геодезии в интересах ГЛОНАСС и т. п. В случае невыполнения этого проекта и в 2030 году ГЛОНАСС останется неконкурентоспособной по точности и помехоустойчивости, т. е. непригодной для реального боя с войсками НАТО системой. Проблема ГЛОНАСС является частным случаем провальной, не соответствующей реальным угрозам безопасности военно-технической политики государства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральная целевая программа «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы», утверждённая постановлением Правительства Российской Федерации от 03.03.2012 № 189.
2. Ивашина А. В., Топорков И. С., Глуздов А. Н., Кулешов Ю. В. и др. Требования Минобороны России к фундаментальному сегменту ГНСС ГЛОНАСС на период до 2030 г./Труды Института прикладной астрономии РАН. – Вып. 51. – 2019. – С. 63–72.
3. Параметры Земли 1990 года. Справочный документ. – М.: ВТУ ГШ ВС РФ, 2014 г. – 52 с.
4. ГОСТ Р 55536-2013. Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических работ. Общие требования к фундаментальным и геодезическим параметрам. – М.: Стандартинформ, 2014 г. – 8 с.
5. Чубыкин А. А., Катенин В. А., Васильев В. П. Методы и средства лазерного детального мониторинга гравитационных аномалий в интересах картографического обеспечения морской навигации по гравитационному полю Земли//Навигация и гидрография. – 2021. №65. Лазерные технологии. Тематический выпуск. – С. 85–95.
6. Катенин В. А., Чубыкин А. А. Лазерная технология трёхмерного картографирования морского дна//Навигация и гидрография. – 2021. – № 65. Лазерные технологии. Тематический выпуск. – С. 73–84.
7. Катенин В. А., Мозгов К. С., Чубыкин А. А. Основные направления применения МКА для помехоустойчивого скрытного лазерного навигационного обеспечения наземных, морских, авиационных и космических потребителей. – Материалы 56-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и идей К.Э. Циолковского, часть 1. V Симпозиум «Современные проблемы создания Российских малых космических аппаратов и их использования для решения социально-экономических задач». – Калуга: 2021. – С. 46–49.
8. Коровайцева Е. В., Лукин А. Б., Катенин В. А., Чубыкин А. А. Лазерные технологии координатно-информационного обеспечения морских потребителей на основе использования малых космических аппаратов //Навигация и гидрография. – 2021. – № 65. Лазерные технологии. Тематический выпуск. – С.121–125.
9. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли. Под общ. ред. В. Г. Пешехонова. – СПБ.: ГНЦ РФ АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор". 2017. – 390 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

КАТЕНИН Владимир Александрович, ученый секретарь АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», доктор военных наук, профессор, vkatennin@rambler.ru.

Vladimir A. KATENIN, Academic secretary, State Research Navigation-Hydrographic Institute, Doctor of Science, Professor, vkatennin@rambler.ru.

ЧУБЫКИН Алексей Алексеевич, старший научный сотрудник, АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», доктор технических наук, achubykin@list.ru.

Aleksey A. CHUBYKIN, senior researcher, State Research Navigation Hydrographic Institute, Doctor of Science, achubykin@list.ru.

ОЙСТРИК Александр Константинович, Черноморское высшее военно-морское училище им. П. С. Нахимова, преподаватель кафедры кораблевождения, a.oystrik@bk.ru.

Aleksander K. OISTRIK, Black Sea Higher Naval School named after P. S. Nakhimov, lecturer of the Department of Navigation, a.oystrik@bk.ru.

УДК 656.61.052 +551.48

**ПРОБЛЕМЫ ВЫСОКОТОЧНОГО КООРДИНИРОВАНИЯ
ГИДРОГРАФИЧЕСКИХ И ДРУГИХ МОРСКИХ РАБОТ В АКВАТОРИИ
СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ В УСЛОВИЯХ САНКЦИОННЫХ
ОГРАНИЧЕНИЙ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ.**

**ЧАСТЬ III. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ PPP-СЕРВИСА
ВЫСОКОТОЧНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ КОМПАНИИ АО
«ГЛОНАСС» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ
МУЛЬТИСИСТЕМНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ**

Смолин В. М.¹ Решетняк С. В.¹ Миляков Д. Ф.² Онищенко О. Л.³

¹АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», г. Санкт-Петербург.

²АО «Конструкторское бюро навигационных систем», г. Москва.

³ООО «Навгеоком ДиfСервис Групп», г. Москва.

Аннотация. В ранее опубликованной второй части статьи были рассмотрены основные варианты метода высокоточного определения координат точки / Precise Point Positioning (PPP) и отечественная технология высокоточного определения координат, разработанная российской компанией АО «ГЛОНАСС», испытанная в акватории Северного морского пути, а также приведены результаты предварительного тестирования PPP-сервиса АО «ГЛОНАСС», позволяющего решить проблему ухода с российского рынка иностранных провайдеров аналогичных услуг. В третьей части статьи представлен краткий обзор основных характеристик действующих глобальных навигационных спутниковых систем, рассматриваются преимущества мультисистемного PPP решения для местоопределения в арктических морях и приводятся окончательные результаты основного этапа тестирования PPP-сервиса АО «ГЛОНАСС», включая оценку точности и других характеристик, с использованием двух независимых комплектов отечественной навигационной мульти-ГНСС аппаратуры разных производителей.

Ключевые слова: глобальная навигационная спутниковая система, гидрографические работы, высокоточное определение координат, Северный морской путь, навигационная аппаратура.

Для цитирования: Смолин В. М., Решетняк С. В., Миляков Д. Ф., Онищенко О. Л. Проблемы высокоточного координирования гидрографических и других морских работ в акватории Северного морского пути в условиях санкционных ограничений и пути их решения. Часть III. Результаты тестирования PPP-сервиса высокоточного определения координат компании АО «ГЛОНАСС» с использованием отечественной мультисистемной навигационной аппаратуры // Навигация и гидрография. – 2024. – № 2 (75). – С. 76–109.

PROBLEMS OF HIGH-PRECISION COORDINATION OF HYDROGRAPHIC AND OTHER MARINE OPERATIONS IN THE WATERS OF THE NORTHERN SEA ROUTE UNDER SANCTION RESTRICTIONS AND SOLUTIONS. PART III. TEST RESULTS OF THE PPP SERVICE FOR HIGH-PRECISION POSITIONING BY JSC "GLONASS" USING DOMESTIC MULTI-SYSTEM NAVIGATION EQUIPMENT

Smolin V. M.,¹ Reshetnyak S. V.,¹ Milyakov D. F.,² Onishchenko O. L.³

¹State Research Navigation-Hydrographic Institute, JSC, St. Petersburg.

²Design Bureau of Navigation Systems, JSC, Moscow

³Navgeokom Difservice Group LLC, Moscow

Summary. The previously published second part of the article reviewed the main variants of the Precise Point Positioning (PPP) method and the domestic high-precision positioning technology developed by the Russian company JSC "GLONASS," tested in the waters of the Northern Sea Route, as well as the preliminary test results of the PPP service by JSC "GLONASS," addressing the issue of the withdrawal of foreign providers of similar services from the Russian market. The third part of the article provides a brief overview of the main characteristics of existing global navigation satellite systems, discusses the advantages of the multi-system PPP solution for positioning in Arctic seas, and presents the final results of the main stage of testing the PPP service by JSC "GLONASS," including the accuracy assessment and other characteristics, using two independent sets of domestic multi-GNSS navigation equipment from different manufacturers.

Keywords: global navigation satellite system, hydrographic operations, high-precision positioning, Northern Sea Route, navigation equipment.

For citation: Smolin V. M., Reshetnyak S. V., Milyakov D. F., Onishchenko O. L. Problems of High-Precision Coordination of Hydrographic and Other Marine Operations in the Waters of the Northern Sea Route Under Sanction Restrictions and Solutions. Part III. Test Results of the PPP Service for High-Precision Positioning by JSC "GLONASS" Using Domestic Multi-System Navigation Equipment // Navigation and hydrography. – 2024. – No. 2 (75). – P. 76–109.

Введение

Важное значение для обеспечения высокоточного местоопределения при выполнении гидрографических и других видов специальных работ в арктических морях России в акватории Северного морского пути (СМП), как было отмечено в работе [1], имеет возможность и даже необходимость интеграции измерений из нескольких созвездий глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), т. е. переход от PPP (*Precise Point Positioning* / высокоточное определение координат точки) решений по одному созвездию (ГЛОНАСС PPP или GPS PPP) к мультисистемному PPP решению с комплексным использованием измерений от спутников всех доступных созвездий ГНСС, которое в последнее десятилетие активно

исследуется и находит всё более широкое коммерческое использование. Подтверждённое в ходе предварительного тестирования соответствие средней квадратической погрешности (СКП) всех предварительных высокоточных PPP-серий значениям Горизонтальной и Вертикальной точности, заявленным в Технической спецификации PPP-сервиса АО «ГЛОНАСС» [1, стр. 24, табл. 2], позволило перейти к основному этапу тестирования PPP-сервиса АО «ГЛОНАСС».

Главными задачами основного этапа тестирования являлись оценка точности местоопределения в режиме мультисистемных PPP-серий, продолжительности таких PPP-серий (с точки зрения ожидаемой длительности высокоточного местоопределения на протяжённых по времени промерных галсах при выполнении гидрографических работ в акватории СМП), а также доступности и непрерывности функционирования мультисистемного PPP-сервиса АО «ГЛОНАСС». В первый период основного этапа тестирование выполнялось с использованием навигационной аппаратуры потребителей (НАП), предоставленной компанией «Ориент Системз» (г. Москва) – ГНСС приёмника «4GNSS OC-113» (далее – НАП «ОС-113»). В ходе второго периода тестирование осуществлялось в режиме параллельного использования НАП «ОС-113» и НАП «Референсная станции геодезического класса» (далее – НАП «ГЕО-РС»), разработанной **АО «Конструкторское бюро навигационных систем»** (АО «КБ НАВИС») и предоставленной Санкт-Петербургским филиалом АО «КБ НАВИС».

В заключительном разделе данной статьи приводятся результаты основного этапа тестирования с оценкой точности и других характеристик, которые подтвердили не только высокую заявленную точность местоопределения при совместном использовании инновационного PPP-сервиса АО «ГЛОНАСС» и отечественной мультисистемной навигационной аппаратуры, но и возможность использования данного PPP-сервиса для координирования гидрографических и других видов специальных работ с необходимой продолжительностью непрерывного высокоточного местоопределения до нескольких суток. Последнее весьма важно для сокращения потерь времени на выполнение повторной синхронизации НАП и на последующее возвращение гидрографического судна на промерный галс при выполнении съемки в Арктике с учётом достаточно короткого периода летней арктической навигации в Акватории СМП.

1. Преимущества дополнительных спутниковых сигналов при вычислении PPP-решений в мультисистемном режиме ГНСС

1.1. Текущее число активных спутников действующих ГНСС

По состоянию на начало 2024 г. суммарное количество используемых для местоопределения навигационных спутников (НС) четырёх группировок Глобальных навигационных спутниковых систем ГНСС составляет 118 НС [2], в том числе:

а) группировка ГЛОНАСС состоит из 26 спутников, запущенных в период с 2007 по 2022 гг. (возраст двух самых «старших» спутников составляет 197 месяцев), из них по целевому назначению используется 23–24 НС;

б) группировка GPS насчитывает 32 спутника, запущенных в период с 1998 по 2023 гг. (возраст самого «старшего» спутника составляет 305 месяцев), из них по целевому назначению используется 30 НС;

в) состав группировки Galileo / Галилео насчитывает 27 спутников, запущенных в период с 2011 по 2022 гг., из них используется 21 НС;

г) в составе группировки BeiDou / БейДоу 49 спутников, запущенных в 2010–2020 гг., из них используется 44 НС.

Основные характеристики четырех действующих ГНСС – GPS, ГЛОНАСС, Галилео и БейДоу представлены в табл. 1 [3]. Как видно из таблицы, системы координат всех ГНСС различны. И хотя каждая из систем координат ГНСС, приведенных в табл. 1 (WGS-84/ПЗ-90/GTRF/BDCS), является геоцентрической, расхождения между ними могут достигать дециметра.

**Таблица 1. Обзор Глобальных навигационных спутниковых систем
(таблица с переводом авторов из работы [3])**

Система ГНСС	GPS	ГЛОНАСС / GLONASS	Галилео/Galileo	БейДоу-3/BDS-3
Орбитальный период	11 h 58 min	11 h 15 min	14 h 04 min	12 h 37 min
Высота орбиты МЕО (МЕО – средневысотная)	22,200 km	19,100 km	23,222 km	21,528 km
Наклонение орбиты (МЕО)	56°	64,8°	56°	55°
Количество орбитальных плоскостей (МЕО)	6	3; Созвездие треугольников Walker (24/3/1)	3; Созвездие треугольников Walker (24/3/1)	3; Созвездие треугольников Walker (24/3/1)
Число спутников	24 MEOs + 6 резерв	24 MEOs + 2 резерв	24 MEOs + 6 резерв	24 MEOs + 3 GEOS+ 3 IGSOs + spares
Старт Глобального обслуживания	1994	2011 (Второй)	2019	2020
Разработчик	США / USA	Россия / Russia	Европейский Союз / Europe	Китай / China
Система координат	WGS-84 – World Geodetic System 1984 / всемирная система геодезических параметров Земли 1984 г.	ПЗ-90 – система координат «Параметры Земли 1990 г.»	GTRF – Galileo Terrestrial Reference Frame / Отчётная основа системы Галилео	BDCS – BeiDou Coordinate System / Система коорди-нат БейДоу
Эталонное время системы	Системное время GPS (GPST)	Системное время ГЛОНАСС (GLONASST)	Системное время Галилео (GST)	Системное время БейДоу (BDT)

Для обеспечения совместимости между высокоточными координатами, определяемыми по разным созвездиям ГНСС, координаты приемников НАП определяются в одной общей системе отсчета, которой является Международная земная система отсчета / International Terrestrial Reference System (ITRS) и соответствующая ей Международная земная отсчетная основа / International Terrestrial Reference Frame (ITRF). Все системы координат ГНСС привязаны к ITRF. В настоящее время наиболее часто применяемой ITRF является ITRF2014 и соответствующая

реализация отсчетной основы IGb14, использование которой координируется Международной службой ГНСС / International GNSS Service (IGS) [4].

1.2. Преимущества мультисистемного PPP-режима наблюдений

Очевидное преимущество мультисистемного приемника ГНСС заключается в способности принимать большое число сигналов от НС различных систем, что обеспечивает повышенную вероятность местоопределений при затрудненных условиях приема и в сложной помеховой обстановке. Интеграция GPS, ГЛОНАСС, Галилео и БейДоу, как показано в работе [5], обеспечивает более высокую точность и надежность позиционирования в режиме PPP, когда геометрия спутников является ограничивающим фактором для достижения сантиметровой точности. Геометрия спутников может внезапно измениться при кинематическом позиционировании в городских районах при затенениях сигналов высотными зданиями и сооружениями или рельефом местности, а также в условиях сильных атмосферных воздействий, таких как, например, ионосферная сцинтилляция (мерцание), которая может ухудшить качество спутникового сигнала, вызывая сбои цикла и даже потерю сигнала. Сцинтилляция обычно вызывается мелкомасштабными неоднородностями в ионосфере и характеризуется быстрыми изменениями амплитуды и фазы сигнала, которые более выражены в геомагнитных областях экваториальных и высоких широт, к которым относится и Акватория СМП (рис. 1).

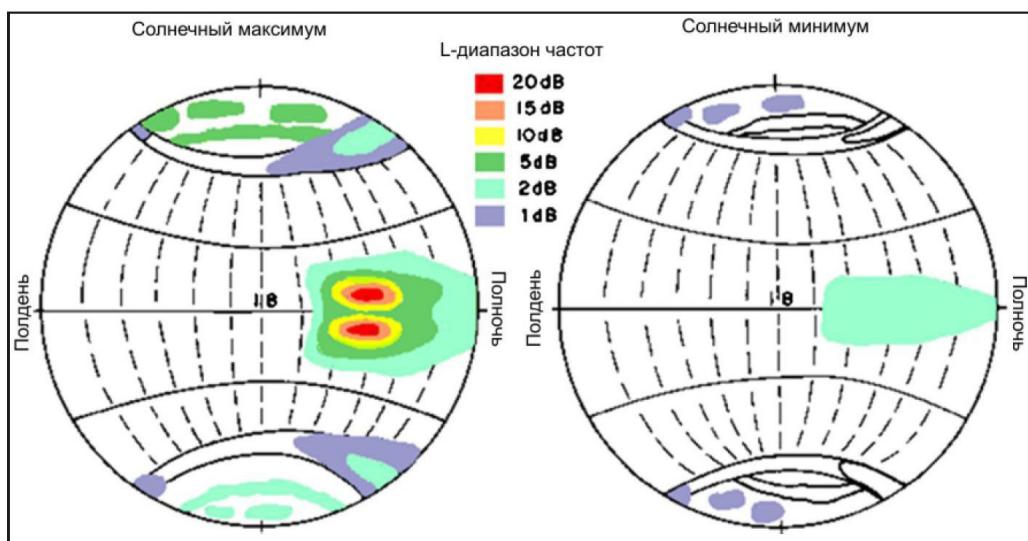


Рис. 1. Схема глобальной морфологии сцинтилляций на частотах L-диапазона во время солнечного максимума (левая часть) и солнечного минимума (правая часть) (рисунок с переводом авторов из работы [6])

Анализ результатов обработки данных, полученных в кинематическом мульти-ГНСС PPP-режиме, показал, что повышение точности достигает 34 % (при уровне сцинтилляции от слабого до умеренного), и 57 % в условиях сильной сцинтилляции при использовании данных нескольких созвездий ГНСС вместо одних только данных GPS [5, с. 13].

Значительное увеличение количества видимых НС при переходе от PPP-режима с использованием одиночной ГНСС GPS к мультисистемному PPP-режиму с использованием всех четырёх ГНСС – GPS, ГЛОНАСС, Галилео и БейДоу показано на рис. 2. При работе в мультисистемном PPP-режиме с существенным увеличением числа видимых НС можно в ряде случаев ожидать повышение точности определения координат также и за счет избыточности измерений псевдодальностей до НС.

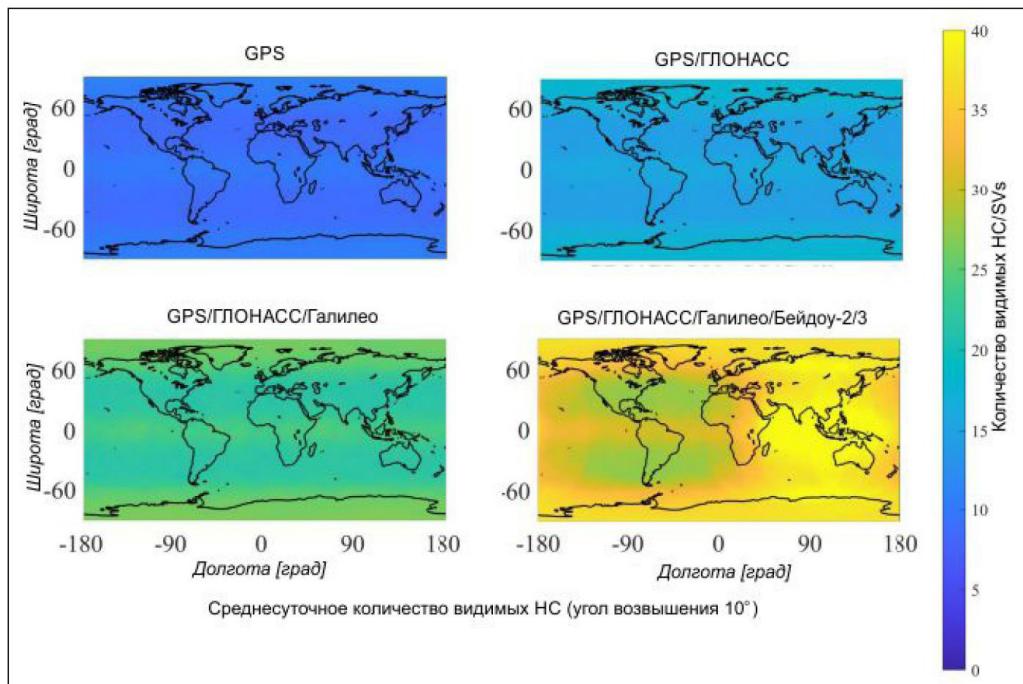


Рис. 2. Количество видимых навигационных спутников (угол возвышения НС=10°) при использовании различных комбинаций действующих ГНСС (рисунок с переводом авторов из работы [7])

Как видно на рис. 2, при использовании только группировки GPS в Акватории СМП количество видимых спутников составляет от 5 до 10 НС, при использовании ГНСС GPS/ГЛОНАСС – от 15 до 20 НС, а при использовании всех четырёх ГНСС GPS/ГЛОНАСС/Галилео/Бейдоу количество видимых спутников может достигать максимума порядка 40 НС. С ростом числа видимых НС работа мультисистемного приемника ГНСС обеспечивает значительно лучшие условия навигационного сеанса, которые оцениваются геометрическим фактором GDOP (Geometrical Dilution Of Precision / геометрическое снижение точности) или просто DOP. Параметр DOP зависит от числа и расположения относительно потребителя НС рабочей группировки ГНСС, по сигналам которых выполняются навигационные определения, и является одним из важнейших элементов, влияющих на точность определения местоположения с помощью ГНСС [8].

На рис. 3 представлен график улучшения (уменьшения величины) среднесуточного значения геометрического фактора трехмерных 3D координат, который обозначается как PDOP (Position-3D DOP), в арктической зоне, включая

Акваторию СМП, при переходе от PPP-режима с использованием одиночной ГНСС GPS к мультисистемному PPP-режиму с использованием всех четырёх ГНСС – GPS, ГЛОНАСС, Галилео и Бейдоу. Как видно на рис. 3, при использовании для местоопределения только группировки GPS в Акватории СМП геометрический фактор составляет $PDOP = 3$, при использовании ГНСС GPS/ГЛОНАСС $PDOP = 2$, а при использовании четырёх ГНСС GPS/ГЛОНАСС/Галилео/Бейдоу среднесуточное значение геометрического фактора составляет порядка $PDOP = 1$.

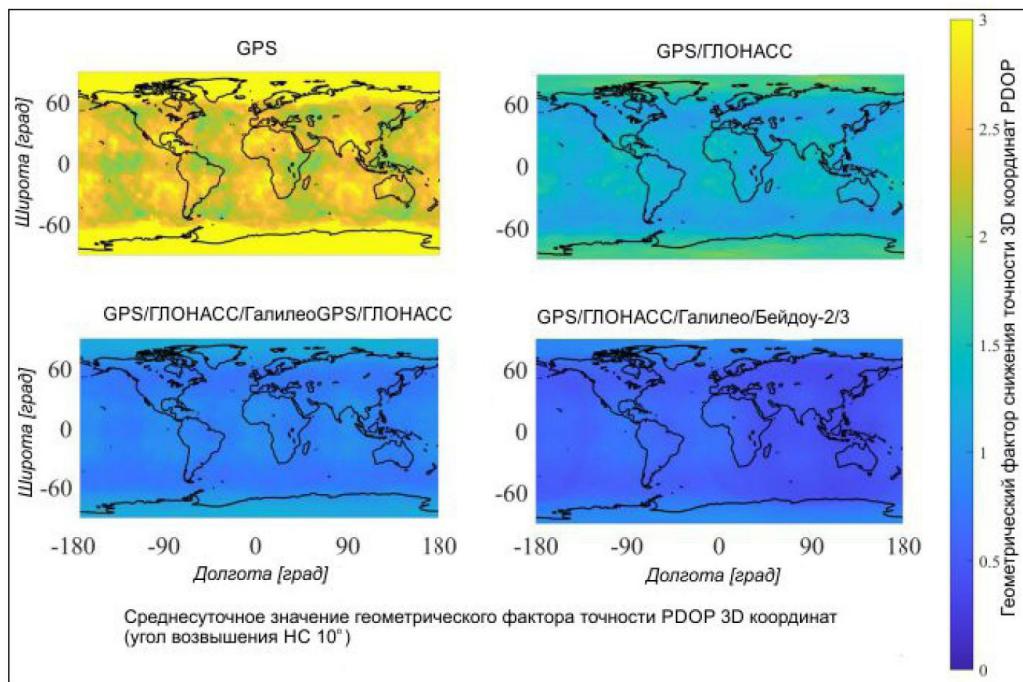


Рис. 3. Среднесуточное значение геометрического фактора трехмерных 3D координат PDOP (угол возвышения НС=10°) при использовании различных комбинаций действующих ГНСС (рисунок с переводом авторов из работы [7, стр. 8])

В связи с изложенным выше, применение навигационной аппаратуры потребителей, работающей в мультисистемном PPP-режиме с использованием всех четырёх ГНСС – GPS, ГЛОНАСС, Галилео и БейДоу в высоких широтах Арктики, рассматривается авторами как необходимое условие для обеспечения высокоточного местоопределения при выполнении гидрографических и других видов специальных работ в Акватории СМП.

2. Навигационная аппаратура потребителей, использованная в ходе основного этапа тестирования, и схема подключения к PPP-серверу АО «ГЛОНАСС»

Основная программа тестирования PPP-сервиса АО «ГЛОНАСС» была реализована в период с 25 сентября по 17 ноября 2023 г. после проведения на PPP-сервере АО «ГЛОНАСС» работ по оптимизации формата передачи поправок для ГНСС БЕЙДОУ, необходимость которых возникла в ходе предварительного этапа

тестирования [1, стр. 8]. Для целей оценки точности антенна «4GNSS ОС-113», описание которого приведено в статье [1, с. 23]), была установлена, как и на этапе предварительного тестирования на центре опорного пункта АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт» (АО «ГНИНГИ») (рис. 4). До начала основной программы тестирования в НАП «ОС-113» специалистами «Ориент Системз» было загружено обновлённое ПО, модернизированное с учётом результатов предварительного тестирования.

Опорный пункт «POIN» АО «ГНИНГИ» расположен недалеко от побережья Финского залива в точке с «открытым небом», т. е. с видимостью спутников по всему горизонту 360° без препятствий. Высокоточные координаты пункта «POIN» были определены в 2023 г. в текущей версии Международной наземной системы отсчёта ITRS – ITRF 2014 на эпоху измерений специалистами АО «Российские космические системы» методом «длиннобазисных высокоточных местоопределений» относительно базисных станций IGS: MDVJ (Менделеево), POLV (Полтава) и RIGA (Рига).



Рис 4. Антенна «ОС-113», установленная на центре Опорного пункта «POIN» АО ГНИНГИ [1]

С целью повышения надёжности оценки точности 27 октября 2024 г. дополнительно на опорном пункте «POIN» АО ГНИНГИ была установлена аппаратура геодезического класса точности НАП «ГЕО-РС», описанная в статье [1]. Центр приёма антенны НАП «ГЕО-РС» был приведён к центру опорного пункта «POIN». Таким образом, в завершающий период тестирования с 27 октября по 17 ноября 2024 г. наблюдения на одном опорном пункте в мультисистемном PPP-режиме проводились параллельно двумя независимыми приёмниками ГНСС разных отечественных производителей.

Получение уточнённых эфемерид и поправок часов навигационных спутников (SSR-информации) от сервера АО «ГЛОНАСС», подробное описание которого приведено в [1], осуществлялось с использованием протокола NTRIP по сети интернет в формате RTCM версии 3.2. Для этой цели оба НАП были подключены через

коммутатор к серверу сети интернет АО «ГНИНГИ» посредством двух выделенных линий витой пары категории 5е, как показано на рис. 5.



Рис. 5. Схема подключения НАП к серверу АО «ГНИНГИ»

Для статистической обработки данных наблюдений с использованием как НАП «ОС-113», так и НАП «ГЕО-РС» использовалось специализированное ПО «STOREGIS», версия 8.5.18.0, обновлённое впоследствии до версии 8.5.27.0.

3. Периоды наблюдений с использованием НАП «ОС-113» и НАП «ГЕО-РС» в ходе основного этапа тестирования

Наблюдения с использованием НАП «ОС-113» производились практически ежедневно с 25 сентября по 17 ноября 2023 г. (за исключением периода с 05 по 08 октября) при разных погодных условиях, дожде, снеге, сильном ветре, шторме, переходе температуры через ноль в ночное время суток. Следует отметить, что условия, при которых выполнялось тестирование, были весьма близки к условиям, при которых осуществляются гидрографические работы в Акватории Северного морского пути в период летней арктической навигации.

В первый период основного этапа тестирования с 25 сентября по 24 октября 2023 г. соединение НАП «ОС-113» с PPP-сервером АО «ГЛОНАСС» осуществлялось, как и на этапе предварительного тестирования, с использованием протокола NTRIP и параметров подключения, полученных от АО «ГЛОНАСС» компанией «Ориент Системз», которые были по умолчанию установлены в ПО НАП «ОС-113». Всего за первый период основного этапа тестирования НАП «ОС-113» было выполнено одиннадцать PPP-серий наблюдений продолжительностью от 4 час. 26 мин. до 116 час. 43 мин., результаты их представлены в табл. 2 (серии №№ 2.1-2.11).

Во второй период – с 25 октября по 17 ноября 2023 г. подключение НАП «ОС-113» к PPP-серверу АО «ГЛОНАСС» осуществлялось с использованием параметров, выделенных АО «ГЛОНАСС» специально для АО «ГНИНГИ» (рис. 6).

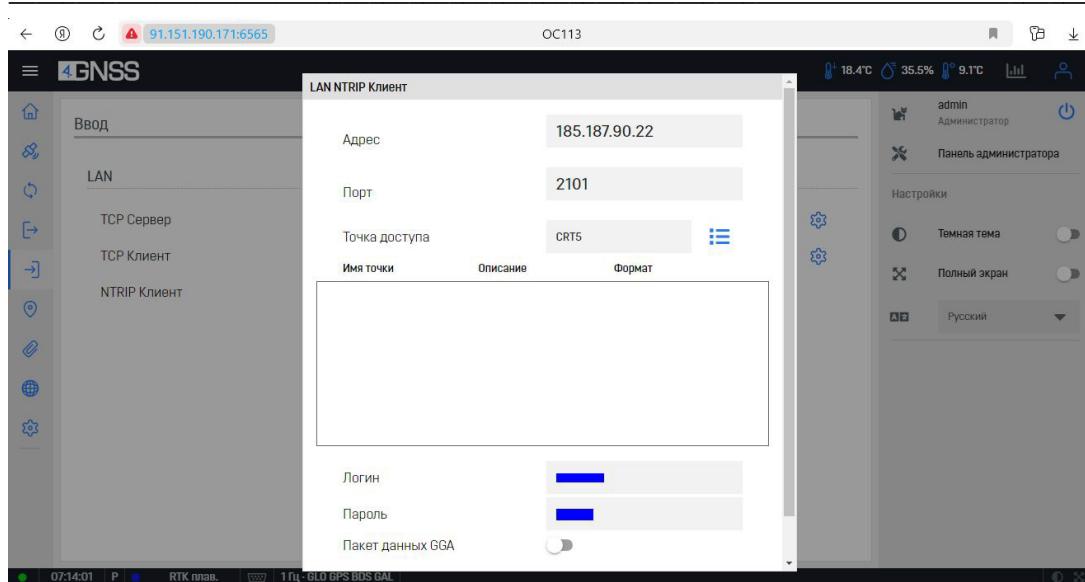


Рис. 6. Ввод параметров АО ГНИНГИ в приёмник «4GNSS OC-113» для подключения к PPP-серверу АО ГЛОНАСС

В течение второго периода основного этапа тестирования НАП «ОС-113» было выполнено семь PPP-серий наблюдений продолжительностью от 5 час. 37 мин. до 166 час. 21 мин., результаты которых представлены в табл. 2 с номерами №№ 2.12-2.18.

Примечательно, что первая же из серий с подключением к PPP-серверу АО «ГЛОНАСС» с использованием параметров, выделенных АО «ГНИНГИ», стала наиболее продолжительной из всех проведенных на тот момент PPP-серий. Её продолжительность составила более 166 час., т. е. серия длилась непрерывно почти 7 суток (см. серию № 2.12 табл. 2).

Таблица 2. Результаты серий наблюдений, выполненных НАП «ОС-113»

№	Период PPP-серии (без инициализации) UTC		Продолжи- тельность PPP-серии (час.: мин.)	Кол-во PPP решений в серии	Отклонение от координат Опорного пункта «POIN»				СКП (P 95%)	
	Начало	Конец			delta B	delta L	delta 2D (м)	delta H (м)	2D (м)	H (м)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2.1	25.09 18:49	26.09 07:10	12:21	44467	+0",004	+0",108	0,028	-0,006	0,067	0,095
2.2	26.09 07:44	27.09 10:53	27:09	97702	+0",011	+0",079	0,022	-0,005	0,051	0,058
2.3	27.09 11:18	28.09 07:57	20:39	74380	+0",007	+0",086	0,022	-0,006	0,052	0,067
2.4	28.09 08:43	29.09 11:17	26:34	86544	+0",022	+0",050	0,017	+0,002	0,053	0,067
2.5	30.09 05:52	02.10 05:49	47:57	172572	+0",007	+0",079	0,021	+0,003	0,051	0,057
2.6	02.10 13:17	04.10 01:24	35:07	129972	+0",004	+0",090	0,006	+0,001	0,037	0,066
2.7	09.10 13:54	12.10 10:22	68:28	245595	+0",011	+0",090	0,024	+0,009	0,055	0,068
2.8	12.10 11:01	16.10 09:41	95:41	340204	+0",007	+0",083	0,022	+0,002	0,051	0,063
2.9	18.10 08:59	18.10 13:25	04:26	15969	+0",036	+0",068	0,026	-0,014	0,059	0,059

Навигация и гидрография, 2024, № 2 (75)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2.10	18:10 13:56	19.10 08:35	18:39	66814	+0",000	+0",101	0,026	-0,003	0,066	0,062
2.11	19.10 14:02	24.10 10:45	116:43	418720	+0",011	+0",086	0,023	+0,007	0,051	0,060
2.12	25.10 11:21	01.11 09:42	166:21	598777	+0",007	+0",090	0,024	+0,007	0,052	0,072
2.13	01.11 10:06	01.11 15:49	05:37	20393	0",000	+0",001	0,017	+0,038	0,059	0,116
2.14	01.11 16:05	05.11 17:06	97:01	349277	0",000	+0",002	0,027	+0,006	0,058	0,063
2.15	05.11 19:47	08.11 06:43	56:56	212157	0",000	+0",002	0,029	+0,004	0,075	0,109
2.16	08.11 09:29	13.11 04:23	114:54	413650	0",000	+0",002	0,025	+0,002	0,051	0,058
2.17	13.11 09:25	16.11 12:29	75:04	269661	0",000	+0",023	0,029	+0,003	0,068	0,099
2.18	16.11 12:50	17.11 21:12	32:22	116571	0",000	+0",023	0,025	+0,007	0,056	0,062
				Общее колич-во PPP решений	Средние из 18 серий НАП «ОС-113» абсолютные значения отклонения от координат опорного пункта «POIN»				Средние значения СКП (Р 95%)	
					delta B	delta L	delta 2D (м)	delta H (м)	2D (м)	H (м)
				3 673 425	0",007	0",059	0,023	0,007	0,056	0,072

Рассмотрим подробнее ход и результаты серии № 2.12. По рекомендации разработчика приёмника НАП «ОС-113» серию наблюдений рекомендуется начинать с процесса Перезагрузки, который активируется из Панели администратора НАП «ОС-113» (рис. 7). После завершения Перезагрузки, которая занимает в НАП «ОС-113» около 2–4 мин., выполняется процесс Инициализации, под которой понимают период получения достоверного высокоточного решения, обусловленный временем сходимости решения в процессе приема и обработки поступающих уточнённых эфемерид и поправок часов навигационных спутников (SSR-информации).

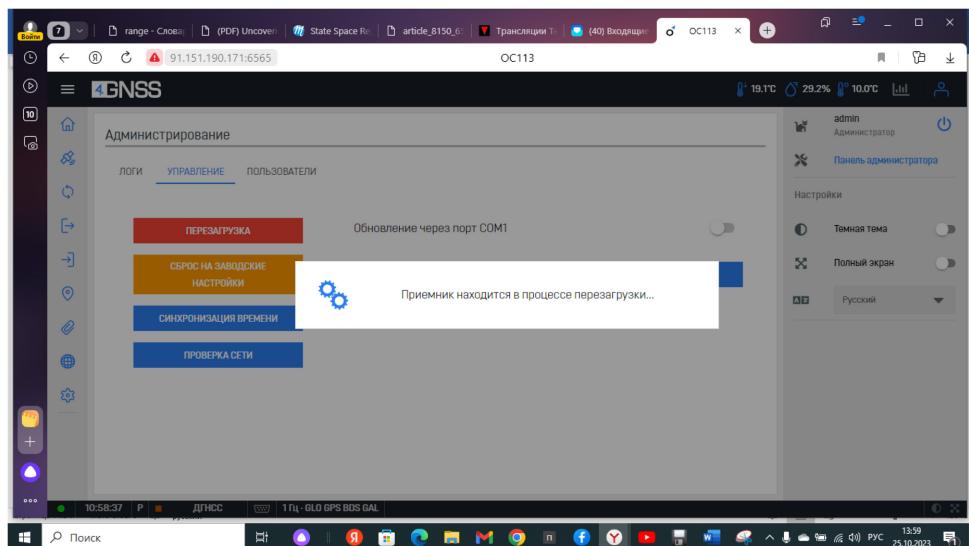


Рис. 7. Активация процесса Перезагрузки из Панели администратора ПО НАП «ОС-113» в 10:59 UTC (13:59 МСК) 25.10.2023

Инициализация или Сходимость определяется как время, необходимое для того, чтобы оценки местоположения достигли определенного уровня точности и не отклонялись дальше этого уровня после его достижения. Как было показано в статье [1], для режима Float PPP время сходимости характеризуется несколькими десятками минут. Здесь необходимо отметить, что по данным, приведенным в работе [7], время сходимости Float PPP-решения при использовании мульти-ГНСС PPP-режима может сократиться до полутора раз по сравнению временем сходимости Float PPP-решения с одиночным GPS PPP-режимом (см. рис. 8, где сходимость Float PPP выделена в столбцах жёлтым цветом), что ещё раз подчёркивает целесообразность и необходимость использования мультисистемного PPP-режима.

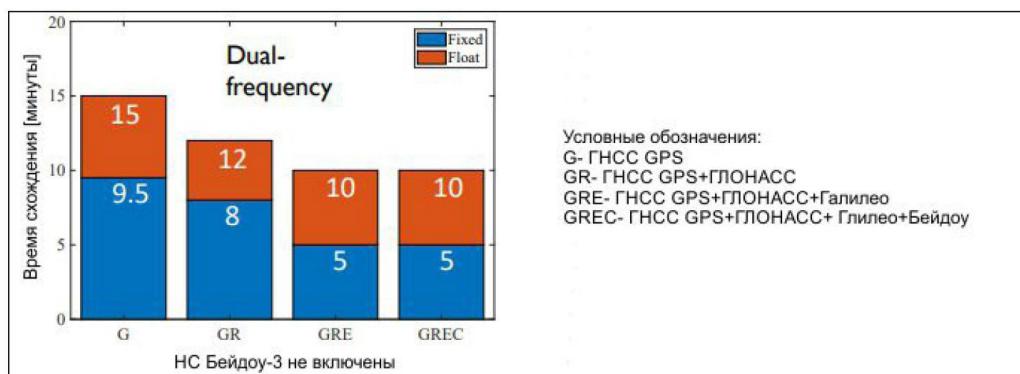


Рис. 8. Время сходимости PPP-решения до значения точности 10 см в горизонтальной плоскости при использовании различных комбинаций, действующих ГНСС по данным одной недели стационарных геодезических наблюдений (рисунок с переводом авторов из [7, стр. 15])

На рис. 9 показан переход приёмника НАП «ОС-113» в ходе выполнения инициализации из режима 3D Auto в дифференциальный мульти-ГНСС режим 3D, который в ПО STOREGIS отображается как Режим / Status «3D dgns» (слева над координатами на рис. 9). В этот момент текущие координаты 2D, отображаемые красной точкой на «мишени», входят в пределы круга $R=0,5$ м относительно «контрольных» координат Опорной точки.

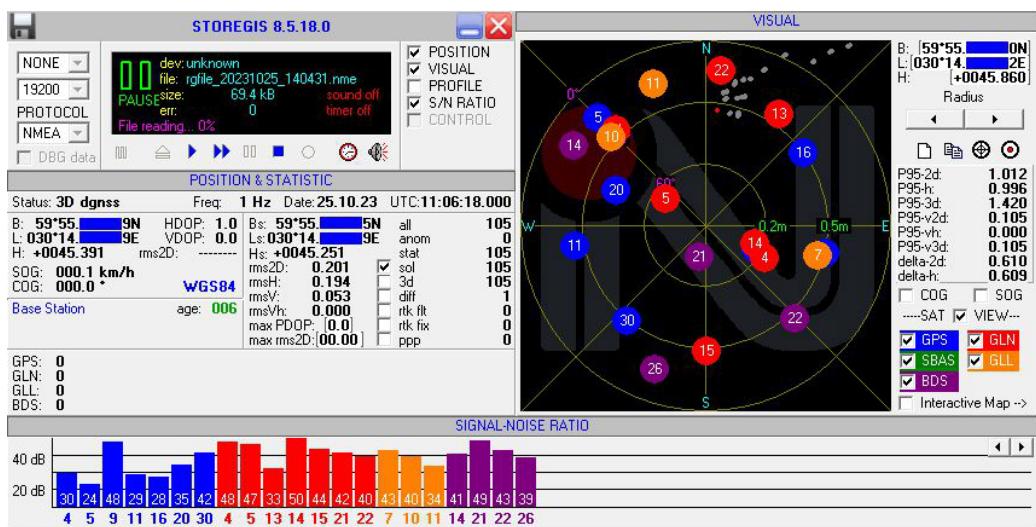


Рис. 9. Момент перехода в режим 3D dgnss в ходе инициализации

После завершения процесса инициализации, который, включая время, затраченное на перезагрузку, продолжался 22 мин., приёмник перешёл в высокоточный режим PPP Float, который на дисплее ПО STOREGIS отображается красным цветом как RTK Float (рис. 10, см. у левого края рисунка над широтой В: после слова «Status:»). Как видно на рис. 10, с учётом (с включением в расчёт) периода Инициализации СКП координат на плоскости P95-2d в момент начала режима PPP/RTK Float составила 0,642 м, а СКП высоты P95-h составила 0,542 м (крайняя правая колонка на рис. 10).

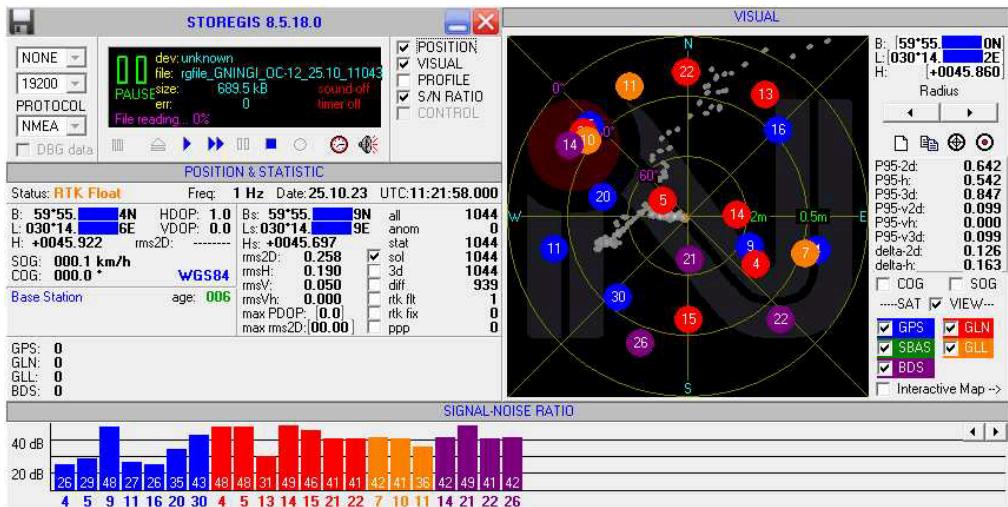


Рис. 10. Скриншот дисплея ПО STOREGIS с отображением процесса инициализации – графическим следом на мишени последовательных спутниковых измерений в ходе Инициализации при переходе НАП «OC-113» в режим PPP/RTK Float в 11:21:58 UTC 25.10.2023.

Разъяснение, почему при обработке в ПО STOREGIS данных НАП «ОС-113» (в отличие от НАП «ГЕО-PC») статус (вариант) решения PPP Float отображается как RTK Float, приведено в статье [1]. Это объясняется тем, что в «ОС-113» используется исторически применяемое сообщение протокола связи морского навигационного оборудования NMEA-0183 с идентификатором/ID \$GPGGA. В этом сообщении в поле Индикатора качества/*GPS Quality Indicator* не предусмотрено значение Индикатора (цифра от 0 до 6), соответствующее режиму PPP Float. Очевидно поэтому разработчики НАП ОС-113 использовали значение Индикатора = 5, обозначающее режим координирования RTK Float, который по уровню точности и смыслу близок к PPP Float. В связи с этим далее в статье для правильного понимания варианта высокоточного решения мы будем использовать обозначение PPP/RTK. На дисплее предустановленного собственного ПО НАП «ОС-113» режим PPP/RTK плавающий/RTK Float обозначается по-другому – синим квадратиком со словами «RTK плав.» после слов «Тип решения» (рис. 11).

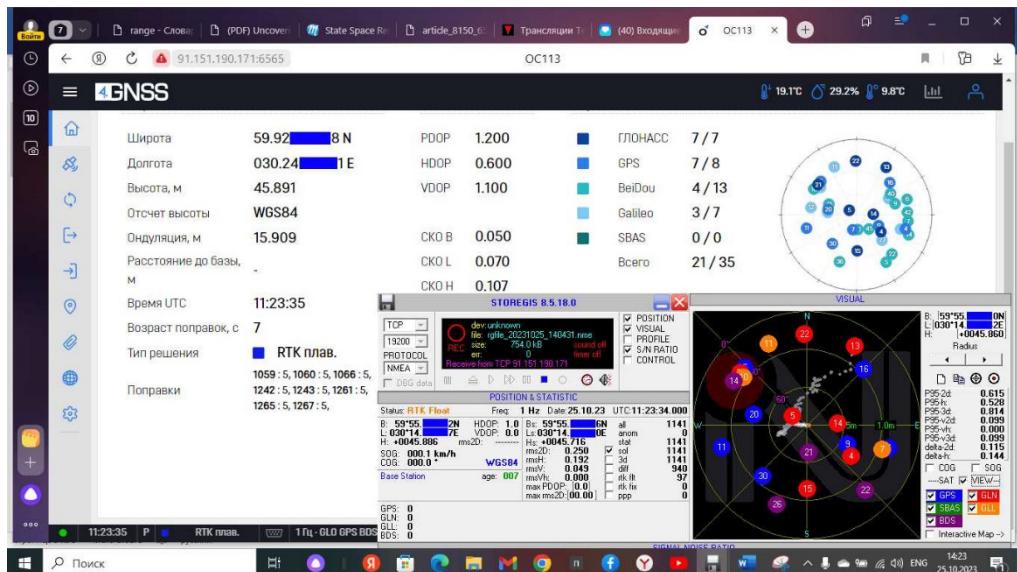


Рис. 11. Скриншот дисплея ПО НАП «ОС-113» в начале режима PPP/RTK плав. с врезкой ПО STOREGIS (внизу справа) после перехода в режим PPP/RTK Float в 11:23 UTC (14:23 МСК) 25.10.2023

Как видно на рис. 10 и 11, вычисление координат в начале PPP-серии наблюдений после перехода НАП «ОС-113» в режим PPP/RTK Float осуществляется по 21 спутнику всех четырех ГНСС из 35 видимых спутников: 7 из 7 спутников ГЛОНАСС/GLN, 7 из 8 GPS, 3 из 7 ГАЛИЛЕО/GLL и 4 из 13 БЕЙДОУ/BDS. По мере увеличения периода непрерывной работы в режиме PPP/RTK Float величина СКП, рассчитанная с включением периода инициализации, постоянно уменьшалась, и к моменту наблюдений 06:24:43 26.10.2023 СКП (P95-2d) уменьшилась до 0,100 м, а СКП (P95-h) – до 0,084 м (рис. 12).

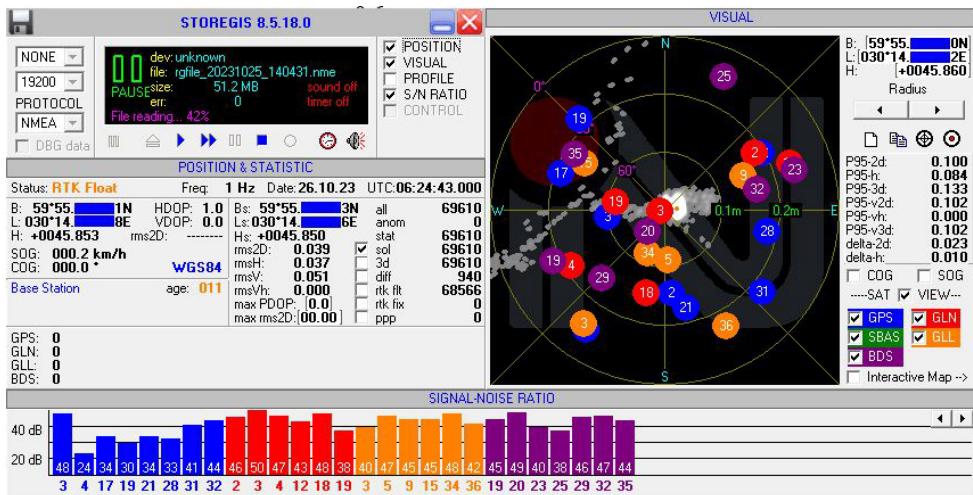


Рис. 12. Скриншот дисплея ПО Storegis в момент уменьшения СКП (P95-2d) до 0,100 м в 06:24:43 26.10.2023 (значения СКП приведены в крайней правой колонке рисунка)

Если же исключить из статистической обработки период инициализации/сходимости PPP-решения и начать расчёт СКП с момента начала режима PPP/RTK Float, то величина СКП (без инициализации) к этому же моменту времени 06:25 26.10.2023 СКП_{БезИниц-и} (P95-2d) = 0,051 м, СКП_{БезИниц-и} (P95-h) = 0,052 м (рис. 13).

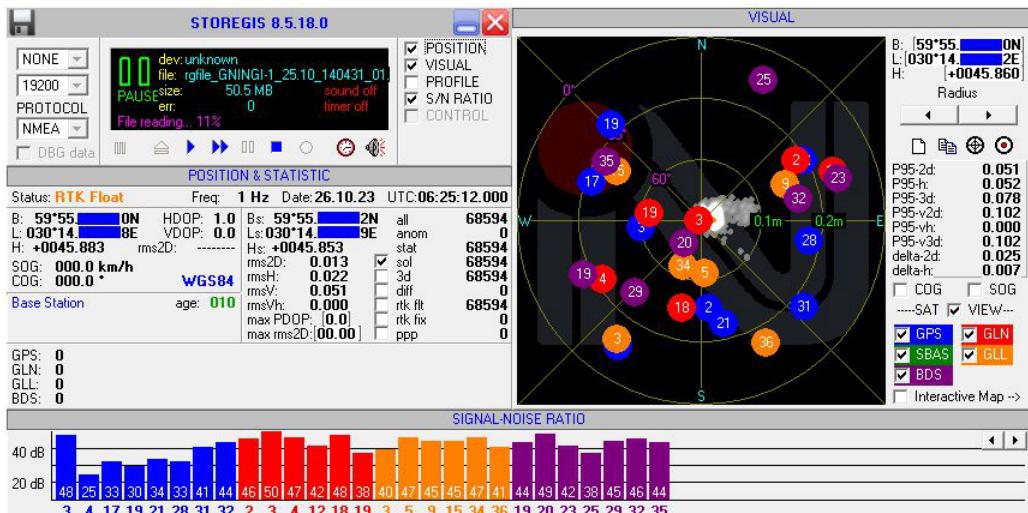


Рис. 13. Величины СКП (без учёта инициализации) к моменту времени 06:25:12 26.10.2023 (значения СКП приведены в крайней правой колонке рисунка)

Итоговые СКП данной серии (без инициализации), рассчитанные по итогам почти 7-ми суточной непрерывной PPP-серии на основе 598777 ежесекундных PPP-решений, составляют СКП_{БезИниц-и} (P95-2d) = 0,052 м, СКП_{БезИниц-и} (P95-h) = 0,072 м (см. рис. 14 и серию № 2.12 в табл. 2).

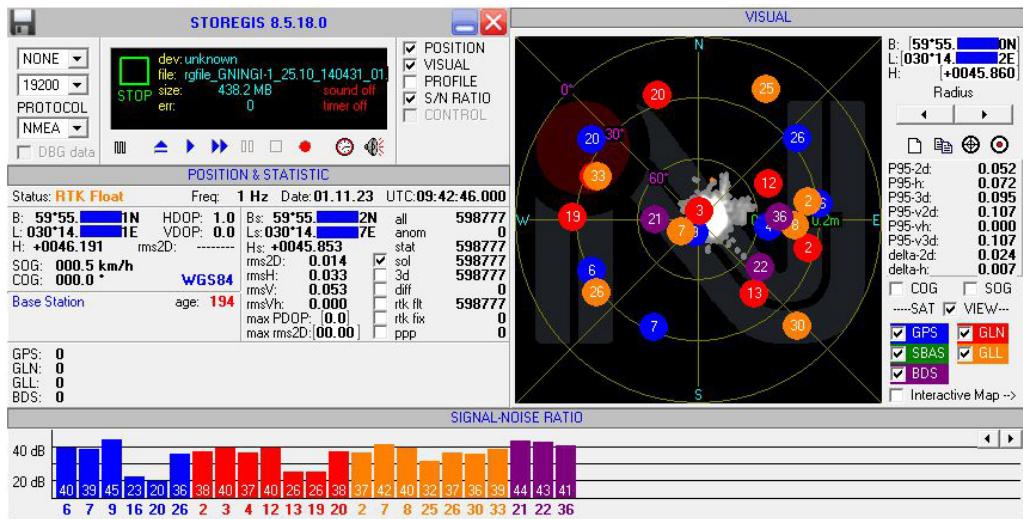


Рис. 14. Итоговые величины СКП (без инициализации) серии № 2.12 НАП «ОС-113», завершившейся в 09:42:46 01.11.2023 (приведены в крайней правой колонке рисунка)

В 09:43 произошёл уход НАП «ОС-113» из режима PPP в автономный режим 3D auto с увеличением СКП (P95-2d) до 1,124 м и СКП (P95-h) до 2,748 м в 09:43:20 (рис. 15). По мнению авторов статьи, данный уход был вызван неожиданным значительным ростом возраста / age корректирующей SSR-информации, получаемой от сервера АО «ГЛОНАСС», который достиг 194 сек. в 09:42:46 01.11.2023 (рис. 14, см. age 194 под словами WGS84) и составлял 98 сек. в 09:43:20 01.11.2023 (рис. 15).

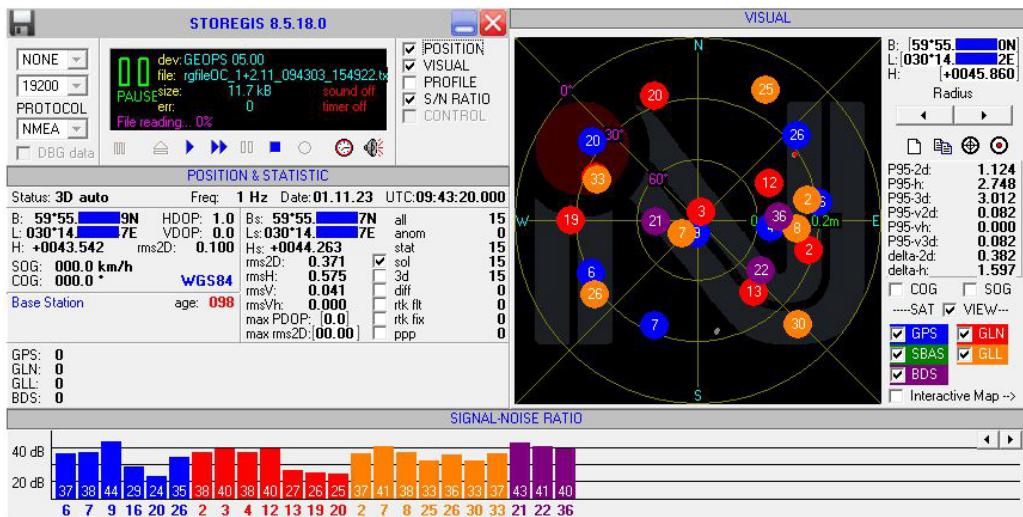
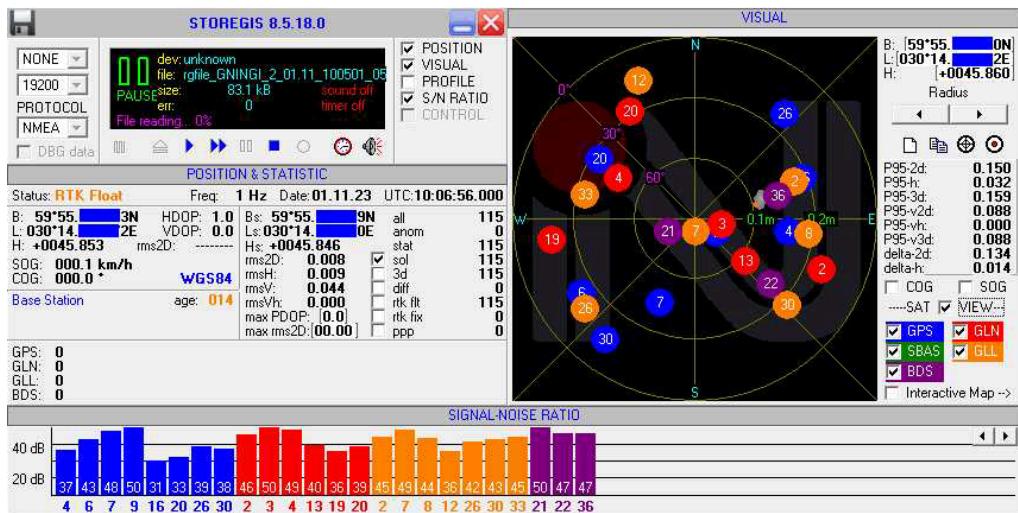


Рис. 15. Величины СКП после ухода НАП ОС-113 в автономный режим 3D auto в 09:43:20 01.11.2023 (приведены в крайней правой колонке рисунка)

Через 23 мин. в 10:06 01.11.2023 НАП «ОС-113» вновь вошла в высокоточный PPP-режим (Статус/Status RTK Float, который выделен красным цветом в левой части на рис. 16, что стало началом серии № 2.13 (табл. 2). Как видно, возраст

корректирующей SSR-информации / age значительно сократился, приблизился к нормальным значениям и составил к этому моменту 014 сек. (рис. 16). После 15:49:21 из-за нового значительного роста возраста / age корректирующей SSR-информации до 194 сек. (рис. 17) серия № 2.13 завершилась с последующим уходом НАП «ОС-113» в автономный режим 3D auto.



**Рис. 16. Автоматический возврат НАП «ОС-113» в высокоточный режим PPP/ RTK
Float в 10:06:56 01.11.2023, начало серии № 2.13**

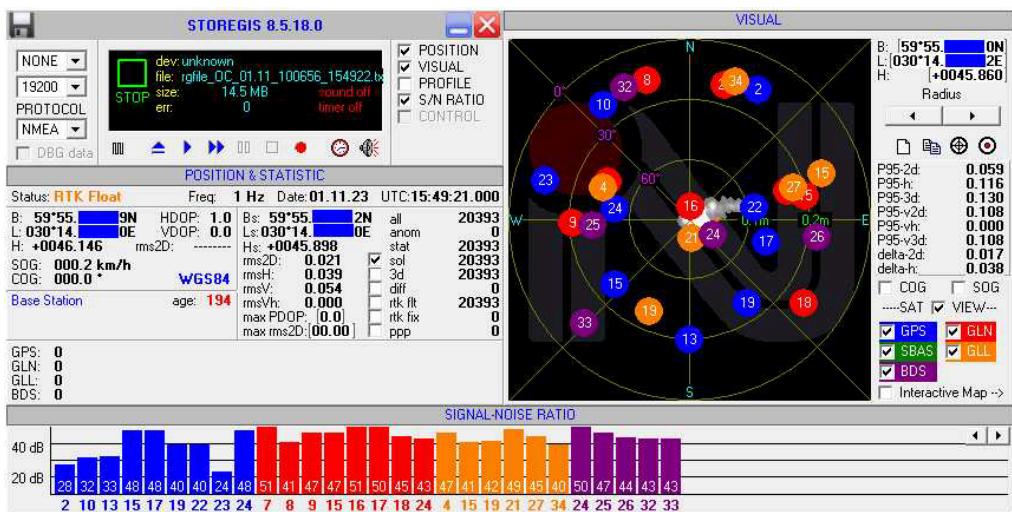


Рис. 17. Увеличение возраста / age корректирующей SSR-информации до 194 сек в 15:49:21 01.11.2023. Завершение серии № 2.13 НАП «ОС-113»

Уже через 16 мин. в 16:05:29 01.11.2023 НАП «ОС-113» автоматически вновь вошла в высокоточный режим, что стало началом серии № 2.14 (рис. 18, табл. 2). На рис. 18 авторами специально удалены из мишени разноцветные кружки, обозначающие спутники различных ГНСС, и увеличен радиус окружностей с 0,1 м до

0,2 м, чтобы были отчётливо видны отметки текущих значений координат на удалении до 1 м от центра «контрольных» координат опорного пункта «POIN», преимущественно – в нижней половине мишени (к югу от направления W – E). СКП координат на плоскости P95-2d в этот момент составила 0,290 м, а СКП высоты P95-h – 0,847 м.

Как было отмечено выше в п. 2 статьи, с целью повышения надёжности оценки точности 27 октября 2023 г. дополнительно на опорном пункте «POIN» АО «ГНИНГИ» была установлена аппаратура геодезического класса точности НАП «ГЕО-РС». Результаты пяти PPP-серий наблюдений продолжительностью от 18 час. 44 мин. до 283 час. 03 мин., выполненных НАП «ГЕО-РС» во второй период основного этапа тестирования с 27 октября по 17 ноября 2023 г. параллельно с сериями НАП «ОС-113», представлены в табл. 3 (серии №№ 3.1–3.5).



Рис. 18. Начало серии № 2.14 НАП «ОС-113» в 16:05:29 01.11.2023. Возраст/ age корректирующей SSR-информации 012 сек.

Развёртывание НАП «ГЕО-РС» позволило выявить интересный и важный факт. Как видно из табл. 3, высокоточная PPP-серия наблюдений № 3.1 началась 27 октября в 11:40 (рис. 19) и продолжалась непрерывно до 06:43 08 ноября 2023 г. Таким образом, серия НАП «ГЕО-РС» № 3.1. стала самой продолжительной серией из выполненных обоими НАП «ОС-113» и НАП «ГЕО-РС» 23-х серий в ходе основного этапа тестирования PPP-сервиса АО «ГЛОНАСС».

Таблица 3. Результаты серий наблюдений, выполненных НАП «ГЕО-РС»

№	Период PPP-серии (без инициализации) UTC		Продолжи- тельность PPP-серии (час: мин)	Количество PPP решений в серии	Отклонение от координат Опорного пункта «POIN»				СКП (P 95%)	
	Начало	Конец			delta B	delta L	delta 2D (м)	delta H (м)	2D (м)	H (м)
3.1	27.10 11:40	08.11 06:43	283:03	1018930	0'',000	+0'',023	0,032	0,032	0,072	0,105
3.2	08.11 08:13	13.11 09:57	121:44	438283	0'',000	+0'',023	0,029	0,025	0,068	0,090
3.3	14.11 08:01	15.11 02:45	18:44	67429	-0'',001	+0'',002	0,038	0,040	0,038	0,040
3.4	15.11 12:46	16.11 11:59	23:13	83610	0'',000	+0'',002	0,027	0,019	0,060	0,068
3.5	16.11 12- 27	17.11 16:28	28:01	100868	0'',000	+0'',001	0,027	0,020	0,099	0,115
				Общее количество PPP решений	Средние из 5-ти серий НАП «ГЕО- РС» абсолютные значения отклонения от координат Опорного пункта «POIN»				Средние значения СКП (P 95%)	
					delta B	delta L	delta 2D (м)	delta H (м)	2D (м)	H (м)
				1 709 120	0'',000	+0'',010	0,031	0,027	0,067	0,084

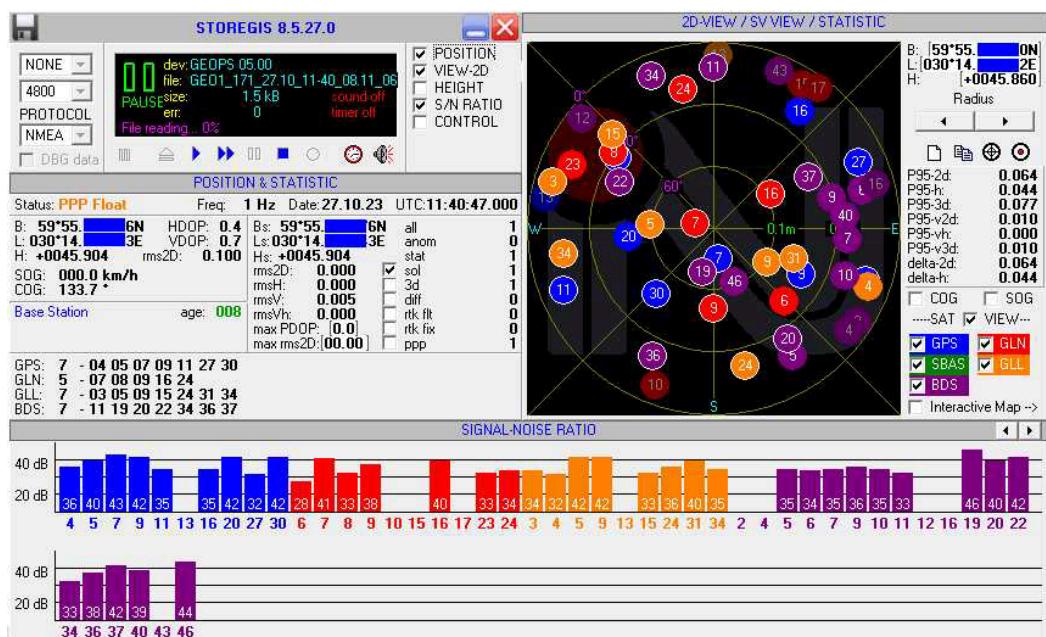


Рис. 19. Начало серии № 3.1 НАП «ГЕО-РС» 27.10.2023 в 11:40:47. Возраст / age корректирующей SSR-информации, принимаемой НАП «ГЕО-РС», составляет 008 сек.

Авторы особенно хотели бы обратить внимание на то, что в течение всего дня 01.11.2023, включая периоды уходов из PPP-режима НАП «ОС-113» с 09:43 по 10:06 и с 15:49 до 16:05, PPP-серия № 3.1 НАП «ГЕО-PC» продолжалась в высокоточном режиме PPP Float с нормальным возрастом / age корректирующей SSR-информации от 006 до 008 с (рис. 20–22).

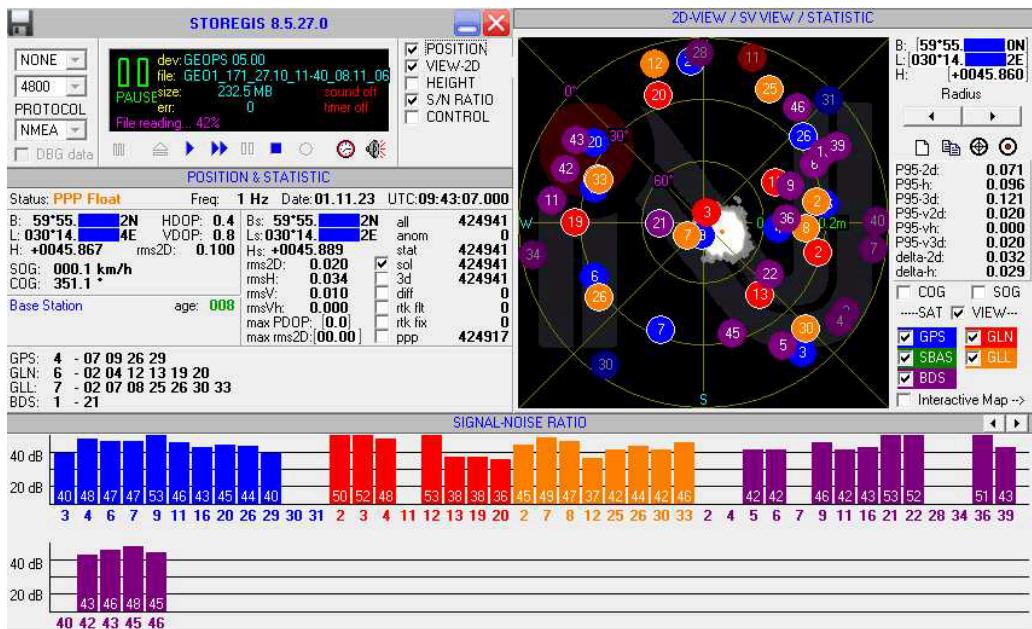


Рис. 20. Серия № 3.1 НАП «ГЕО-PC» в 09:43:07 01.11.2023 в момент ухода из режима PPP и завершения серии № 2.12 НАП «ОС-113». Возраст / age корректирующей SSR-информации, принимаемой НАП «ГЕО-PC», составляет 008 с

На рис. 21 и 22 авторами так же, как и на рис. 18, специально удалены из мишени разноцветные кружки, обозначающие спутники различных ГНСС, чтобы в центре мишени были отчётливо видны отметки всех значений координат, определенных НАП «ГЕО-PC» на соответствующий момент времени. Как видно на рис. 21, 01.11.2023 на момент времени 15:50:57 по результатам 446967 PPP-решений СКП_{БезИниц-и} координат на плоскости составила Р95-2d = 0,071 м, а СКП_{БезИниц-и} высоты Р95-h = 0,097 м.

Более того, как отчётливо видно на рис. 22, все полученные с начала серии № 3.1 НАП «ГЕО-PC» 27.10.2023 на момент времени 16:05:56 01.11.2023 по результатам почти 450 тыс. PPP-решений отметки координат находятся на удалении менее 0,1 м от «контрольных» координат опорного пункта «POIN».

Навигация и гидрография, 2024, № 2 (75)

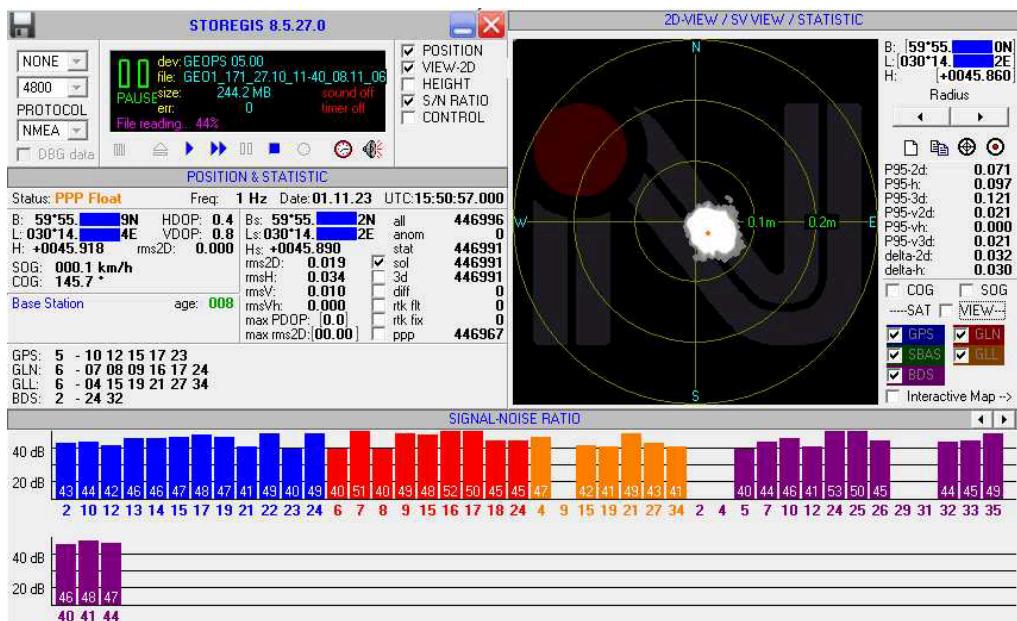


Рис. 21. Серия № 3.1 НАП «ГЕО-PC» в 15:50:57 01.11.2023 сразу после ухода из режима PPP и завершения серии № 2.13 НАП «ОС-113». Возраст / age корректирующей SSR-информации, принимаемой НАП «ГЕО-PC», составляет 008 с

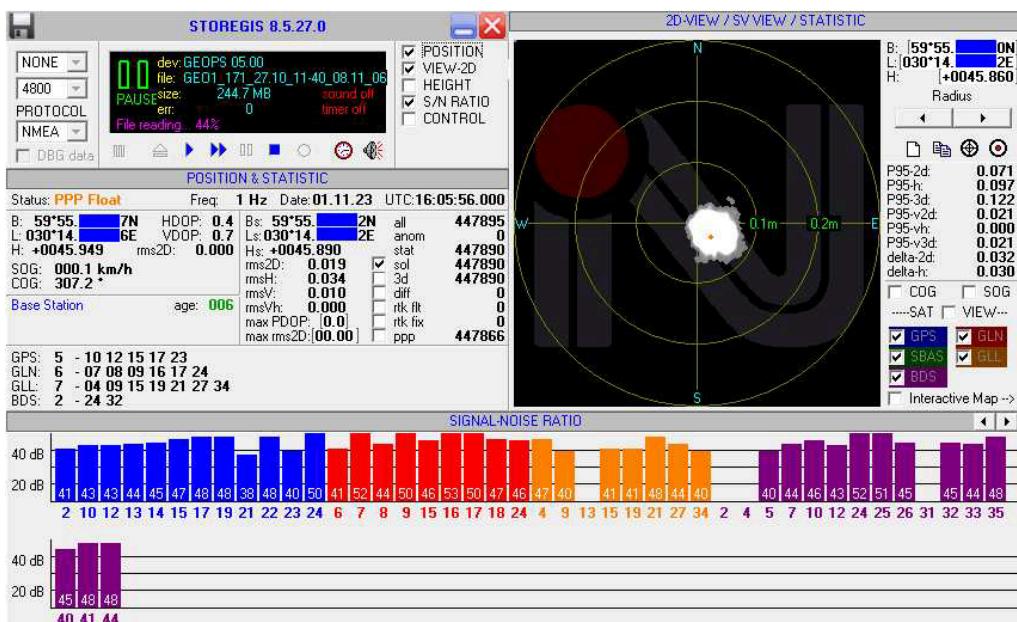


Рис. 22. Серия № 3.1 НАП «ГЕО-PC» 01.11.2023 в 16:05:56 в момент начала серии № 2.14 НАП «ОС-113». Возраст / age корректирующей SSR-информации, принимаемой НАП «ГЕО-PC», составляет 006 с

Аналогичная ситуация сложилась в дальнейшем 05.11.2023 в период нескольких уходов НАП «ОС-113» из PPP-режима с 17:06 до 19:47. Максимальный уход величиной порядка 3,6 м на плоскости от центра опорного пункта «POIN» был зафиксирован в 17:10:28 (рис. 23). Для наглядности из мишени на рис. 23 удалены разноцветные кружки, обозначающие спутники различных ГНСС, а радиус окружностей на мишени выбран равным 2 м. Следует отметить, что возраст / age корректирующей SSR-информации, принимавшейся НАП «ОС-113» в этот момент, был нормальным и составлял 006 с.



Рис. 23. НАП «ОС-113». Наибольший уход до 3.6 м из режима PPP 05.11.2023 в 17:10:28 в период между сериями №№ 2.14 и 2.15 (красная отметка на мишени строго к N от центра). Возраст / age корректирующей SSR-информации, принимавшейся НАП «ОС-113», составляет 006 сек.

При этом работа НАП «ГЕО-РС» в указанный период времени 05.11.2023 с 17:06 до 19:47 продолжалась в высокоточном режиме PPP Float, см. рис. 24, 25 и 26.

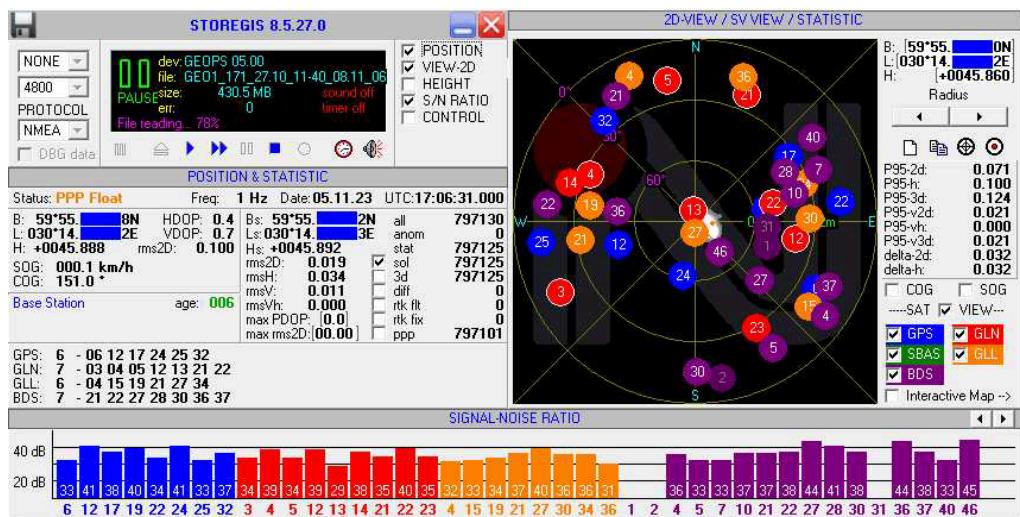


Рис. 24. Серия № 3.1 НАП «ГЕО-PC» 05.11.2023 в 17:06:31 в момент окончания серии № 2.14 НАП «ОС-113». Возраст / age корректирующей SSR-информации, принимаемой НАП «ГЕО-PC», составляет 006 сек.

На рис. 25 приведен скриншот ПО STOREGIS, показывающий работу НАП «ГЕО-PC» в момент наибольшего ухода НАП «ОС-113» из PPP-режима до 3.6 м 05.11.2023 в 17:10:22. Для наглядности из мишени удалены разноцветные кружки, обозначающие спутники различных ГНСС.

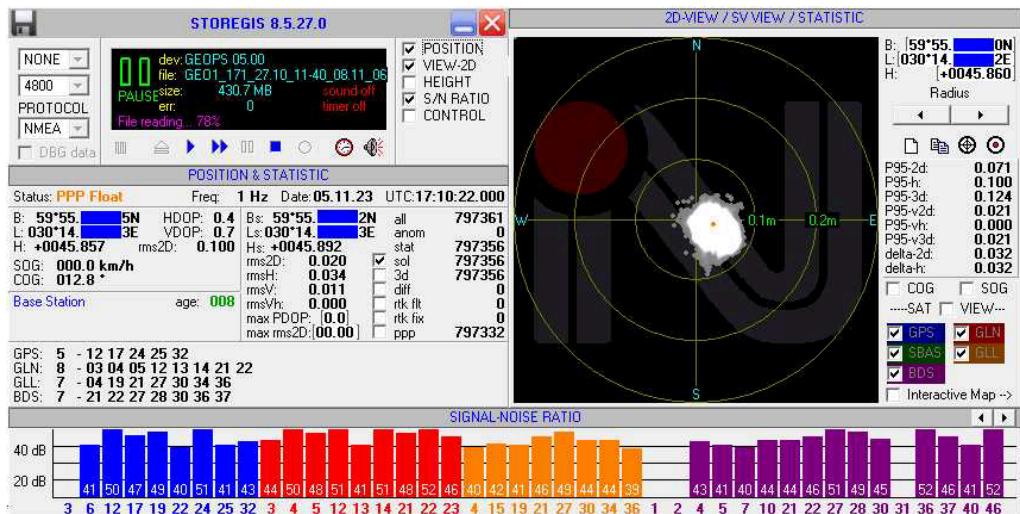


Рис. 25. Серия № 3.1 НАП «ГЕО-PC» 05.11.2023 в 17:10:22 в момент наибольшего ухода НАП «ОС-113» из PPP-режима. Возраст / age корректирующей SSR-информации, принимаемой НАП «ГЕО-PC», составляет 008 с

Как видно на рис. 25, все отметки координат, полученные НАП «ГЕО-PC» по результатам почти 800 тыс. непрерывных PPP-решений, лежат внутри круга, ограниченного радиусом 0,1 м. Отметим, что в этот же момент по результатам почти

800 тыс. непрерывных PPP-решений СКП_{БезИнци-и} координат на плоскости составила Р95-2d = 0,071 м, а СКП_{БезИнци-и} высоты Р95-h = 0,100 м.

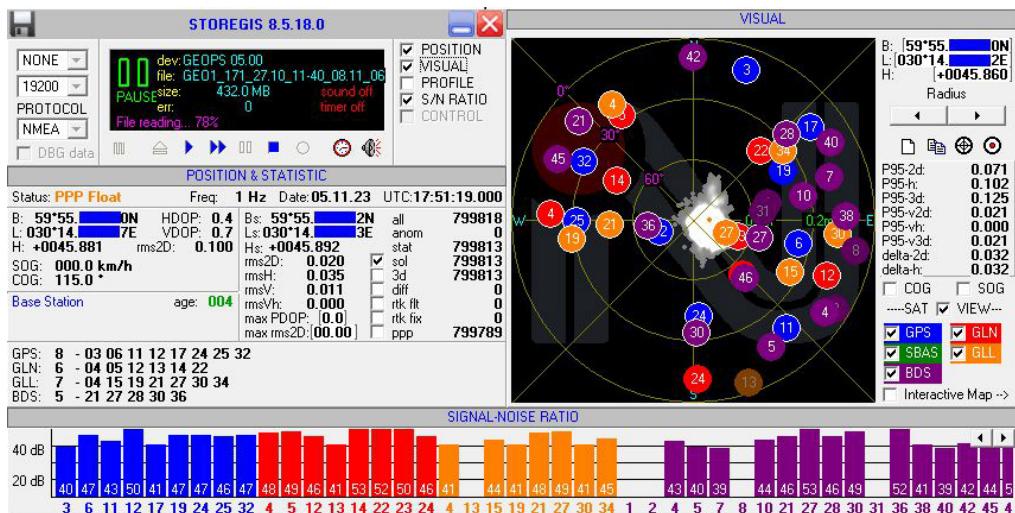


Рис. 26. Серия № 3.1 НАП «ГЕО-PC» 05.11.2023 в 17:51:19 после возврата НАП «ОС-113» в PPP-режим и начала серии № 2.15. Возраст / age корректирующей SSR-информации, принимаемой НАП «ГЕО-PC», составляет 004 с

Рис. 24–26 наглядно иллюстрируют непрерывную работу НАП «ГЕО-PC» в высокоточном режиме PPP Float 05.11.2023 в период нескольких уходов НАП «ОС-113» из PPP-режима с 17:06 до момента времени 19:47, когда НАП «ОС-113» возвратился в высокоточный режим, что одновременно стало началом серии № 2.15 (табл. 2).

К большому сожалению авторов, 08.11.2023 в 06:43 утра по причине отказа внешнего общегородского электроснабжения 220 вольт сервер сети интернет АО «ГНИНГИ» прекратил работу. Это стало причиной одновременного окончания PPP-серий НАП «ОС-113» № 2.15 и НАП «ГЕО-PC» № 3.1 из-за прекращения поступления по сети интернет корректирующей SSR-информации в оба НАП от отключившегося сервера АО «ГЛОНАСС» (табл. 2, 3). После восстановления электроснабжения и возобновления работы сервера регистрация данных PPP-серий была возобновлена. Серия НАП «ГЕО-PC» № 3.2 началась в 08:13 и продолжалась до 09:57 13.11.2023 (табл. 3). Серия НАП «ОС-113» № 2.16 началась 08.11.2023 в 09:49 и продолжалась до 04:23 13.11.2023 (табл. 2). При этом серия НАП «ОС-113» № 2.17 началась 13.11.2023 в 09:25, т. е. до окончания серии № 3.2 НАП «ГЕО-PC» (табл. 3). Таким образом, перерыв в регистрации данных НАП «ОС-113» от момента окончания серии № 2.16 до начала серии № 2.17 был полностью перекрыт высокоточной PPP-серий НАП «ГЕО-PC» № 3.2. В свою очередь, серия НАП «ОС-113» № 2.17, продолжавшаяся, как показано на рис. 27 и в табл. 2, до 12:29 16.11.2023, перекрыла разрывы в регистрации данных между PPP-сериями НАП «ГЕО-PC» № 3.2 и № 3.3, № 3.3 и № 3.4, а также № 3.5 и 3.6 (табл. 3).

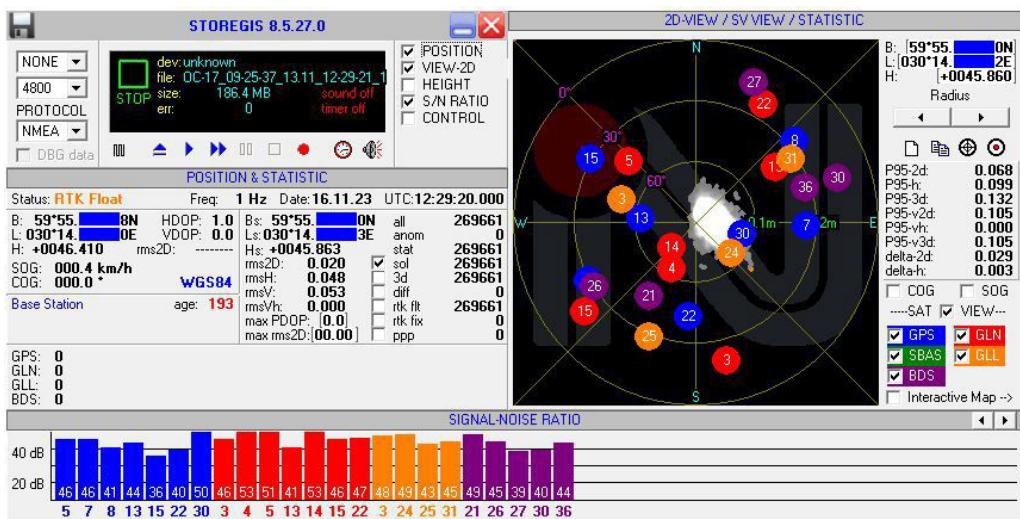


Рис. 27. Момент ухода из режима PPP и завершения серии № 2.17 НАП «ОС-113» 16.11.2023 в 12:29. Возраст / age корректирующей SSR-информации, принимаемой НАП «ОС-113», составляет 193 с

Как видно из рис. 27, уход НАП «ОС-113» из режима PPP/RTK Float вновь вызван значительным ростом возраста / *age* корректирующей SSR-информации, получаемой от сервера АО «ГЛОНАСС», который достиг 193 с в 12:29:20 16.11.2023 (см. рис. 27, *age* 193 под словами WGS84).

Серия № 3.5 НАП «ГЕО-PC» началась 16.11.2023 в 12:27 (рис. 28, табл. 3), т. е. до завершения серии № 2.17 НАП «ОС-113». Таким образом, PPP-серия № 3.5 НАП «ГЕО-PC» перекрыла период с момента ухода НАП «ОС-113» из режима PPP и завершения серии № 2.17 до момента возврата НАП «ОС-113» в режим PPP/RTK Float и соответствующего начала серии № 2.18 в 12:50:04 16.11.2023 (рис. 29). Как видно на рис. 29, возраст / *age* корректирующей SSR-информации, получаемой от сервера АО «ГЛОНАСС», в момент начала серии № 2.18 составил 007 сек. Для сравнения возраст / *age* корректирующей SSR-информации, получаемой от сервера АО «ГЛОНАСС» НАП «ГЕО-PC», практически в этот же момент времени 12:50:59 16.11.2023 составил 004 с (рис. 30).

Гидрография и морская картография

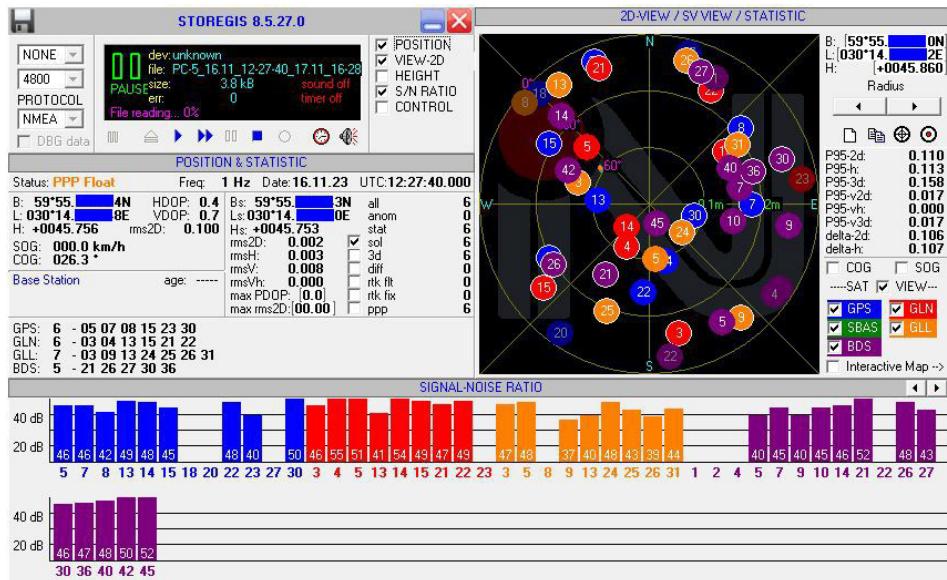


Рис. 28. Момент начала высокоточного режима PPP Float серии № 3.5 НАП «ГЕО-РС» 16.11.2023 в 12:27:40

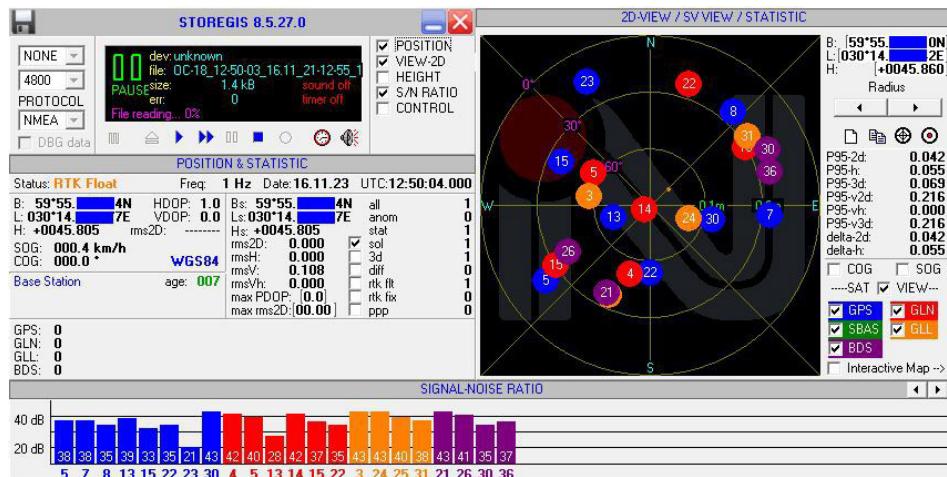


Рис. 29. Момент возврата НАП «ОС-113» в высокоточный режим PPP/RTK Float и соответствующего начала серии № 2.18 в 12:50:04 16.11.2023

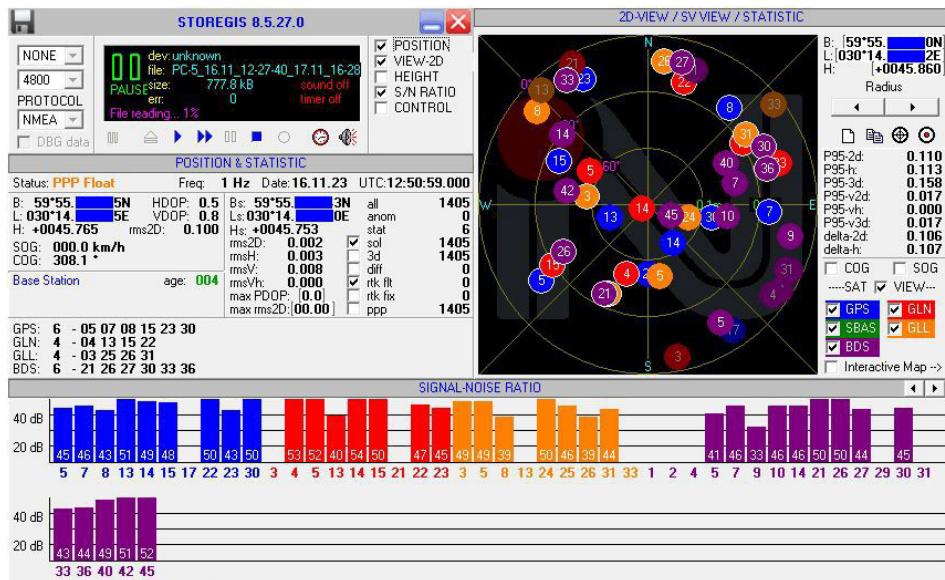


Рис. 30. Режим PPP Float серии № 3.5 НАП «ГЕО-PC». Возраст / age корректирующей SSR-информации в 12:50:59 16.11.2023 составляет 004 с

Заключительная серия основного этапа тестирования НАП «ГЕО-PC» № 3.5 завершилась 17.11.2023 в 16:28, а заключительная серия основного этапа тестирования НАП «ОС-113» № 2.18 завершилась 17.11 в 21:12 (рис. 31, табл. 2). Окончание серии № 2.18 стало одновременно и окончанием основного этапа тестирования PPP-сервиса АО «ГЛОНАСС».

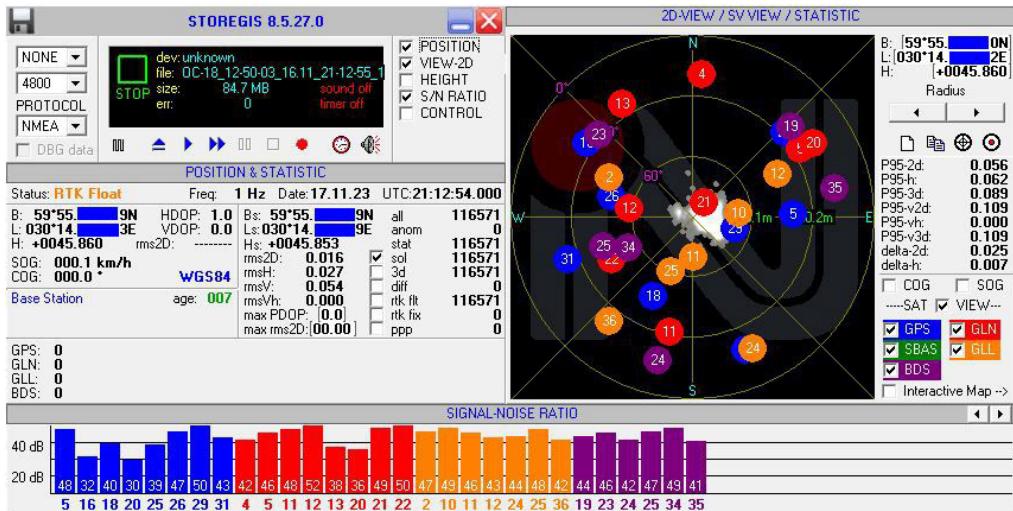


Рис. 31. Момент окончания серии № 2.18 НАП «ОС-113» в 21:12:54 17.11.2023. Возраст / age корректирующей SSR-информации составляет 007 сек.

Как видно на рис. 31, в момент окончания завершающей серии тестирования № 2.18 по результатам 116571 непрерывных PPP-решений СКП_{БезИниц-и} координат на плоскости составила Р95-2d = 0,056 м, а СКП_{БезИниц-и} высоты Р95-h = 0,062 м

4. Оценка точности и результаты основного этапа тестирования

Главной задачей основного этапа тестирования являлась оценка точности местоопределения с подключением приёмников ГНСС к PPP-серверу АО «ГЛОНАСС» в режиме мультисистемных PPP-серий, преимущественно более продолжительных, чем большинство серий наблюдений на предварительном этапе тестирования, результаты которых были приведены во второй части статьи [1]. Также интерес вызывала и собственно продолжительность мультисистемных PPP-серий с точки зрения ожидаемой возможной доступности высокоточного местоопределения на протяжённых и длительных по времени промерных галсах при выполнении гидрографических работ в акватории СМП.

4.1. Оценка точности PPP-сервиса АО «ГЛОНАСС»

Для целей оценки точности PPP-сервиса АО «ГЛОНАСС» используем определение точности, приведенное в «Основных направлениях (Плане) развития радионавигации государств – участников СНГ на 2019–2024 годы», утвержденных Решением Совета глав правительств СНГ от 25 октября 2019 года. Согласно этому определению «Точность местоопределения – это степень соответствия местоположения потребителя, определенного в данный момент с помощью навигационной системы, его истинному положению. Точность местоопределения характеризуется величиной отклонения измеренных координат от истинных. Количественной мерой точности могут являться абсолютное значение разности между определенными и истинными значениями координат, а также среднеквадратическая погрешность» [9].

Как указано выше в статье, в качестве «истинных» координат в ходе тестирования приняты высокоточные координаты опорного пункта «POIN» АО «ГНИГИ», которые были определены в 2023 г. в текущей версии Международной наземной системы отсчёта ITRS – ITRF 2014 на эпоху измерений специалистами АО «Российские космические системы» методом «длиннобазисных высокоточных местоопределений» относительно базисных станций IGS: MDVJ (Менделеево), POLV (Полтава) и RIGA (Рига).

Результаты оценки точности, приведённые в табл. 2 показывают, что среднеквадратические погрешности СКП_{БезИниц-и} координат на плоскости Р95-2d 17-ти из 18-ти серий с использованием НАП «ОС-113» лежат в интервале от 0,051 м до 0,068 м. И только у одной серии № 2.15 СКП_{БезИниц-и} превысила этот интервал и составила Р95-2d = 0,075 м. Среднеквадратические погрешности СКП_{БезИниц-и} высоты 16-ти из 18-ти серий НАП «ОС-113» Р95-h находятся в интервале от 0,057 м до 0,099 м, и только у двух серий незначительно превышают эти значения. У серии № 2.15 Р95-h=0,109 м, а у серии № 2.13 Р95-h=0,109 м. При этом полученные на основе 3 млн. 673 тыс. 425 PPP-решений средние из 18-ти серий значения СКП_{БезИниц-и} координат на плоскости Р95-2d_{cp} = 0,056 м, а средние из 18-ти серий значения СКП_{БезИниц-и} высоты Р95-h_{cp} = 0,072 м.

В свою очередь, из табл. 3 видно, что СКП_{БезИниц-и} координат на плоскости Р95-2d в всех пяти серий наблюдений, выполненных с использованием НАП «ГЕО-РС», лежат в интервале от 0,038 м до 0,099 м. СКП_{БезИниц-и} высоты четырех из пяти серий НАП «ОС-113» Р95-h составляет от 0,040 м до 0,105 м, а у одной серии № 3.5 Р95-h = 0,115 м. Полученные на основе 1 млн. 709 тыс. 120 PPP-решений средние из пяти серий значения СКП_{БезИниц-и} координат на плоскости Р95-2d_{cp} = 0,067 м, а средние из пяти серий значения СКП_{БезИниц-и} высоты Р95-h_{cp} = 0,084 м.

Максимальные абсолютные значения разности между определенными средневзвешенными координатами 18-ти серий НАП «ОС-113» и «истинными» значениями координат опорного пункта «POIN» на плоскости составляют delta 2D = 0,029 м (у серий №№ 2.15 и 2.17), а максимальное отклонение по высоте составляет delta H = 0,014 м у серии № 2.9, см. табл. 4. Для НАП «ГЕО-РС» максимальные абсолютные значения разности между определенными средневзвешенными координатами пяти серий и «истинными» значениями координат опорного пункта «POIN» на плоскости составляют delta 2D = 0,038 м у серии № 3.3, а максимальное отклонение по высоте составляет delta H = 0,040 м также у серии № 3.3 (табл. 4).

Таблица 4. Максимальные из всех серий наблюдений значения СКП и отклонений средневзвешенных координат от истинных координат опорного пункта «POIN»

Приёмник ГНСС	Максимальные из значений отклонений координат серий от центра Опорного пункта «POIN»				Максимальные значения СКП (Р 95%)	
	delta B	delta L	delta 2D (м) Абсол. Знач-е	delta H (м) Абсол. Знач-е	2D (м)	H (м)
НАП «ОС-113»	+0'',036	+0'',108	0,029	0,038	0,075	0,116
НАП «ГЕО-РС»	-0'',001	+0'',023	0,038	0,040	0,099	0,115

4.2. Оценка доступности PPP-сервиса АО «ГЛОНАСС»

Для целей оценки доступности PPP-сервиса АО «ГЛОНАСС» возьмём за основу определение доступности, приведенное в «Основных направлениях (Плане) развития радионавигации государств – участников СНГ на 2019–2024 годы», согласно которому «Доступность (эксплуатационная готовность) – это способность РНС обеспечить проведение навигационных определений в заданный момент времени в определенной зоне действия. Доступность РНС характеризуется вероятностью получения потребителем в рабочей зоне достоверной навигационно-временной информации в определенный период времени и с требуемой точностью» [9, стр. 14].

Если проанализировать совместно табл. 2 и 3 на предмет взаимного начала/завершения PPP-серий НАП «ОС-113» и НАП «ГЕО-РС» во второй период основного этапа тестирования с момента начала параллельного использования обоих НАП, то будет очевидным, что в любой момент времени, начиная с 11:21 25.10.2023 (начало серии № 2.12 НАП «ОС-113») до 06:43 утра 08.11.2023 (момент прекращения работы сервера сети интернет АО «ГНИГИ» из-за отказа внешнего электроснабжения 220 вольт) была обеспечена работа в высокоточном режиме PPP/RTK Float хотя бы одного из вышеуказанных НАП. Аналогично с момента возобновления работы сервера АО «ГНИГИ» в 08:43 08.11.2023 (начало серии № 3.2 НАП «ГЕО-РС») до завершения основного этапа тестирования в 21:12 17.11.2023

(момент окончания серии № 2.18 НАП «ОС-113») также была обеспечена работа как минимум одного из вышеуказанных НАП в высокоточном режиме PPP/RTK Float.

Продолжительность второго периода основного этапа тестирования с 11:21 25.10.2023 до 21:12 17.11.2023 составила 23 сут. 9 час. 51 мин. или 33711 мин. Обозначим этот период как $T_{\text{тест}}$. Период времени без функционирования сервера сети интернет АО «ГНИГИ» (когда необходимая для работы в высокоточном режиме PPP/RTK Float SSR-информация от сервера АО «ГЛОНАСС» в НАП не поступала) составил 1 час 30 мин. или 90 мин. Обозначим этот период как $T_{\text{безPPP}}$. Тогда доступность сервера АО «ГЛОНАСС», которую обозначим буквой D_{PPP} , можно оценить по формуле (1):

$$D_{\text{PPP}} = (1 - T_{\text{безPPP}} / T_{\text{тест}}) * 100\% = (1 - 0,003) * 100\% = 99,7\%. \quad (1)$$

Итак, можно констатировать, что доступность PPP-сервиса АО «ГЛОНАСС» в течение 23 суток 9 часов и 51 минуты непрерывных наблюдений в период с 11:21 25.10.2023 до 21:12 17.11.2023 в зоне Опорной точки «POIN» в г. Санкт-Петербург вблизи побережья Финского залива (при наличии двух подключённых к PPP-серверу независимых комплектов НАП «ОС-113» и НАП «ГЕО-РС») составила $D_{\text{PPP}} = 99,7\%$. Это значение практически соответствует Требованиям морских потребителей к доступности, изложенными в «Основных направлениях (Плане) развития радионавигации государств – участников СНГ на 2019–2024 годы» [9, стр. 19].

Фактически (по данным наблюдений, произошедших на другом приёмнике ГНСС в офисе АО «КБ НАВИС») в период $T_{\text{безPPP}}$ выхода из строя сервера сети интернет АО «ГНИГИ» PPP-сервер АО «ГЛОНАСС» продолжал непрерывно работать и передавать SSR-информацию. С учётом этого можно оценить доступность PPP-сервиса АО «ГЛОНАСС» D_{PPP} в течение второго периода основного этапа тестирования как стремящуюся к 100 %.

4.3. Оценка непрерывности функционирования PPP-сервиса АО «ГЛОНАСС»

«Непрерывность обслуживания (функционирования) системы», которая характеризуется вероятностью обслуживания, в соответствии с требованиями для морских потребителей, изложенными в «Основных направлениях (Плане) развития радионавигации государств – участников СНГ на 2019–2024 годы», должна составлять для морских потребителей не менее 99,85 % в течение 3 часов [9, стр. 19].

С учётом данных, приведенных выше в п. 4.2, непрерывность функционирования PPP-сервиса АО «ГЛОНАСС» во второй период основного этапа тестирования (при наличии двух подключённых к PPP-серверу независимых комплектов НАП «ОС-113» и НАП «ГЕО-РС») можно оценить вероятностью 100 % в течение более 331 часа с 11:21 25.10.2023 до 06:43 утра 08.11.2023, и той же вероятностью 100 % в течение более 224 часов с 08:43 08.11.2023 до момента завершения тестирования в 21:12 17.11.2023.

4.4. Оценка продолжительности мультисистемных PPP-серий

Как показывает анализ табл. 2, только две из восемнадцати PPP-серий НАП «ОС-113» (серии № 2.9 и № 2.13) длились менее полусуток каждая. Ещё три серии (№ 2.1, № 2.3 и № 2.10) длились от полусуток до суток. Абсолютное большинство серий (13 из 18) длились более суток каждая, из них пять серий длились от суток до двух суток, четыре серии – от двух до четырёх суток, а продолжительность ещё четырёх серий (№ 2.11, № 2.12, № 2.14 и № 2.16) превысила четверо суток. Следует

отметить, что во второй период основного этапа тестирования (когда НАП «ОС-113» был подключен к PPP-серверу АО «ГЛОНАСС» с использованием параметров, выделенных АО «ГНИИГИ») только одна PPP-серия № 2.13 из семи серий длилась менее суток, а остальные серии длились более суток. Самой продолжительной из серий НАП «ОС-113» стала серия № 2.12, которая длилась почти семь суток.

В свою очередь, из табл. 3 следует, что коротких серий НАП «ГЕО-РС» продолжительностью менее полусуток не было, две из пяти серий продолжались от полусуток до одних суток каждая, а две самые продолжительные серии (№ 3.1 и № 3.2) длились более пяти суток каждая. При этом самая продолжительная из всех PPP-серий, выполненных в ходе основного этапа тестирования – серия НАП «ГЕО-РС» № 3.1, длилась непрерывно более 11 суток 19 час.

В заключение с учётом изложенного в пп. 4.1–4.4. по результатам основного этапа тестирования можно сделать следующие выводы.

1. Определённые в ходе основного этапа тестирования среднеквадратические погрешности СКП абсолютно всех высокоточных мультисистемных PPP-серий, выполненных как НАП «ОС-113», так и НАП «ГЕО-РС» (которые приведены в табл. 2 и 3), соответствуют значениям Горизонтальной (до 10 см) и Вертикальной (до 15 см) точности, заявленным в Технической спецификации PPP-сервиса АО «ГЛОНАСС» [10].

2. Для 18-ти серий НАП «ОС-113» значения СКП_{БезИниц-и} координат в горизонтальной плоскости Р95-2d лежат в интервале от 0,051 м до 0,075 м, а СКП_{БезИниц-и} высоты Р95-h – в интервале от 0,057 м до 0,109 м. Средние значения СКП_{БезИниц-и} координат на плоскости Р95-2d_{cp} = 0,056 м, а средние значения СКП_{БезИниц-и} высоты Р95-h_{cp} = 0,072 м.

Максимальные абсолютные значения отклонения средневзвешенных координат серий НАП «ОС-113» от истинных координат опорного пункта «POIN», которые приведены в табл. 4, составили в горизонтальной плоскости *delta 2D* = 0,038 м, и по высоте - *delta H* = 0,040 м.

3. Для пяти серий НАП «ГЕО-РС» значения СКП_{БезИниц-и} координат в горизонтальной плоскости Р95-2d лежат в интервале от 0,038 м до 0,099 м, а СКП_{БезИниц-и} высоты Р95-h – в интервале от 0,040 м до 0,115 м. Средние значения СКП_{БезИниц-и} координат на плоскости Р95-2d_{cp} = 0,067 м, а средние значения СКП_{БезИниц-и} высоты Р95-h_{cp} = 0,084 м.

Максимальные абсолютные значения отклонения средневзвешенных координат серий НАП «ГЕО-РС», приведенные в табл. 4, от истинных координат опорного пункта «POIN» составили в горизонтальной плоскости *delta 2D* = 0,029 м, и по высоте – *delta H* = 0,038 м.

4. Полученные в ходе тестирования оценки доступности и непрерывности функционирования PPP-сервиса АО «ГЛОНАСС» характеризуется вероятностью от 97 % до 100 % на интервале второго периода основного этапа тестирования продолжительностью 23 сут. 9 час. 51 мин. при использовании двух подключённых к PPP-серверу независимых комплектов НАП «ОС-113» и НАП «ГЕО-РС». Такие оценки в целом соответствуют требованиям морских потребителей, изложенным в «Основных направлениях (Плане) развития радионавигации государств – участников СНГ на 2019–2024 годы» [9].

5. Абсолютное большинство мультисистемных PPP-серий НАП «ОС-113» – 13 из 18, длились более суток каждая. Самая продолжительная из серий НАП «ОС-113» № 2.12 длилась почти семь суток. Продолжительность четырёх из пяти

мультисистемных PPP-серий НАП «ГЕО-РС» составила от суток и более (к ним отнесена и серия 3.4, которая длилась 23 часа 13 мин, т.е. на 47 мин. менее суток). Самая продолжительная из серий НАП «ГЕО-РС» № 3.1 длилась непрерывно более 11 суток 19 час. Продолжительность непрерывных PPP-серий имеет весьма важное значение с точки зрения сокращения потерь времени на выполнение повторной синхронизации НАП и на последующее возвращение гидрографического судна на промерный галс с учётом достаточно короткого периода летней арктической навигации в Акватории СМП.

Полученные в ходе семи недель основного этапа тестирования результаты оценок точности, доступности и непрерывности функционирования PPP-сервиса АО «ГЛОНАСС», а также значительная продолжительность мультисистемных PPP-серий позволяют авторам рекомендовать использование PPP-сервиса АО «ГЛОНАСС» в комбинации с апробированной при тестировании отечественной навигационной мульти-ГНСС аппаратурой для осуществления координирования при выполнении гидрографической съемки и других специальных высокоточных видов работ в Арктике в качестве альтернативы ушедшему с российского рынка иностранным провайдерам аналогичных услуг. При этом авторы, учитывая ход и результаты тестирования, считают необходимым иметь на борту судов не менее двух независимых комплектов отечественной навигационной мульти-ГНСС аппаратуры разных производителей для надёжного обеспечения требуемого уровня доступности PPP-сервиса, а также длительного и непрерывного периода высокоточного местоопределения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смолин В. М., Решетняк С. В., Миляков Д.Ф., Онищенко О. Л. Проблемы высокоточного координирования гидрографических и других морских работ в акватории Северного морского пути в условиях санкционных ограничений и пути их решения. Часть II. Российский инновационный сервис высокоточного определения координат от компании «АО ГЛОНАСС» // Навигация и гидрография. – 2023. – № 73. – С. 7–33.
2. Назаров В. Н. Актуальное состояние Глобальных Навигационных Спутниковых Систем. Сайт ГБУ "ЦЭИС", Москва, 9 с. URL: <https://ceiis.mos.ru/presscenter/nauchno-publisisticheskie-stati/detail/11665732.html>. – Посл. обращение 06.04.2024.
3. Xianjie Li, Jean-Pierre Barriot, Yidong Lou, Weixing Zhang, Pengbo Li, Chuang Shi. Towards Millimeter-Level Accuracy in GNSS-Based Space Geodesy: A Review of Error Budget for GNSS Precise Point Positioning // Surveys in Geophysics. – 2023. Vol. 44. Pp. 1691–1780. URL: <https://doi.org/10.1007/s10712-023-09785-w>. – Посл. обращение 16.04.2024.
4. Erratum: Switch to IGB14 reference frame / Исправление: переход на отсчетную основу IGB14. Сайт Международной службы ГНСС / International GNSS Service, Documents, IGSMAIL-7925. URL: <https://lists.igs.org/pipermail/igsmai/2020/007921.html>. – Посл. обращение 17.04.2024.
5. Marques H. A, Marques H. A. S, Aquino M., Veettil S. V., Monico J. F. G. Accuracy assessment of Precise Point Positioning with multi-constellation GNSS data under ionospheric scintillation effects. // J. Space Weather Space Clim. – 2018. – Vol. 8. – A15. – 14 p. <https://doi.org/10.1051/swsc/2017043> URL: https://www.swsc-journal.org/articles/swsc/full_html/2018/01/swsc170013/swsc170013.html. – Посл. обращение 19.04.2024.
6. Basu S., Groves K. M., Specification and forecasting of outages on satellite communication and navigation systems // Space Weather. Geophysical Monograph. – 2001. – Vol. 125. – Pp. 423–430. American Geophysical Union, Washington, D. C., URL: Space Weather - Song - 2001 - Geophysical Monograph Series - Wiley Online Library. – Посл. обращение 19.04.2024.
7. Bisnath S., Groves K.M., Specification and forecasting of outages on satellite communication and navigation systems. Space Weather. Geophysical Monograph, Vol. 125, pp. 424–430 American

- Geophysical Union, Washington, D. C., 2001 DOI:10.1029/GM125p0423 . – Посл. обращение 19.04.2024.
8. Er-Jie Zhong, Ting-Zhu Huang. Geometric Dilution of Precision in Navigation Computation. Proceedings of the Fifth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Dalian, 13-16 August 2006. – Pp. 4116–4119. DOI:10.1109/ICMLC.2006.258871 - (PDF) Geometric Dilution of Precision in Navigation Computation (researchgate.net). – Посл. обращение 14.04.2024.
9. Основные направления (План) развития радионавигации государств – участников СНГ на 2019–2024 годы. Утверждены Решением Совета глав правительств СНГ от 25 октября 2019 года. г. Москва. С. 13–20. URL: <https://e-ecolog.ru/docs/TYN5dcix11eruxt3ApkIX/full>. – Посл. обращение 03.05.2024.
10. Официальный сайт акционерного общества «ГЛОНАСС». Раздел Precise Point Positioning (PPP). URL: <https://ppp.aoglonass.ru/>. – Посл. обращение 03.05.2024.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

СМОЛИН Владимир Максимович, генеральный директор АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», кандидат технических наук, mail@gningi.ru.

Vladimir M. SMOLIN, Director General of the State Research Navigation-Hydrographic Institute, CandSc, mail@gningi.ru.

РЕШЕТНИЯК Сергей Витальевич, главный научный сотрудник – советник генерального директора АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», доктор технических наук, svr@gningi.ru.

Sergey V. RESHETNYAK, chief scientist – advisor to the Director General of the State Research Navigation-Hydrographic Institute, DSc, svr@gningi.ru.

МИЛЯКОВ Денис Федорович, инженер 1 категории АО «Научный центр прикладной электродинамики», кандидат технических наук, denism@navis.ru.

Denis F. MILYAKOV, 1st category engineer, Scientific Center of Applied Electrodynamics, JSC, CandSc, denism@navis.ru.

ОНИЩЕНКО Олег Леонидович, генеральный директор ООО «Навгеоком ДифСервис Групп», seadgps@mail.ru.

Oleg L. ONISHCHENKO, Director General, Navgeocom DifService Group LLC, seadgps@mail.ru.

УДК 621.396

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ
ГЛОБАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ЗЕМЛИ С АНАЛОГИЧНОЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ ГЛОБАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ
ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ**

Катенин В. А., Чубыкин А. А.

АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», г. Санкт-Петербург.

Аннотация. Рассматривается структура международной Глобальной системы геодезических наблюдений. Проведен сравнительный анализ возможностей отечественной Глобальной системы мониторинга геодезических параметров Земли и международной Глобальной системы геодезических наблюдений. Выявлены узкие места отечественной системы и даны рекомендации по их устранению.

Ключевые слова: Сравнительный анализ, геодезические параметры Земли, Глобальная система мониторинга, система геодезических наблюдений.

Для цитирования: Катенин В. А., Чубыкин А. А. Сравнительный анализ эффективности отечественной глобальной системы мониторинга геодезических параметров земли с аналогичной международной глобальной системой геодезических наблюдений // Навигация и гидрография. – 2024. – № 2 (75). – С. 109–123.

***COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF THE DOMESTIC
GLOBAL SYSTEM FOR MONITORING GEODETIC PARAMETERS OF THE
EARTH WITH A SIMILAR INTERNATIONAL GLOBAL GEODETIC
OBSERVING SYSTEM***

Katenin V. A., Chubykin A. A.

State Research Navigation-Hydrographic Institute, JSC, St. Petersburg.

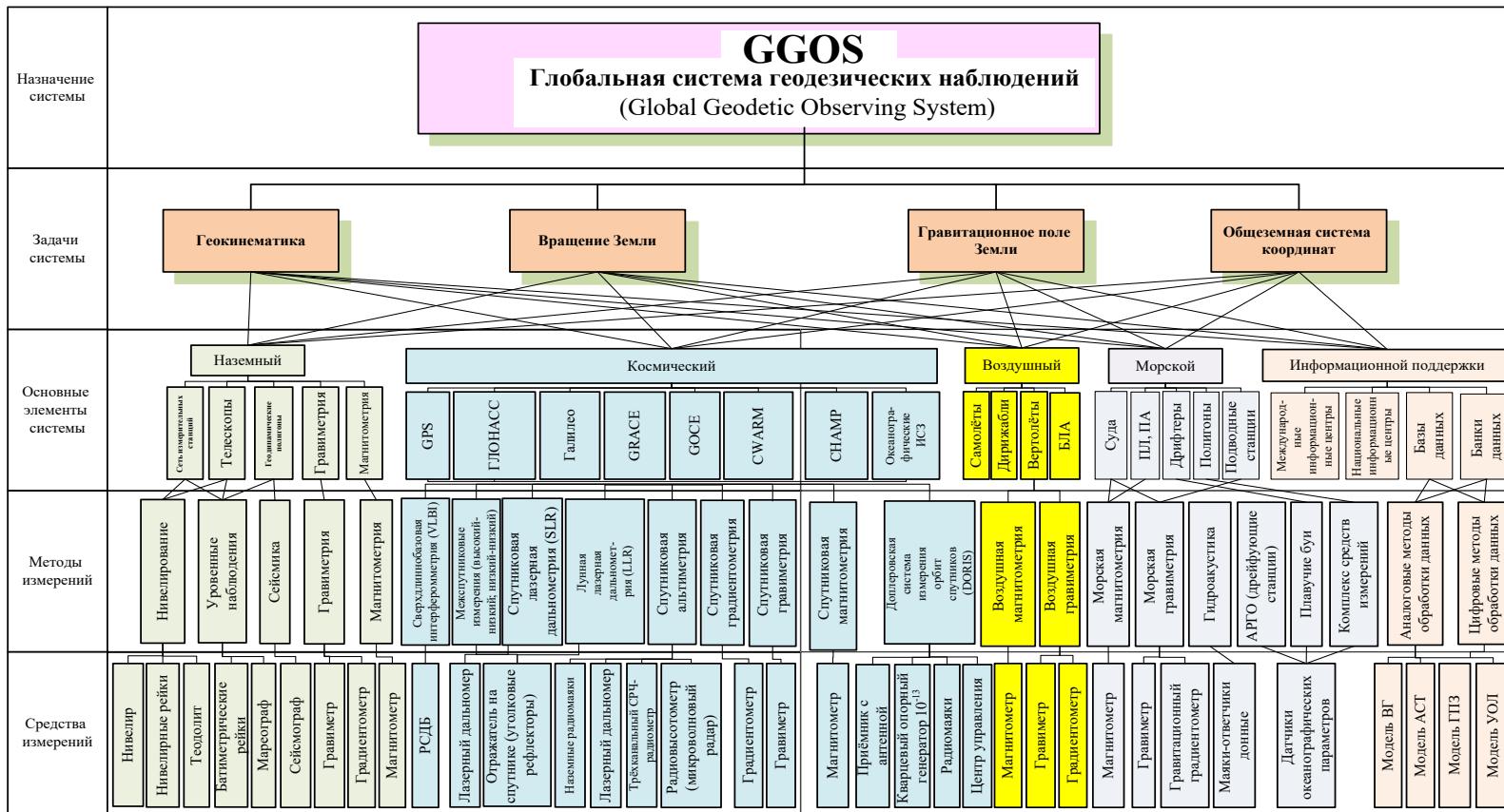
Summary. The structure of the international Global Geodetic Observing System is considered. A comparative analysis of the capabilities of the domestic Global System for Monitoring Geodetic Parameters of the Earth and the international Global Geodetic Observing System has been conducted. The bottlenecks of the domestic system have been identified, and recommendations for their elimination are provided.

Keywords: Comparative analysis, geodetic parameters of the Earth, Global Monitoring System, Global Geodetic Observing System.

For citation: Katenin V. A., Chubykin A. A. Comparative Analysis of the Effectiveness of the Domestic Global System for Monitoring Geodetic Parameters of the Earth with a Similar International Global Geodetic Observing System // Navigation and hydrography. – 2024. – No. 2 (75). – P. 109–123.

Достижение современных требований к точности геодезических параметров Земли нам представляется возможным путем создания специальной системы, которая бы адекватно учитывала множество факторов, в том числе и влияние атмосферы и океана. Для этого требуется иметь данные глобального охвата, высокого пространственного и временного разрешения. Мы считаем целесообразным воспользоваться зарубежным опытом разработки подобной системы на примере функционирующей международной Глобальной системы геодезических наблюдений – Global Geodetic Observing System (GGOS) [1].

Изобразим ее на рисунке в виде древовидной структуры.



Структура Глобальной системы геодезических наблюдений GGOS

Глобальная Система Геодезических Наблюдений (GGOS). Основное назначение этой интегрированной системы – обеспечение стабильности и мониторинга трех фундаментальных компонент современной геодезии:

- геометрической формы и деформаций Земли;
- параметров ее ориентации и вращения;
- гравитационного поля Земли и его временных изменений.

Первые два верхних уровня GGOS аналогичны отечественной ГСМГПЗ.

На третьем уровне нам представляется возможным выделить пять взаимосвязанных сегментов: наземный, космический, воздушный, морской и информационной поддержки. За рубежом наибольшее развитие получили наземный и космический сегменты. Каждому сегменту в основном свойственны свои методы и средства измерений геодезических параметров Земли (ГПЗ) и других геодинамических параметров Земли.

Наземный сегмент включает разветвленную сеть измерительных станций, телескопов, геодинамических полигонов, расположенных во всех частях земного шара. В зависимости от решаемых задач на элементах наземного сегмента применяются соответствующие методы и средства измерений.

Космический сегмент GGOS представлен действующими системами GPS, ГЛОНАСС и европейская система ГАЛЛИЛЕО. Кроме того, в космический сегмент входят:

- Французская спутниковая геодезическая система DORIS – Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (определение орбит и положений по доплеровским спутниковым измерениям), предназначенная для измерения скорости изменения расстояний до спутника по сигналам от плотной сети наземных радиомаяков. Полученные данные обрабатываются на земле, обеспечивая сантиметровую точность определения орбит. Эти же данные обрабатываются на борту, давая в реальном времени точность положений спутников в несколько дециметров;

- Система для обеспечения альтиметрических спутников типа TOPEX/Poseidon, Jason и спутников для дистанционного зондирования типа SPOT. Предполагалось обеспечить высоту опорных орбит для обработки данных радарной альтиметрии с точностью около 10 см и менее. В дополнение к возможности определения орбит данные используются для изучения динамики твёрдой Земли и улучшения моделирования ГПЗ и ионосферы.

Воздушный и морской сегменты GGOS в достаточной степени развиты. Воздушный сегмент представлен летательными аппаратами различных типов, в том числе и беспилотными, дирижаблями и воздушными шарами. Морской сегмент включает специализированные суда, подводные аппараты, стационарные и дрейфующие морские буи, морские геодезические полигоны и др.

Сегмент информационной поддержки GGOS. Включает большое число международных и национальных организаций, связанных с получением, обработкой, интерпретацией, хранением и предоставлением пользователям необходимой геодезической информации.

В первую очередь следует упомянуть IGS – Международный сервис ГНСС, который включает глобальную сеть более чем 400 постоянных непрерывного действия измерительных станций, совмещенных с геодезическими пунктами и

осуществляющих прием сигналов GPS/ГЛОНАСС/ГАЛЛИЛЕО для определения их места и сравнения с точным геодезическим положением пунктов.

Данные измерений архивируются в четырех глобальных информационных центрах и шести региональных информационных центрах. Десять аналитических центров регулярно обрабатывают данные и предоставляют результаты для анализа Координатору, который производит официальный объединенный продукт IGS – орбиту навигационного спутника и моменты времени. Шкала времени, ионосферная, тропосферная и задержки аналогично формируются специализированными координаторами для каждого пункта. IGS сервис включает свыше 200 институтов и организаций более чем в 100 странах.

Использование данных IGS в конечном итоге позволяет вычислить орбиты навигационных спутников с точностью 2 см, также они могут быть использованы для коррекции координатной системы отсчета IGS, орбит и спутниковых часов.

Высокому качеству данных IGS способствует функционирование в составе GGOS таких сервисов как Международная служба вращения Земли, Международный сервис лазерной дальномерии (ILRS), IVS – Международный сервис VLBI, Международный сервис DORIS (IDS), Международный сервис ГПЗ (IGFS), Информационной системы данных о динамике земной коры (CDDIS).

Международная служба вращения Земли определяет и регулярно публикует данные о параметрах ориентации Земли с точностью 1 см в положении полюса и около 0,3 миллисекунд по времени, что равноценно 1,4 см на экваторе. При этом относительные координаты наземных пунктов и длины базисов на расстояниях до нескольких сотен или тысяч километров определяются с ошибками 1–5 мм по горизонтали и менее 1 см по вертикали.

Изменения ГПЗ вызываются любым перераспределением масс – в, на или выше поверхности Земли или геофизическими процессами внутри Земли. Первый набор наблюдений за ежемесячными изменениями ГПЗ был получен американо-германским спутником GRACE, эксплуатация которого продолжалась с 2002 по 2013 гг. На основании полученных данных в Европейском космическом агентстве (ESA) были выполнены исследования с целью формирования модели переменной во времени составляющей ГПЗ и обоснование на ее основе требований к чувствительности аппаратуры для установки ее на спутниках перспективной системы мониторинга ГПЗ.

Международный сервис гравитационного поля – IGFS. IGFS – унифицирующий «зонтик» сервис Международного союза геодезии (International Association of Geodesy – IAG), который собирает, проверяет, архивирует и распространяет данные поля силы тяжести, унифицирует продукты силы тяжести для потребностей GGOS.

IGFS координирует сервис геодезического и геофизического сообщества данными, связанными с силой тяжести, программным обеспечением и информацией. Объединенные данные о юридических лицах IGFS включают и полученные от спутника глобальные модели, земные, авиационные, спутниковые и морские наблюдения силы тяжести, данные о земных приливах, данные GPS нивелирования, цифровые модели ландшафта и батиметрии, поля силы тяжести и геоида в Мировом океане от спутниковой альтиметрии.

База данных гравиметрических съемок и о приливах в земной коре содержит долгосрочные отчеты от наземных гравиметров, наклонометров, деформометров и других геодинамических датчиков, чтобы контролировать временные изменения поля силы тяжести Земли. Различные уровни данных доступны в зависимости от их

обработки – от сырых до обработанных. Также доступно различное периодическое программное обеспечение анализа и прогноза.

Банки и базы доступных гравиметрических данных (зарубежных и отечественных) приводятся ниже.

Автоматизированные банки цифровых гравиметрических данных, аккумулирующие однородную, систематизированную информацию как в виде каталогов отдельных пунктов площадных и маршрутных гравиметрических съемок, так и в виде осредненных значений аномалий силы тяжести, заданных на регулярную сетку, были созданы во многих странах, выполняющих гравиметрические измерения.

Ниже приведен список банков гравиметрических данных и их краткое описание.

1. Банк гравиметрических данных Международного гравиметрического бюро, Франция (BGI);

2. Банк национального геофизического центра данных США (NGDC);
3. Банк Национального картографического агентства США (NIMA);
4. Банк гравиметрических данных ЦНИИГАиК Роскартографии.

На четвертом уровне представлены основные методы измерений, используемые в GGOS. Они являются комбинацией методов космической и наземной геодезии.

Методы космической геодезии, которые разработаны к настоящему времени, базируются главным образом на следующих технологиях:

- измерение расстояний от наземной станции до отдельного спутника, как в случае микроволновых систем (кодовые измерения в GPS, ГЛОНАСС, система PRARE), SLR и LLR;
- системы одновременного измерения расстояний от спутника до нескольких станций (PRARE);
- измерение разностей расстояний производится методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), а также в системе DORIS и в относительном (или дифференциальном) методе GPS (по фазовым измерениям).

Научные продукты SLR и данные LLR используются для определения точных геоцентрических координат и движения наземных станций, спутниковых орбит, компонентов поля силы тяжести Земли и их временных изменений, параметров ориентации Земли (ЕОП), точных лунных эфемерид. Лазерные дальномерные системы измеряют одностороннее расстояние до удаленных оптических приемников в космосе и могут выполнить очень точную передачу времени между удаленными друг от друга объектами. Действия по лазерной дальномерии организованы Международным сервисом (ILRS), который обеспечивает сбор глобальных спутниковой и лунной лазерной дальномерии, чтобы поддержать исследования в геодезии, геофизике и фундаментальных констант. Последние включают фундаментальные данные для Международной общеземной системы координат (ITRF), установленной и поддерживаемой Международным сервисом вращения Земли и общеземной системы координат (IERS).

Рассмотрим основные методы космической геодезии более подробно.

Метод радиоинтерферометрических измерений, в том числе и внегалактических источников, для уточнения параметров вращения Земли.

Радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой (РСДБ) – объединенная техника радиоастрономии, атомных стандартов частоты, космической радиосвязи, ионосферных наблюдений, записи данных с высокой плотностью и высокоскоростной обработкой данных. РСДБ наблюдает удаленные внегалактические радиоисточники –

квазары и радиогалактики, используя радиотелескопы с независимыми стандартами времени и частоты – высокостабильными водородными мазерами. Шумовые сигналы от радиоисточника записываются на магнитные ленты. Специальные устройства – корреляторы – обрабатывают эти записи для того, чтобы извлечь информацию о разности времени между приходом волн на антенны РСДБ комплекса. Полученная информация, записанная уже в цифровом виде, используется для измерения направления на удаленный ориентир с высокой точностью для определения ориентации ГГСК в инерциальном пространстве.

РСДБ является геометрическим методом: здесь измеряется разность моментов прибытия радиоволны от удаленного квазара на две расположенные на Земле антенны. Используя большое число измерений временных разностей от многих квазаров, наблюдаемых глобальной сетью наземных радиотелескопов, в методе РСДБ определяют инерциальную систему отсчета, задаваемую квазарами, и одновременно находят точные положения антенн. Поскольку измерения времени производятся с точностью до нескольких пикосекунд, то взаимные положения антенн определяют с точностью до нескольких миллиметров, а положения квазаров – до долей миллисекунды дуги. Поэтому, как правило, в работе сети РСДБ участвуют 4–6 радиотелескопов, а иногда и больше. Точные координаты РСДБ антенн задают Международную земную систему координат (ITRF). Точные координаты квазаров задают Международную небесную систему отсчета (ICRF). Эти две системы отсчета связаны между собой с помощью пяти параметров вращения Земли (ЕОР) – поправки к двум углам нутации, поправки к координатам полюса и разность UT-1UTC. РСДБ позволяет оценивать все указанные величины, являясь, таким образом, универсальным средством как для построения обеих систем координат, так и для установления связи между ними.

При длине базы 12,2 тыс. км разрешение на волне 3 мм достигло $0,8 \cdot 10^{-3}$ угловой секунды, что на три порядка выше, чем у оптических телескопов.

Методы спутниковой и лунной лазерной дальномерии

Лазерная локация спутников – это измерение точных расстояний между лазерным дальномером и отражателями на поверхности спутника. Локация производится подачей очень коротких вспышек лазерного излучения (10–150 пс). В измеренное расстояние вводятся поправки на влияние атмосферы, на калибровку и на несовпадение отражателей с центром масс спутника. Скорость света не является постоянной при прохождении луча через атмосферу, и это вносит наибольшую ошибку в измерения. Тем не менее эта погрешность для волн оптического диапазона значительно меньше, чем для волн радиодиапазона. Лучшие современные стационарные лазерные дальномерные системы обеспечивают среднюю квадратическую погрешность одного измерения около 10 мм, а для сеанса измерений – 2–3 мм. Эти характеристики относятся к спутникам, удаленным примерно на 6000 км (Lageos, Эталон). Этот уровень точности невозможно выдерживать для более далеких спутников из-за слабого сигнала. Наиболее существенным недостатком метода лазерной локации спутников является его зависимость от погоды.

Для лазерной локации Луны используются *угловые рефлекторы*, расположенные на советских космических аппаратах Луноход-1 и Луноход-2, а также доставленные во время лунных экспедиций американских кораблей Apollo-11, -14 и -15.

Из-за слабого отраженного сигнала требуемый уровень точности невозможно выдерживать для более далеких (около 20000 км) навигационных спутников.

А основной недостаток метода лазерной локации спутников – его зависимость от облачности в значительной степени снижает эффективность применения этого метода для геодезического обеспечения ГЛОНАСС.

В последнее время все большую популярность приобретают методы спутниковой гравиметрии, которая позволяет с высокой производительностью получать знания о фигуре Земли, ее строении и топографической поверхности. Спутниковые методы начали применяться, когда для изучения ГПЗ активно использовались гравиметрические и астрономо-геодезические методы.

К спутниковым методам изучения ГПЗ можно отнести:

- спутниковую альтиметрию;
- слежение «спутник-спутник»;
- спутниковую градиентометрию.

Метод спутниковой альтиметрии является одним из эффективных и перспективных методов изучения фигуры и гравитационного поля Земли, он широко используется для определения детальных моделей ГПЗ и его характеристик в Мировом океане в виде цифровых моделей высот геоида, уклонений отвесных линий, аномалий силы тяжести. Спутниковая альтиметрия относится к одному из активных методов дистанционного зондирования морской поверхности с борта космического аппарата. По времени возврата зондирующего радиоимпульса рассчитывается расстояние от спутника до подстилающей поверхности, что позволяет определить высоту морской поверхности и, исключив из результатов измерений влияние океанографических и метеорологических факторов, определить высоту геоида. Положение спутника на орбите определяется *сетью наземных станций наблюдений с помощью лазерных дальномеров* с погрешностью от 5 до 25 см в зависимости от конкретного места спутника на орбите. Высота спутника над поверхностью Мирового океана измеряется его *микроволновым радаром*, инструментальная погрешность которого оценивается разработчиками величиной порядка 5 см. Радар определяет среднее значение высоты над океаном по всей площади пятна облучения, диаметр которого составляет от 26,6 до 44,3 км (до 60 км). Дальнейшая математическая обработка альтиметрических высот геоида по формулам геодезической гравиметрии позволяет получать аномалии силы тяжести и составляющие уклонений отвесных линий в Мировом океане.

В результате обработки данных спутниковой альтиметрии Geosat, Topex/Poseidon, ERS-1,2 зарубежными специалистами разработан ряд моделей высот геоида и аномалий силы тяжести в Мировом океане повышенной точности и пространственного разрешения.

При изучении поля силы тяжести с помощью спутников выделяют следующие концепции:

- слежение «спутник-спутник» в режиме «высокий-низкий» (High-Low Mode, SS-HL), реализованная в проекте CHAMP;
- слежение «спутник-спутник» в режиме «низкий-низкий» (Low-Low Mode, SST-LL), реализованная в проекте GRACE;
- спутниковая гравитационная градиентометрия (satellite gravity gradiometry-SGG), реализованная в проекте GOCE.

К *наземным методам геодезических измерений* относят нивелирование, гравиметрию, уровневые измерения, сейсмические наблюдения и магнитометрические измерения.

Следует отметить, что сегмент информационной поддержки включает помимо средств накопления, обработки, интерпретации различной геодинамической информации, и средства ее хранения в виде баз и банков данных. Такая информация служит для разработки математических моделей различных полей Земли и по нашей древовидной структуре является выходным результатом пятого уровня.

Сравнительный анализ зарубежной и отечественной систем ГСМГПЗ проведем по пяти уровням древовидной структуры и сделаем обобщенные выводы.

Наибольший объем информации по зарубежным морским съемкам ГПЗ в Мировом океане представлен в цифровой базе морских геофизических данных БД «GEODAS», созданной в Национальном Центре Геофизических Данных США (National Geophysical Data Center (NGDC), USA).

БД «GEODAS», включающая цифровую гравиметрическую, батиметрическую и магнитометрическую информацию, записанную на компакт-дисках в формате MGD77, содержит материалы около 5000 экспедиций более чем 20 ведущих стран мира (США, Франции, Великобритании, Канады, Германии, Японии, России (СССР) и др.). *Россия представлена в этой базе в основном материалами, полученными в ходе выполнения исследований судами Академии наук.*

Общий объем данных о гравиметрических съемках, выполненных различными странами и организациями, составляет около 14 432 тыс. значений ГПЗ, а длина съемочных галсов – около 5 523 тыс. миль в различных районах Мирового океана. Объемы гравиметрической информации в линейных километрах составляет 5,5 млн миль. Данные в базу данных (БД) переданы 24 организациями из 11 стран мира, около 70 % данных составляют материалы 10 научных организаций США.

ГПЗ наиболее слабо изучено в районе Северного Ледовитого океана (СЛО) и его морей, омывающих северные районы РФ.

На пятом уровне представлены средства измерений, используемые в зависимости от применяемых методов измерений. Элементы этого уровня очевидны и частично описаны выше. Остановимся только на рассмотрении конечного продукта сегмента информационной поддержки – математических моделях ВГ, АСТ, УОЛ и ГПЗ, получаемых по результатам хранимой информации о геодинамических параметрах в банках и базах данных третьего уровня.

В настоящее время для геодезических приложений особое значение имеют точностные характеристики моделей ГПЗ для высот геоида (ВГ) при измерении силы тяжести на море, уклонении отвесной линии. Повышение точности определения ВГ на суше обеспечивают региональные и национальные цифровые модели ВГ, создаваемые путем уточнения глобальных моделей ГПЗ в континентальных районах с использованием детальной гравиметрической информации. Указанные методы имеют следующие характеристики: разрешающая способность (детальность) – от 5 до 1–2'; точность (СКП) – от нескольких дециметров (Африка, Азия, Южная Америка, Россия) до нескольких сантиметров (Европа, США, Канада). Проблемными с точки зрения точностных характеристик моделей ГПЗ остаются районы Арктики, особенно район полярной шапки.

За рубежом наибольшее распространение получила модель ГПЗ EGM-2008, которую принимают за эталонную из-за повышенной точности. Это обусловлено успехами зарубежных центров в определении низкостепенных ($N \leq 360$) и высокостепенных ($N \geq 1420$) сферических гармоник геопотенциала соответственно

без использования и с использованием новых методов космической геодезии, реализованных в системах CHAMP, GRACE и GOCE.

На основании изложенного представляется возможным провести сравнительный анализ двух систем.

Отечественная система ГСМГПЗ, аналогичная GGOS, отсутствует, существуют только отдельные ее элементы, слабо связанные между собой. Отсутствует также единый центр сбора, обобщения, обработки, накопления, интерпретации и хранения геодезических данных.

Создание перспективной ГСМГПЗ позволит обеспечить:

- ликвидацию отставания от мировой науки и практики в области фундаментального геодезического обеспечения глобальных навигационных систем на основе развития новых методов высокоточного мониторинга с использованием лазерных межспутниковых измерений, лазерной и радиотехнической альтиметрии и гидроакустической глубинометрии, а также глобальной геодезической сети, включающей наземные и морские опорные пункты (геодезические полигоны);
- фундаментальные научные исследования в части геодинамики, океанографии, фундаментальной астрономии на качественно новом уровне (достижения субсантиметровой точности КВНО);
- КВНО космических потребителей различного типа, в том числе КА дистанционного зондирования Земли и КА решения фундаментальных научных задач.

Сравнительный анализ первых двух уровней рассматриваемых систем показал следующее.

– Концептуально перед отечественной системой ГСМГПЗ не ставится задача достижения превосходства над аналогичной зарубежной системой GGOS. Таким образом, априори закладывается достижение только ликвидации отставания в средствах и методах измерения ГПЗ и других геодинамических параметров.

– Из сопоставления требований системы ГЛОНАСС к геодезическому обеспечению и возможностей существующей и перспективной отечественной ГСМГПЗ следует, что по некоторым параметрам самостоятельно достичь требуемого уровня точности будет практически невозможно из-за ограничений в территориальном размещении измерительных станций.

– ТERRITORIALНЫЙ аспект сравниваемых систем напрямую связан с экономическими возможностями зарубежных стран, вносящих абсолютный вклад в развитие GGOS, и экономикой РФ как единственной страны, способной создать собственную ГСМГПЗ в условиях существенных политических, экономических и других ресурсных ограничений, накладываемых в результате санкционной политики западных стран.

Следует заметить, что РФ занимает почти 1/6 часть суши и значительные пространства СЛО. По этой причине зарубежные страны нуждаются в получении геодезической информации от РФ, как и РФ от мирового сообщества.

На третьем уровне произведем сравнительный анализ рассматриваемых систем по их сегментам.

Наземный сегмент отечественной ГСМГПЗ по площади и установленных на ней числа измерительных станций (геодинамических полигонов) в значительной степени уступает наземному сегменту GGOS. При этом средства и методы получения необходимой геодезической информации аналогичны или весьма близки.

Наземный сегмент включает слаборазветвленную сеть измерительных станций, телескопов, геодинамических полигонов, расположенных в отдельных районах РФ. Таким образом, наземный сегмент ГСМГПЗ не имеет глобального охвата и не в полной мере покрывает территорию РФ сетью измерительных станций. Белыми пятнами на территории РФ являются СЛО, северные территории побережья страны, острова и районы Сибири и Дальнего Востока.

В отечественном наземном сегменте, как правило, применяются традиционные геодезические методы, которые основаны на последовательном развитии геодезических сетей путем угловых и линейных измерений, требующих для обеспечения прямой видимости между смежными пунктами постройки геодезических знаков. Сооружение таких знаков потребовало 80 % средств, затраченных на создание существующих опорных сетей.

Космический сегмент отечественной ГСМГПЗ, на наш взгляд, является наиболее перспективным по вышеизложенным причинам.

В связи с этим необходимо более подробно рассмотреть в космическом сегменте спутниковую альтиметрию, которая в настоящее время является основным методом получения геодезической информации не только над поверхностью Земли, но и в Мировом океане.

Современное и техническое состояние развития спутниковой альтиметрии позволяет успешно использовать альтиметрические данные при решении различных геодезических задач, в том числе – уточнение геоцентрической системы координат, вывод глобальных моделей геопотенциала, определение детальных характеристик ГПЗ в Мировом океане в виде цифровых моделей высот геоида, уклонений отвесных линий, аномалий силы тяжести и др. Данные спутниковой альтиметрии могут быть использованы для учета систематической составляющей погрешности определения ГПЗ по материалам наземных, морских съемок, а также в качестве опорных при морских измерениях гравиметрами в подавляющем большинстве районов Мирового океана.

Применение метода спутниковой альтиметрии позволило существенно улучшить гравиметрическую изученность всех акваторий морей и океанов вычислением аномалий силы тяжести для одноградусных площадок по альтиметрическим высотам геоида и построить планетарные модели квазигеоида по гравиметрическим и спутниковым альтиметрическим данным с точностью порядка 1,5–2 м.

Фактически современные данные спутниковой альтиметрии вполне могут рассматриваться в качестве альтернативного источника информации для картографирования аномалий силы тяжести в масштабе 1:1000000 с сечением 10 мГал.

Основными техническими средствами спутниковой альтиметрии являются радиолокационные и лазерные дальномеры. Методы их использования постоянно совершенствуются. В качестве перспективного нами был рассмотрен отечественный метод спутниковой альтиметрии, изложенный ранее.

Необходимо отметить, что состояние атмосферы и океана оказывает влияние не только на ГПЗ, но и на точность геодезических измерений. Для этой цели за рубежом активно используются океанографические ИСЗ.

Слабым местом в космическом сегменте отечественной ГСМГПЗ является отсутствие океанографических ИСЗ с наземной инфраструктурой и глобальной (локальной) сетью дрифтеров для измерения океанографических параметров

Мирового океана в целом и отдельных морских районов в частности. Проекты спутниковой океанографической системы МО были разработаны в СССР еще в 1970-х годах, однако отсутствие финансирования не позволило реализовать его до настоящего времени.

В отечественной космонавтике отсутствуют возможности по изучению ГПЗ с помощью новых методов «спутник – спутник» в режимах «высокий – низкий» и «низкий – низкий», как это делается в системе GGOS. Также не реализован очень перспективный метод спутниковой градиентометрии из-за отсутствия градиентометра для КА соответствующей точности и массогабаритных характеристик.

Воздушный сегмент представляет собой совокупность воздушных судов, комплекс наземной инфраструктуры, методов и технических средств измерения ГПЗ.

Наиболее слабым местом в этом сегменте являются воздушные суда, имеющие срок эксплуатации, превышающий критический возраст, и не заменяющиеся современными образцами авиационной техники для производства лабораторных и натуральных (полевых) измерений.

В работе [2] показаны существующие проблемы отечественного авиаапрома. В частности, среди серьезных проблем российской авиации, негативно влияющих на экономику авиаперевозок, стоит выделить неоптимальность структуры парка воздушных судов и низкие темпы его обновления. Главными причинами такой ситуации являются неэффективный состав и состояние парка воздушных судов. Флот подавляющего большинства российских авиакомпаний был сформирован в 1970–1980-е годы, и с тех пор почти не обновлялся.

Среди основных негативных причин, влияющих на развитие авиаотранспортной отрасли России, можно выделить: высокий удельный вес авиаперевозок, выполняемых на устаревших воздушных судах (ВС) низкой эксплуатационной эффективности; критическая динамика возрастной структуры парка ВС как российского, так и иностранного производства; экономические затруднения при обновлении парка ВС.

Другие элементы отечественного воздушного сегмента (вертолеты, дирижабли, БПЛА) не получили своего развития. Имеются сведения о единичных применениях дирижаблей за рубежом для съемки ГПЗ в локальных районах.

Авиационные отечественные магнитометры, гравиметры и градиентометры по своим техническим характеристикам не в полной мере удовлетворяют требованиям производства измерений, соответствующим перспективной ГСМГПЗ. По этой причине целесообразность их совершенствования не вызывает сомнений.

Морской сегмент, как и воздушный, представляет собой совокупность морских судов (надводные суда, подводные лодки и ПА), комплекс наземной инфраструктуры, методов и технических средств измерения ГПЗ. В него могут входить морские геодезические полигоны со специальным оборудованием, а также якорные и дрейфующие буи для сбора океанографической информации. В настоящее время такие океанографические буи в отечественных исследованиях не получили своего развития. Принципиально отметить, что в РФ отсутствует и в обозримом будущем не предвидится появление спутниковой глобальной океанографической системы.

Основу морского сегмента составляют исследовательские (гидрографические) суда Министерства обороны и РАН, оснащенные магнитометрами и гравиметрами. К настоящему времени морские градиентометры в отечественном морском сегменте отсутствуют и в ближайшее десятилетие не появятся.

Среди негативных черт отечественного морского сегмента следует отметить:

- отсутствие глубоководных исследовательских океанографических подводных лодок с соответствующим геодезическим и океанографическим оборудованием, что существенно снижает эффективность научных исследований в Арктике, особенно подо льдом;
- резкое снижение численности гидрографических судов, их предельный возраст и устаревшее исследовательское и навигационное оборудование;
- исчезновение в составе отечественного исследовательского и гидрографического флотов судов дальней морской зоны большого водоизмещения;
- способность отечественной судостроительной промышленности возмещать естественную убыль океанографических исследовательских судов постройкой только гидрографических катеров и гидрографических судов малого водоизмещения.

Все это отрицательным образом сказывается на возможности проведения морских научных экспедиций особенно в удаленных районах Мирового океана на длительной основе.

Другой проблемой отечественного морского сегмента является отсутствие морских гравитационных градиентометров. В работе [1] показано превосходство градиентометрических методов исследования ГПЗ над гравитационными.

В частности, морская гравиметрия на подвижных носителях (спутниках, самолетах, гидрографических судах, подводных аппаратах) позволяет быстро и с высоким разрешением изучать ГПЗ. При этом после обработки получают полный вектор силы тяжести: аномалию силы тяжести и уклонение отвесной линии. Поскольку на измерения гравитационным градиентометром с пространственно стабилизированной измерительной системой не влияют возмущения и инерциальные ускорения, целесообразно их сочетать с аэрогравиметрией и инерциальной гравиметрией.

Таким образом, градиентометрические данные имеют *преимущества* над гравиметрическими данными, полученными традиционным путём, – у них более высокая пространственная разрешающая способность и увеличенное отношение «сигнал – помеха». При этом разрешающая способность всегда значительно лучше на небольших глубинах и не уступает на всех глубинах.

Это достигнуто за счёт усовершенствования стабилизации измерительного прибора, что позволяет лучше компенсировать горизонтальное ускорение судна. Многокомпонентные градиентные измерения обеспечивают возможность уменьшения влияния помех.

Точность гравиметрических измерений уменьшается с ухудшением состояния моря. Ускорения судна не могут быть полностью отделены от гравитационных измерений в отличие от градиентных измерений. Гравитационные измерения допускают, что в течение значительного длительного периода времени усреднённые вертикальные ускорения съёмочного судна будут пренебрежимо малыми.

При ухудшении состояния моря необходимо делать выбор между возрастающим временем усреднения и уменьшающейся разрешающей способностью или возрастающими помехами в данных. Это обстоятельство уменьшает возможность измерять гравиметром более высокие пространственные частоты. Вследствие влияния ускорения судна гравиметрические съёмки должны выполняться на небольшой скорости.

Градиентометрические измерения могут быть выполнены на большем междугалсовом расстоянии для эквивалентной разрешающей способности при

обычной гравиметрической съёмке. Так как данные градиентометрической съёмки менее подвержены влиянию волнения моря, на выполнение съёмки может понадобиться меньшее время.

Тем не менее роль морской гравиметрической съемки останется актуальной как для привязки спутникового метода к морским набортным наблюдениям, так и в высокоаномальных районах Мирового океана, прибрежной зоне, зоне материкового шельфа, т. е. в районах, представляющих наибольший интерес в решении экономических и военных задач ВМФ и торгового флота.

Сегмент информационной поддержки страдает ведомственной разобщенностью и слабым взаимодействием организаций, ответственных за сбор, хранение, обобщение, анализ и интерпретацию данных о ГПЗ и океанографических параметрах Мирового океана. Политическая структура власти, научный задел и технические возможности позволяют создать в стране Объединенный центр данных о параметрах Земли, Мирового океана и атмосферы.

В результате мы имеем отечественный конечный продукт в виде цифровых моделей параметров Земли и Мирового океана, существенно уступающий зарубежным аналогам.

В частности, из-за более высокого технического уровня развития зарубежных систем и их комплексного использования результаты определения характеристик ГПЗ в Мировом океане (в виде цифровых моделей ВКГ, УОЛ и АСТ) по зарубежной альtimетрической информации в целом имеют более высокую точность и детальность, чем аналогичные результаты, полученные по альтиметрической информации отечественного КГК ГЕО-ИК. Например, в таблице приведены результаты сравнения точностных характеристик отечественной и зарубежной спутниковых геодезических систем.

Сравнение точностных характеристик ГЕО-ИК и GEOSAT

Характеристики ГПЗ	Спутники	
	ГЕО-ИК	GEOSAT
Высоты геоида	1,0 м	0,3–0,5 м
Уклонения отвесной линии	1,5–3"	1–2"
Аномалии силы тяжести	8–15 мГал	6–10 мГал

Зарубежные альтиметрические модели, представленные в таблице, имеют детальность 5', отечественные – 15'.

Таким образом, необходимость создания перспективной ГСМГПЗ в интересах геодезического обеспечения ГЛОНАСС нами доказана. Выявленные проблемы и «узкие места» в ее качественном и количественном составе позволяют определить пути устранения недостатков и разработать предложения по качественно новой структуре такой системы.

Выводы

1. Повышение точности ГЛОНАСС, на которой держится вся эффективность Вооруженных сил и экономика страны, напрямую зависит от качества ее геодезического обеспечения. Данная проблема может быть успешно решена на основе создания и дальнейшего совершенствования отечественной Глобальной системы

мониторинга геодезических параметров Земли (ГСМГПЗ), что по оценкам ученых потребует повышения уровня геодезического обеспечения как минимум на порядок.

2. Сравнительный анализ проекта ГСМГПЗ и существующей международной GGOS выявил две принципиальные группы проблемы у отечественной системы: структурно-организационную и техническую.

К структурно-организационным проблемам следует отнести следующие.

– Отсутствие в физическом виде ГСМГПЗ как таковой. Она существует только на бумаге и в умах ее разработчиков. Международная GGOS успешно функционирует уже длительное время.

– Невозможность расширения сети наземных пунктов измерения ГСМГПЗ из-за территориальных ограничений.

– Необходимость получения данных о ГПЗ в труднодоступных районах Мирового океана, к которым следует отнести в первую очередь Арктический бассейн (острова Северная Земля, Новосибирские острова и Земля Франца Иосифа), а также размещение донных станций в Баренцевом, Карском морях, море Лаптевых и Восточносибирском море. В этих районах для нужд исследований морского дна и других измерений ГПЗ целесообразно развернуть сеть океанологических станций, а в отдельных районах – геодезические полигоны. При необходимости такую сеть дополнить дрейфующими buoyами, в том числе и на льду.

3. Решение структурно-организационных проблем представляется возможным в расширении международной кооперации с известными международными сервисами путем предоставления отечественной территории для взаимообразной организации измерительных станций на зарубежной территории, участие в современных международных космических проектах и обмене гравиметрической информацией с зарубежными центрами.

Этот путь в современных условиях жестких антироссийских санкций маловероятен. Остается один путь – расширение космических геодезических исследований в ближнем, среднем и дальнем космосе.

4. К спутниковым методам изучения ГПЗ в первую очередь следует отнести спутниковую альтиметрию, слежение «спутник – спутник» и спутниковую гравитационную градиентометрию.

Спутниковая гравиметрия позволяет с высокой производительностью получать знания о фигуре Земли, ее строении и топографической поверхности.

Спутниковая гравитационная градиентометрия основана на измерении разностей ускорений в трех пространственных взаимно ортогональных направлениях шестью акселерометрами (по два на каждой из трех осей), установленными на одном и том же спутнике. Измеренный сигнал пропорционален вторым производным гравитационного потенциала.

Основная цель проекта спутниковой градиентометрии – определение ГПЗ с очень высокой точностью. GRACE позволяет:

- определять аномалию силы тяжести с точностью 1 мГал;
- определять высоту геоида с точностью 1–2 см;
- достигать пространственное разрешение лучше, чем 100 км.

5. В структуре отечественной ГСМГПЗ по сравнению с зарубежным аналогом GGOS отсутствует ряд элементов, важнейшими из которых являются:

- океанографические ИСЗ и подводные лодки с необитаемыми подводными аппаратами;

– сети плавучих (дрейфующих) и стационарных буев, обеспечивающих получение необходимых параметров круглогодично и круглосуточно как глобально, так и в локальных районах Мирового океана;

– морские градиентометры для космических и морских платформ.

Деградация авиационных носителей гравиметрической и другой аппаратуры, а также отсутствие океанографических исследовательских подводных лодок в структуре отечественной системы не позволяет проводить необходимые изыскания, в том числе и съемку ГПЗ в труднодоступных районах Мирового океана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Катенин В.А., Чубыкин А.А. и др. Комплексные исследования и научно-техническое обоснование применения перспективных лазерных технологий в системе ГЛОНАСС. АО «ГНИНГИ», отчет о НИР, шифр темы «Вызов-ЛМГ», 2017.- 269 с.
2. Ещенко Т. В. Анализ тенденций и проблем развития парка воздушных судов Российской Федерации // Научн. вестник МГТУ ГА. Серия Менеджмент, экономика, финансы. – 2009. № 143. – С. 128–134.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

КАТЕНИН Владимир Александрович, ученый секретарь АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», доктор военных наук, профессор, капитан первого ранга в отставке, vkatenin@rambler.ru.

Vladimir A. KATENIN, Academic secretary of State Research Navigation-Hydrographic Institute, Doctor of Science, Professor, vkatenin@rambler.ru.

ЧУБЫКИН Алексей Алексеевич, старший научный сотрудник, АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», доктор технических наук, achubykin@list.ru.

Aleksey A. CHUBYKIN, senior researcher, State Research Navigation Hydrographic Institute, Doctor of Science, achubykin@list.ru.

НЕЙРОСЕТЕВОЙ АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ НА ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Алексеев Н. А., Юсупов С. Э., Короткий М. А., Павелкин И. А.

ООО «Экран», Московская область.

Аннотация. В связи с повышением требований к системам подводного мониторинга возникает необходимость разработки современных интеллектуальных алгоритмов обработки гидролокационных изображений. Сформированы обучающие наборы данных для задач поиска аномалий и сегментации гидролокационных изображений. Поставлена задача обнаружения аномалий на гидролокационных данных. Предложен алгоритм обнаружения аномалий в области дна. Подготовлена тестовая выборка, на которой получены значения метрик: вероятность правильного обнаружения и пиксельная вероятность ложного обнаружения со значениями 0,8 и 0,09 соответственно, при пороге уверенности алгоритма 0,55.

Ключевые слова: гидролокаторы, гидролокационные изображения, поиск аномалий, автоэнкодер, сегментация изображения, глубокое обучение, нейронная сеть.

Для цитирования: Алексеев Н. А., Юсупов С. Э., Короткий М. А., Павелкин И. А. Нейросетевой алгоритм обнаружения аномалий на гидролокационных изображениях // Навигация и гидрография. – 2024. – № 2 (75). – С. 124–138.

NEURAL NETWORK ALGORITHM FOR ANOMALY DETECTION IN SONAR IMAGES

Alekseev N. A., Yusupov S. E., Korotkiy M. A., Pavelkin I. A.

Ekran, LLC, Moscow region

Summary. Due to increasing demands on underwater monitoring systems, there is a need to develop modern intelligent algorithms for processing sonar images. Training datasets have been created for the tasks of anomaly detection and segmentation of sonar images. The task of detecting anomalies in sonar data has been set. An algorithm for detecting anomalies in the seabed area is proposed. A test sample has been prepared, on which the metrics values for the probability of correct detection and pixel-wise false detection probability were obtained, with values of 0.8 and 0.09 respectively, at a confidence threshold of the algorithm of 0.55.

Keywords: sonar, sonar image, anomaly detection, autoencoder, image segmentation, deep learning, neural network.

For citation: Alekseev N. A., Yusupov S. E., Korotkiy M. A., Pavelkin I. A. Neural Network Algorithm for Anomaly Detection in Sonar Images // Navigation and hydrography. – 2024. – No. 2 (75). – P. 124–138.

Введение

В настоящее время задача по изучению дна акваторий является перспективной с точки зрения спасательных операций [1], исследовательских работ по изучению морского дна [2], рыболовства [3, 4], поиска подводных объектов – потенциальных источников загрязнений водных бассейнов и создания угрозы жизни населению [5]. Распространённым способом получения информации о поверхности дна рек, озер и других водоемов является использование гидролокатора бокового обзора (ГБО).

Зачастую таким оборудованием управляет оператор, которому необходимо предварительно настроить ГБО, отслеживать выводимые данные и оценивать получаемые изображения. Ввиду сложности структуры получаемых данных, человеку без специальной подготовки затруднительно их интерпретировать [6], поэтому с этим задача автоматизации процесса обработки гидролокационных изображений (ГЛИ) для помощи оператору в обнаружении различных объектов на дне и в толще воды является актуальной.

Перспективные подходы анализа изображений основаны на сверточных нейронных сетях [7, 8]. Решения на базе сверточных нейронных сетей обеспечивают высокие точности в задачах детектирования [9], классификации [8] и сегментации [10] ГЛИ. У данного подхода есть ограничения по сравнению с детерминированными подходами – для обучения нейросетевого алгоритма требуется большой набор данных [11], кроме того, параметры нейросетевого алгоритма, как правило, настраиваются для поиска определенных классов объектов, что ограничивает возможность обнаружения объектов, которые не представлены в обучающем наборе данных.

Данная работа посвящена созданию алгоритма обнаружения объектов на ГЛИ, для которого снижаются требования по подготовке больших обучающих наборов данных и по представлению всех классов объектов в обучающем наборе данных.

Основным шагом алгоритма обнаружения объектов в данной работе является нейросетевой автоэнкодер, который является одной из наиболее распространенных нейросетевых моделей для поиска аномалий на изображениях видимого диапазона [12]. В настоящей работе аномалией считаются неоднородности на поверхности дна, которые могут быть интерпретированы как природные или искусственные объекты.

Обучающий набор данных для такого алгоритма включает все области изображений, не содержащие аномалий (подстилающая поверхность), за счет чего снимается требование по подготовке обучающего набора данных со всеми классами объектов. Более 90 % ГЛИ не содержат аномалий, что существенно снижает требования по подбору и разметке данных с объектами.

Постановка задачи обнаружения аномалий на гидролокационных изображениях

Постановку задачи обнаружения аномалий на ГЛИ можно обозначить следующим образом: пусть N – множество описаний объектов, а B – конечное множество описаний местоположения аномалии в виде ограничивающего прямоугольника (bounding boxes). Ограничивающий прямоугольник задается в координатах изображения четырьмя числами: Координатами верхнего левого угла и координатами нижнего правого угла.

Предполагается, что существует неизвестная целевая зависимость – отображение $f: N \rightarrow B$, значения которой известны только на объектах конечной обучающей выборки $\underline{N} \rightarrow \{b_1, \dots, b_k\} \subset N$. Задача состоит в том, чтобы построить алгоритм $f^* \sim f: N \rightarrow B$, способный распознавать произвольный объект $\forall n \in N$, имея только ограниченный набор известных зависимостей для обучающего набора данных.

В качестве входных данных алгоритм получает двумерный массив – ГЛИ (рис. 1 a). Для конечного множества объектов из входных данных известно их расположение. Это множество является обучающим набором данных \underline{N} . Расположение B остальных объектов неизвестно. На выходе алгоритм выдает массив заранее неизвестной длины с координатами объектов B (рис. 1 b).

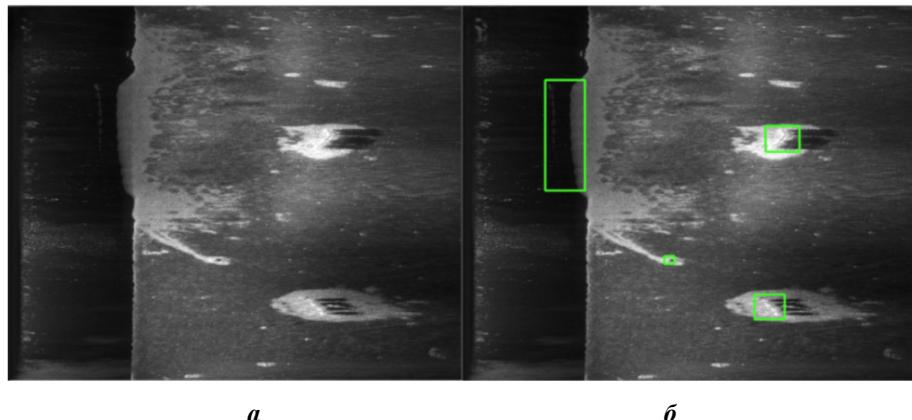


Рис. 1. Ожидаемая работа алгоритма: *а* – входные данные, *б* – ожидаемые выходные данные

Формирование обучающих наборов данных

Для разработки алгоритма обнаружения аномалий на ГЛИ сформирован обучающий набор данных. За основу взят закрытый набор данных, полученный с помощью различных ГБО производства ООО «Экран», который содержит ГЛИ с различными типами подстилающих поверхностей.

Обучающий набор данных для алгоритма поиска аномалий

В работе использован набор данных, содержащий 1605 ГЛИ. Набор разделен на две выборки: обучающую (не содержащую аномалий) и тестовую (содержащую аномалии). ГЛИ разделены на квадратные области размером 256 на 256 пикселей с перекрытием в 128 пикселей. Таким образом получен обучающий набор данных, содержащий 14893 области без аномалий (рис. 2*а*) для обучения и 1094 области с аномалиями (рис. 2*б*) для тестирования.

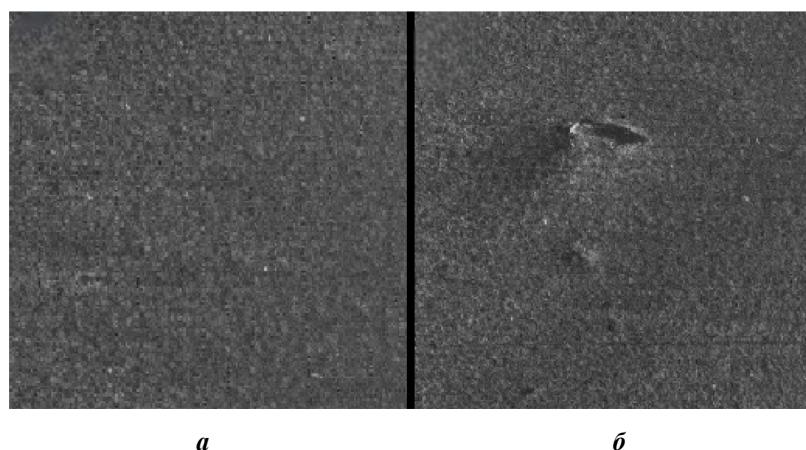


Рис. 2. Примеры областей с ГЛИ: *а* – область без аномалий, *б* – область с аномалией

На ГЛИ представлены различные типы подстилающих поверхностей. Для балансировки представленных в обучающем наборе данных типов подстилающих поверхностей поставлена вспомогательная задача классификации. Исходные ГЛИ кластеризованы при помощи алгоритма DBSCAN [13], который принимает на вход значения энтропии [14], контрастности [15], меры эксцесса [15] и асимметрию [16] изображений. Таким образом выделено 18 кластеров. Из них выбрано 12 наиболее представленных и не пересекающихся с аномалиями.

Из вышеупомянутых кластеров сформировали обучающую выборку из 6070 областей. Общее распределение выбранных кластеров представлено на рис. 3.

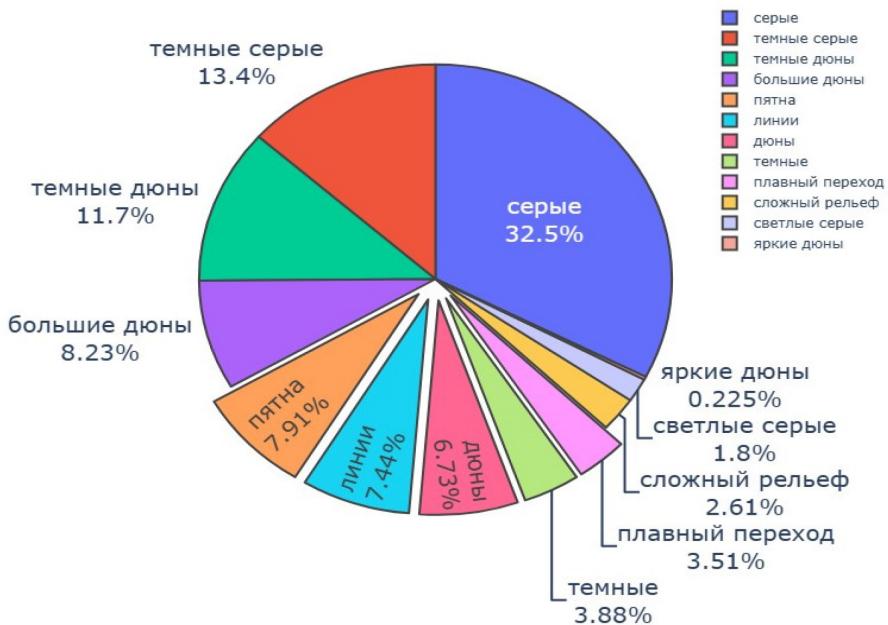


Рис. 3. Распределение кластеров подстилающих поверхностей

Для увеличения размера обучающей выборки и улучшения обобщающей способности нейросетевого алгоритма использовались преобразования изображений [17], которые не оказывают влияние на распределение яркостей на ГЛИ:

1. Поворот по вертикали.
2. Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE).
3. Случайное изменение гаммы, контрастности и яркости.
4. Размытие.

После применения преобразований размер обучающей выборки увеличился до 7390 областей.

Обучающий набор данных для алгоритма сегментации

Обучающий набор данных для алгоритма сегментации включает 1605 ГЛИ с размером 1024 на 1024 пикселей и разметку, каждая сегментационная разметка (маска) имеет одинаковую структуру и состоит из 5 зон (рис. 4):

1. Зона акустической тени (толща воды).
2. Линия раздела акустической тени и области дна.

3. Зона дна.
4. Линия раздела области дна и берега.
5. Зона переотражения (берег).

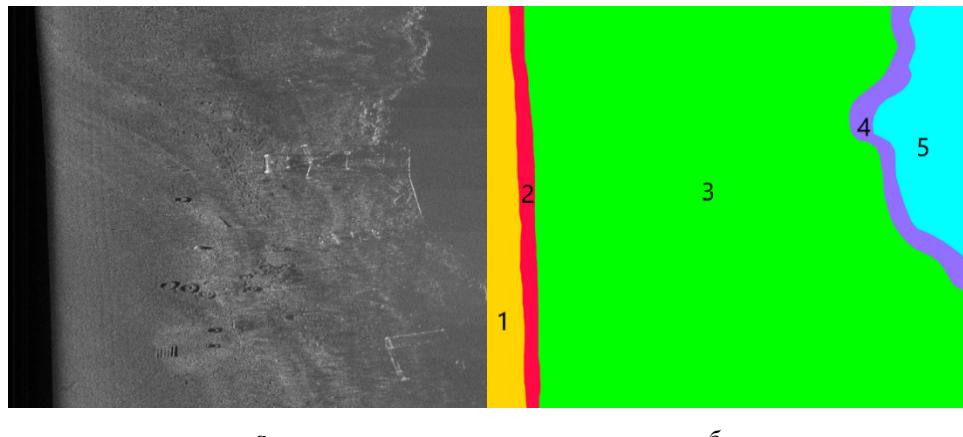


Рис. 4. Пример элемента обучающего набора данных: *a* – ГЛИ,
б – соответствующая сегментационная разметка

Разработка алгоритма обнаружения аномалий

На вход алгоритм обнаружения аномалий получает ГЛИ и включает шесть этапов:

1. Формирование маски входного изображения с выделением 5 зон сегментационной нейронной сетью.
2. Разделение ГЛИ на области дна размером 256 на 256 пикселей с перекрытием 128 пикселей на основании сегментационной маски.
3. Сжатие и восстановление полученных областей нейросетевым автоэнкодером. При этом наибольшая ошибка восстановления соответствует наибольшей вероятности нахождения аномалии в данной области.
4. Постобработка результатов работы автоэнкодера:
 - 4.1. Вычисление попиксельной ошибки восстановления (*diff*).
 - 4.2. Адаптивная пороговая обработка матрицы ошибки восстановления. Используется взвешенная по Гауссу сумма пикселей в окрестности размером 31 пиксель [18, 19]. После происходит обработка по порогу, равному сумме математического ожидания с произведением дисперсии на параметр *confidence*. Последний принимает значения от 0 до 1. Чем больше значение *confidence*, тем больше алгоритм уверен в предсказании аномальных пикселей.
 - 4.3. Применение морфологической операции закрытия (Morphology Closing) [20] с ядром из единиц и размером 4 на 4 для уменьшения влияния выбросов и шумов.
 - 4.4. Объединение аномальных пикселей в группы (область аномалии) с использованием алгоритма поиска контуров из открытой библиотеки OpenCV [21].
 - 4.5. Формирование маски аномальных областей (предсказание алгоритма).
5. Объединение областей в исходный размер с применением операции морфологического расширения (Dilate) [22] для объединения аномальных областей.

6. Построение ограничивающих прямоугольников аномалий на основании выделения контуров областей.

На рис. 5 приведена блок-схема алгоритма обнаружения аномалий.

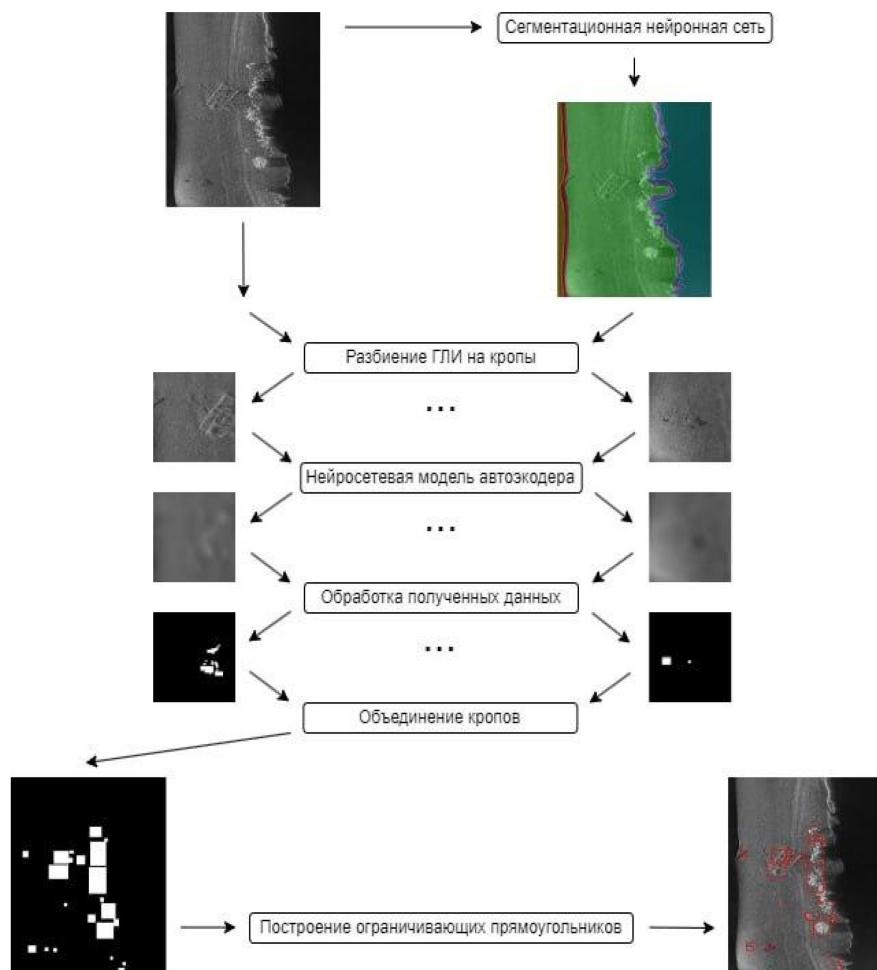


Рис. 5. Блок-схема алгоритма обнаружения аномалий

Архитектура нейросетевого автоэнкодера

Модель автоэнкодера (рис. 6) состоит из трех основных частей – кодировщик, декодировщик и скрытое представление. Кодировщик представляет собой набор сверточных слоев и блоков для снижения количества признаков, которые преобразуют оригинальное изображение в скрытое представление (карту признаков). Декодировщик состоит из блоков увеличения размерности и сверточных слоев и выполняет операцию обратную кодировщику, то есть переводит скрытое представление в исходное изображение.

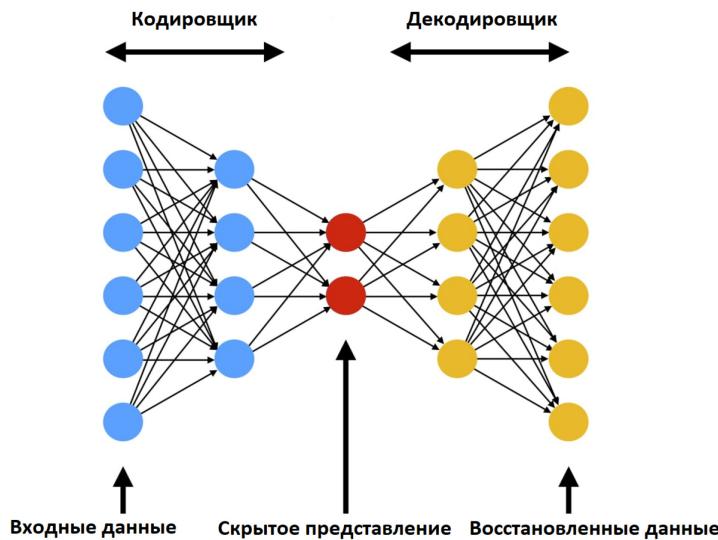


Рис. 6. Архитектура нейросетевого автоэнкодера

Скрытое представление является ключевой частью автоэнкодера, так как в пространстве изображений можно выделить некоторое подпространство, в котором содержатся основные полезные признаки, необходимые для восстановления исходного изображения. Таким образом, автоэнкодер ищет такое k -мерное подпространство, которое наиболее полно передает информацию об изображении.

Автоэнкодер обучается восстановлению подстилающей поверхности. Так, во время обучения он будет искать такое представление, которое будет полностью описывать распределение яркости на подстилающих поверхностях. При получении на вход изображения, содержащего аномалии (объекты), которые не описываются известным ему распределением, автоэнкодер не сможет их корректно восстановить. Предполагается, что ошибка восстановления в областях изображения, где представлены аномалии, будет выше, чем средняя по всему изображению.

На рис. 7 показана разработанная архитектура автоэнкодера со скрытым представлением, которое содержит 512 параметров. В качестве кодировщика использовалась предобученная на открытом наборе данных ImageNet [23] сверточная нейросетевая модель ResNet18 [24] для задачи классификации. Декодировщик, в свою очередь, представлен в виде 5 блоков увеличения размерности, которые состоят из upsample блоков, которые увеличивают размер входного изображения в 2 раза по билинейному закону, сверточного слоя и функции активации ReLU [25].

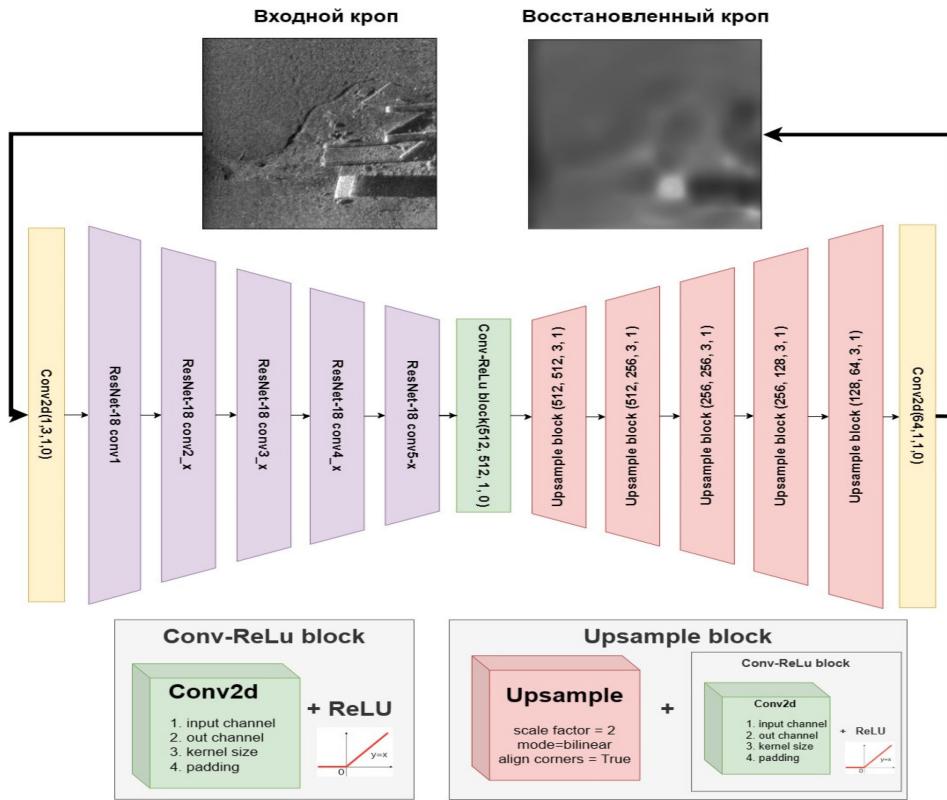


Рис. 7. Архитектура и пример работы разработанного автоэнкодера

Порядок обучения нейросетевого автоэнкодера

Обучение нейросетевого автоэнкодера проведено по схеме обучения с учителем при помощи метода обратного распространения ошибки. Параметры обучения модели представлены в табл. 1.

В качестве оптимизационного алгоритма использован Adam (Adaptive Moment Estimation) [26]. Это один из самых распространенных алгоритмов оптимизации из-за ряда его преимуществ, а именно: использования скользящего среднего по первому и второму моменту, внутренней регуляризации и быстрой сходимости. Скорость обучения модели уменьшалась по ходу обучения по геометрической прогрессии.

Таблица 1. Параметры обучения модели автоэнкодера

Наименование параметра	Величина параметра
Размер батча	6
Количество эпох	100
Скорость обучения	1e-3
Коэффициент геометрической прогрессии	0,5

В качестве функции потерь использовалась средняя абсолютная ошибка (MAE):

$$L_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |y_i^* - y_i|,$$

где y – изображение, восстановленное автоэнкодером, а y^* – исходное изображение. На рис. 9 приведено уменьшение функции потерь в процессе обучения автоэнкодера.

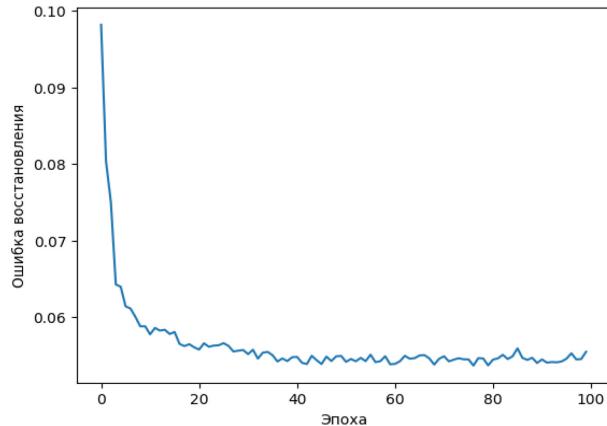


Рис. 9. Изменение ошибки восстановления в процессе обучения автоэнкодера

Основываясь на графике обучения, сделан вывод, что модель обучилась восстанавливать подстилающую поверхность и вышла на плато, достигнув квазипротимальных значений ошибки восстановления.

Модуль сегментации для предобработки данных

ГЛИ состоит из 5 зон, но, как видно на рисунке 10 (а), в зеленой зоне (зона дна) содержится большинство объектов, поэтому эта зона представляет наибольший интерес.

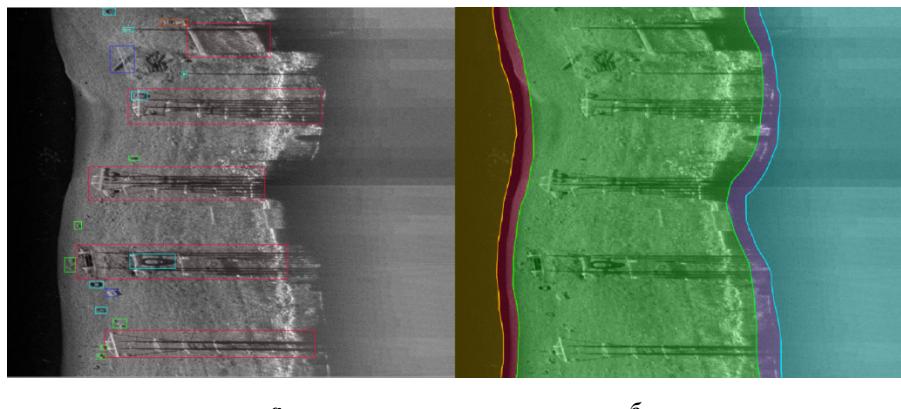


Рис. 10. Пример расположения аномалий (объектов) в зонах ГЛИ:
а – ГЛИ с аномалиями, б – разделение ГЛИ на области

Для снижения числа ложных срабатываний на зонах вне дна разработан алгоритм сегментации ГЛИ.

Для сегментации зон использовалась сегментационная нейронная сеть LinkNet [27] с архитектурой «timm-mobilenetv3 small 100» [28] в качестве кодировщика. Данная

архитектура выбрана по совокупности высокой скорости обработки изображений и точности.

Процесс обучения сегментационной модели проведен по аналогии с процессом обучения автоэнкодера, но с другими параметрами обучения, которые приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры обучения сегментационной модели

Наименование параметра	Величина параметра
Размер батча	1
Количество эпох	100
Скорость обучения	1e-2
Коэффициент геометрической прогрессии	0,5

В качестве функции потерь использовалась кросс-энтропия:

$$L_{CE} = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log(q(x_i)),$$

функция измеряет разницу между двумя распределениями $p(x)$ и $q(x)$ – истинным и предсказанным соответственно. На рис. 11 представлено изменение функции потерь в ходе обучения сегментационной модели.

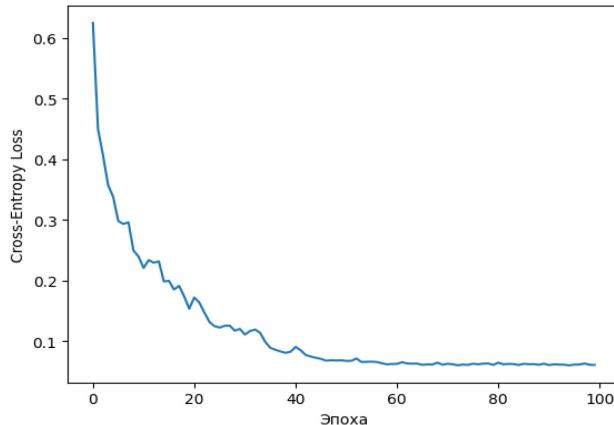


Рис. 11. График изменения ошибки в процессе обучения сегментационной нейросетевой модели

Оценка качества сегментационной модели производилась при помощи подсчета доли правильно предсказанных классов (Accuracy) и среднего перекрытия классов (Mean IoU):

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN},$$

где TP – предсказали положительную метку и были правы, TN – предсказали отрицательную метку и были правы, FP – предсказали положительную метку и ошиблись, FN – предсказали отрицательную метку и ошиблись;

$$\text{Mean IoU} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{p_i \cap g_i}{p_i \cup g_i},$$

где p_i – предсказанная маска для одного класса, g_i – истинная маска для этого же класса, k – число классов.

Итоговая доля правильно предсказанных классов (Accuracy) на отложенной тестовой выборке из 80 изображений составила 0,95, среднее перекрытие классов (Mean IoU), рассчитанное по всему изображению, составило 0,61 [29].

Результаты работы

Для оценки качества работы алгоритма сформирована тестовая выборка из 24 ГЛИ, которые не пересекаются с тренировочными данными. На изображениях из тестовой выборки представлены различные аномалии: колеса, кабели, столбы, пирсы, объекты в толще воды и не идентифицированные объекты, которые редко встречаются в исходных данных, либо являются уникальными.

Для оценки качества работы алгоритма на тестовой выборке выбраны две метрики: попиксельная доля ложно обнаруженных объектов (Bad area) и доля правильно обнаруженных объектов (Recall). Метрика Bad area вычисляет, какая доля аномальных пикселей относительно всего изображения была предсказана ложно:

$$\text{Bad area} = \frac{P - P \cap G}{\text{img_size}},$$

где P – предсказанная маска, G – истинная маска, img_size – размер изображения. На рис. 12 представлена зависимость метрик bad area от confidence (уверенность предсказания алгоритма).

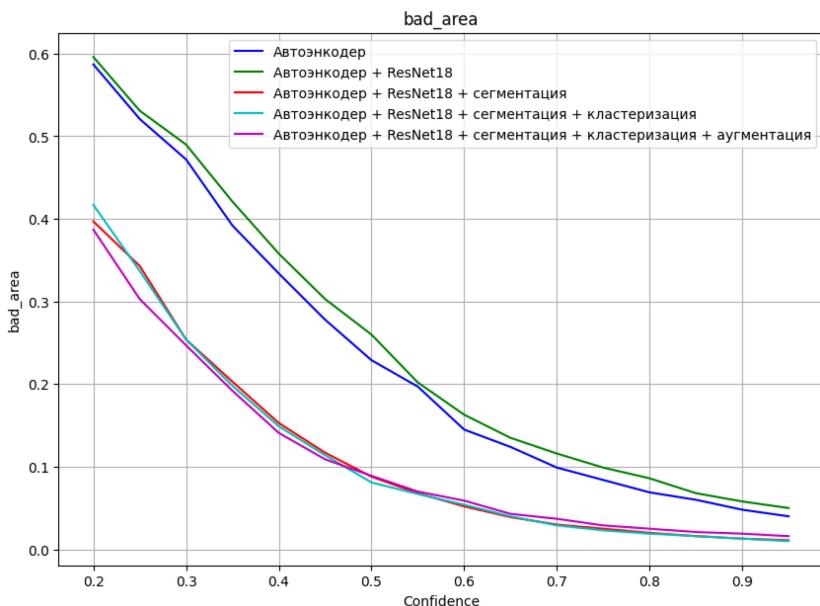


Рис. 12. Зависимость метрики bad area от параметра confidence

Recall вычисляется следующим образом:

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN},$$

где TP (*True Positive*) – это количество правильно обнаруженных аномалий при условии, что предсказанный ограничивающий прямоугольник пересекается с истинным ограничивающим прямоугольником не менее чем на 0,30, FN (*False Negative*) – это количество аномалий, у которых предсказанные ограничивающие прямоугольники пересекаются с истинными менее чем на 0,30. Зависимость значения метрики от параметра confidence представлена на рис. 13.

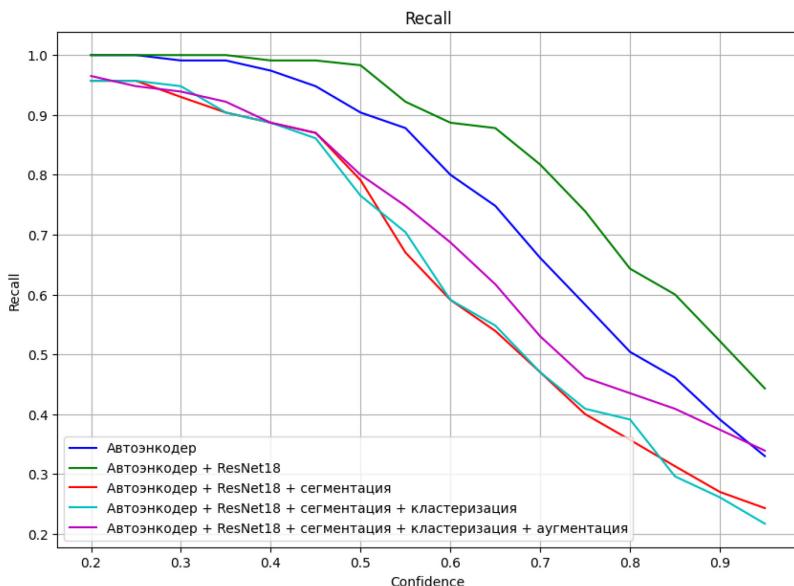


Рис. 13. Зависимость метрики Recall от параметра confidence

Выявлено, что оптимальным параметром confidence является число, при котором bad area не превышает 0,1. Как видно из рис. 10, алгоритмы, использующие сегментационную нейронную сеть, уменьшают bad area на 0,15, а из рис. 11 видно, что данные алгоритмы имеют более высокий Recall при допустимом bad area 0,1 по сравнению с автоэнкодером без предобработки данных. Из рис. 11 видно, что использование кластеризации с аугментацией данных увеличивает Recall в среднем на 0,10 по сравнению с автоэнкодером обученным на всех кластерах. Оптимальной моделью можно считать Автоэнкодер с кодировщиком ResNet18, обученном на определенных кластерах с аугментацией, который использует предобработку в виде сегментационной нейронной сети и с параметром confidence 0,5.

Тем самым финальный алгоритм обрабатывает одно ГЛИ размером 872x788 пикселей со скоростью 6,46 секунды на процессоре AMD Ryzen 5 3500U и на тестовой выборке имеет точности 0,80 по метрике recall и 0,09 по метрике bad area при параметре confidence равном 0,55.

Заключение

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Проведена постановка задачи обнаружения аномалий на ГЛИ.
 2. Сформированы обучающие наборы данных в количестве 7390 изображений размером 256 на 256 пикселей для задачи детектирования аномалий и 1605 сегментационных масок размером 1024 на 1024 пикселей для задачи сегментации данных.
 3. Выделено 18 типов подстилающей поверхности для ГЛИ.
 4. Разработан алгоритм сегментации ГЛИ на 5 зон. Получены точности 0,95 и 0,61 по метрикам Accuracy и Mean IoU соответственно.
 5. Разработан алгоритм восстановления подстилающей поверхности с величиной средней абсолютной ошибки равной 0,055.
 6. Проведена оценка качества работы полученных алгоритмов по метрикам доли правильно обнаруженных объектов и попиксельной доли ложно обнаруженных объектов на тестовом наборе ГЛИ со значениями 0,80 и 0,09 при параметре confidence равном 0,55. При этом обработка тестового изображения составляет 6,46 секунды.
- Дальнейшие исследования целесообразно проводить в следующих направлениях:
1. Повышение точности работы алгоритма за счет дообучения алгоритма восстановления подстилающих поверхностей на расширенном наборе данных.
 2. Повышение точности работы алгоритма за счет обработки исходных гидролокационных данных.
 3. Оценка влияния разрешения на результат работы алгоритма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schultz J. J., Healy C. A., Parker K., Lowers B. Detecting submerged objects: the application of side scan sonar to forensic contexts // Forensic Sci Int. 2013 Sep 10, T. 231, pp. 306-16. DOI: 10.1016/j.forsciint.2013.05.032.
2. Долотов С. А., Каевицер В. И., Кривцов А. П., Разманов В. М., Смольянинов И. В. Применение интерферометрического ГБО с ЛЧМ зондирующем сигналом для исследования морского дна // Известия ЮФУ. Технические науки. 2004. № 5. – С. 268–273. URL: <https://elibrary.ru/kxudwv>.
3. Волощенко А. Применение гидролокатора бокового обзора для обнаружения рыболовных сетей // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2021, № 3, С. 10–16.
4. Ражев А. О., Недоступ А. А. Мониторинг процесса управления траловой конструкцией и объекта лова с применением гидролокатора // Материалы X Международного Балтийского морского форума, ФГБОУ ВО «КГТУ», г. Калининград, 26 сентября –1 октября 2022 г. – С. 270–278.
5. D. Makhotkin, N. Koltok, N. Grishin, K. Bukharov and V. Semenkin. Signalization of objects on the sonar images using neural network segmentation methods // 2021 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T), Dolgoprudny, 2021. – Pp. 1–5. DOI: 10.1109/EnT50460.2021.9681791.
6. Гончаров А. Е., Юрченюк Ю. П. Интерпретация и дешифрирование изображений с гидролокатора бокового обзора, полученных в ходе полевых исследований в акватории нижнего и среднего течения реки Енисей // XXIII Международной научно-практической конференции «Решетневские чтения», г. Красноярск, 2019. – С. 417–419.
7. Połap D., Wawrzyniak N., Włodarczyk-Sielicka M. Side-scan sonar analysis using ROI analysis and deep neural networks // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022. – T. 60. – Pp. 1–8.
8. Qiang Ge, Fengxue Ruan, Baojun Qiao, Qian Zhang, Xianyu Zuo, Lanxue Dang. Side-scan sonar image classification based on style transfer and pre-trained convolutional neural networks // Electronics, 2021. – T. 10. – P. 1823. DOI: 10.3390/electronics10151823.

-
9. Yu Yongcan, Zhao Jianhu, Gong Quanhua, Huang Chao, Zheng Gen, Ma Jinye. Real-Time Underwater Maritime Object Detection in Side-Scan Sonar Images Based on Transformer-YOLOv5 // Remote Sens, 2021. – Т. 13. – Р. 3555. DOI: 10.3390/rs13183555.
 10. Yang, Dianyu and Cheng, Chensheng and Wang, Can and Pan, Guang and Zhang, Feihu. Side-Scan Sonar Image Segmentation Based on Multi-Channel CNN for AUV Navigation // Frontiers in Neurorobotics, 2022. – Т. 16. DOI: 10.3389/fnbot.2022.928206.
 11. Alzubaidi L., Zhang J., Humaidi A. J. et al. Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions // Journal of Big Data, 2021 – Т. 8. – №. 53. DOI: 10.1186/s40537-021-00444-8.
 12. Chen Z., Yeo C. K., Lee, Lau B. S. and C. T. Autoencoder-based network anomaly detection // Wireless Telecommunications Symposium (WTS), Phoenix, 2018. – Pp. 1–5. DOI: 10.1109/WTS.2018.8363930.
 13. Meng'Ao Li and Dongxue, Meng and Songyuan, Gu and Shufen, Liu. Research and Improvement of DBSCAN Cluster Algorithm // 7th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME), 2015, pp. 537–540. DOI: 10.1109/ITME.2015.100.
 14. Shannon C. E. A mathematical theory of communication // Bell Syst. Tech. J. – 1948. – №. 27. – Pp. 379–423.
 15. Монич Ю. И., Старовойтов В. В. Оценки качества для анализа цифровых изображений // Искусственный интеллект. – 2008. – С. 376–386. URL: http://uiip.bas-net.by/structure/l_ori/starovoitov/Starovoitov_Publication_section/15_Starovoitov.pdf.
 16. Дерр В. Я. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов. – СПб.: Лань, 2021. – 596 с.
 17. Albumentations: Fast and Flexible Image Augmentations: <https://albumentations.ai/>.
 18. Kotecha, Jayesh H. and Petar M. Djurić. Gaussian sum particle filtering // IEEE Trans. Signal Process, 2003, Т. 51, pp. 2602–2612. DOI: 10.1109/tsp.2001.955314.
 19. OpenCV: Miscellaneous Image Transformations. https://docs.opencv.org/4.x/d7/d1b/group__imgproc__misc.html#ga72b913f352e4a1b1b397736707afcde3.
 20. Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology // Academic Press, London, 1982, Т. 1, p. 610.
 21. Dunn D., Higgins W. E., Wakeley J. Texture segmentation using 2D gabor elementary functions // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1994. – Т. 16. – №. 2. – Pp. 130–149.
 22. Gonzalez R., Woods R. Digital Image Processing // Addison-Wesley Publishing Company, 1992, pp. 518–519.
 23. Deng, Jia and Dong, Wei and Socher, Richard and Li, Li-Jia and Li, Kai and Li, Fei-Fei. ImageNet: A large-scale hierarchical image database // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami. – 2009. – Pp. 248–255. DOI: 10.1109/CVPR.2009.5206848.
 24. He, Kaiming and Zhang, Xiangyu and Ren, Shaoqing and Sun, Jian. Deep residual learning for image recognition // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2016. – Pp. 770–778. DOI: 10.1109/CVPR.2016.90.
 25. Arun Kumar Dubey, Vanita Jain. Comparative Study of Convolution Neural Network's Relu and Leaky-Relu Activation Functions // Applications of Computing, Automation and Wireless Systems in Electrical Engineering. – 2019. – Pp. 873–880. DOI: 10.1007/978-981-13-6772-4_76.
 26. Kingma D. Ba J. A. A Method for Stochastic Optimization // International Conference on Learning Representations, 2014. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980.
 27. Chaurasia A., Culurciello E. Linknet: Exploiting encoder representations for efficient semantic segmentation // IEEE Visual Communications and Image Processing. – 2017. – Pp. 1–4. DOI: 10.1109/VCIP.2017.8305148.
 28. Sinha D., El-Sharkawy M. Thin MobileNet: An Enhanced MobileNet Architecture // IEEE 10th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference, New York. – 2019. – Pp. –280–285. DOI: 10.1109/UEMCON47517.2019.8993089.
 29. Zheng, Zhaohui and Wang, Ping and Liu, Wei and Li, Jinze and Ye, Rongguang and Ren, Dongwei. Distance-IoU Loss: Faster and Better Learning for Bounding Box Regression // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2020. – Т. 34 – Pp. 12993–13000. DOI: 10.1609/aaai.v34i07.6999.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

*АЛЕКСЕЕВ Николай Алексеевич, инженер ООО «Экран», alekseev.na@mipt.ru.
Nikolay A. ALEKSEEV, engineer, Ekran LLC, alekseev.na@mipt.ru.*

*ЮСУПОВ Сафуан Эльмирович, техник ООО «Экран», iusupuv.se@phystech.edu.
Safuan E. YUSUPOV, technician, Ekran LLC, iusupuv.se@phystech.edu.*

КОРОТКИЙ Мирослав Александрович, ведущий инженер-математик ООО «Экран», romanov@screen-co.ru.

Miroslav A. KOROTKIY, Leading Mathematical Engineer, Ekran LLC, romanov@screen-co.ru.

*ПАВЕЛКИН Иван Андреевич, программист ООО «Экран», pavelkin@screen-co.ru.
Ivan A. PAVELKIN, programmer, Ekran LLC, pavelkin@screen-co.ru.*

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

УДК 504.38 504.35 504.423

СИНОПТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ МЕТЕЛЕЙ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЬЕ

Лаврова И. В.,^{1,2} Косовер М. Д.,¹ Иванова И. А.,¹ Ефимова Ю. В.¹

¹ ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»,
г. Санкт-Петербург.

² АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт»,
г. Санкт-Петербург.

Аннотация. В работе проанализированы основные характеристики метелей над открытой акваторией Баренцева моря и приведены синоптические ситуации с метелями, ограничивающими дальность видимости до 500 м. В холодный период года метели составляют 10 % от всех наблюдаемых явлений. По происхождению встречаются как внутримассовые, так и фронтальные метели, при этом отмечается горизонтальная дальность видимости менее 4 км.

Ключевые слова: метели, Баренцево море, Арктика, синоптический анализ.

Для цитирования: Лаврова И. В., Косовер М. Д., Иванова И. А., Ефимова Ю. В. Синоптические условия образования метелей в Баренцевом море // Навигация и гидрография. – 2024. – № 2 (75). – С. 139–148.

SYNOPTIC CONDITIONS FOR THE FORMATION OF SNOWSTORMS IN THE BARENTS SEA

Lavrova I. V.,^{1,2} Kosover M. D.,¹ Ivanova I. A.,¹ Efimova Yu. V.¹

¹Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg.

²State Research Navigation-Hydrographic Institute, JSC, St. Petersburg.

Summary. The paper analyzes the main characteristics of snowstorms over the open water area of the Barents Sea and provides synoptic situations with snowstorms limiting the visibility range to 500 m. During the cold season, snowstorms account for 10% of all observed phenomena. By origin, both intra-mass and frontal snowstorms occur, while a horizontal visibility range of less than 4 km is noted.

Keywords: snowstorms, Barents Sea, Arctic, synoptic analysis.

For citation: Lavrova I. V., Kosover M. D., Ivanova I. A., Efimova Yu. V. Synoptic Conditions for the Formation of Snowstorms in the Barents Sea // Navigation and hydrography. – 2024. – No. 2 (75). – P. 139–148.

В полярных районах, в том числе над открытymi акваториями морей, метель – довольно частое явление, и его исследование представляет интерес для мореплавания. Во время метели ухудшается дальность видимости, морские суда подвергаются сильному ветро-волновому воздействию, вызывающему дрейф, крен и изменение скорости, что требует принятия особых мер по управлению. В районе

нефтедобывающих платформ метели могут представлять серьезную опасность для работы малой авиации, а также осложнять швартовку морских судов.

Метелью принято называть перенос снега сильным ветром со скоростью более 7 м/с. Различают общую, низовую метель и поземок. Общая метель – это перенос ветром снега, поднятого с поверхности, который сопровождается выпадением снега из облаков. Низовая метель – перенос ветром снега, поднятого с поверхности в слое толщиной несколько метров при отсутствии снегопада. Поземок возникает при переносе снега с поверхности при отсутствии снегопада в слое до 1 метра [1]. Таким образом, над открытой поверхностью воды возможно образование только общей метели, а низовая метель и поземок в арктических широтах – частые явления над ледяными полями. В отечественной и зарубежной научной литературе такие сильные снежные бури в полярных регионах при низких температурах воздуха (как правило, низовые метели) даже получили свое название blizzard (блиццард или близзард) [2].

В данной работе будут рассмотрены основные характеристики только общих метелей над открытой акваторией Баренцева моря.

В работе использованы судовые гидрометеорологические данные из массива Национального Климатического Центра Данных США (NCDC) с 1950 по 2022 гг. по Баренцеву морю [3]. Из базы данных отобраны случаи с метелями как явлениями, при которых наблюдаются твердые осадки, отрицательные температуры воздуха и скорости ветра более 7 м/с. Всего было отобрано 41249 сроков с заданными условиями по акватории Баренцева моря.

В целом над всей рассматриваемой акваторией метели имеют заметный годовой ход и отмечаются главным образом с октября по апрель. В зимние месяцы повторяемость метелей довольно высокая – более 10 %, с максимумом в декабре (рис. 1). В летний период метели тоже встречаются, но в редких случаях; их повторяемость менее 0,5%.

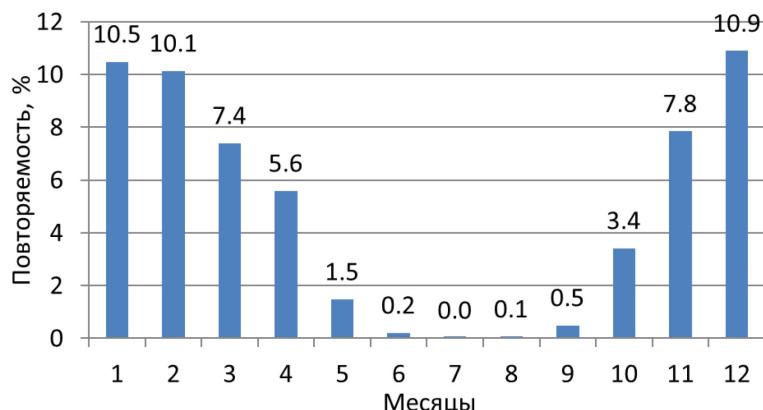


Рис. 1. Распределение повторяемости метелей по месяцам над акваторией Баренцева моря

Проанализировано пространственное распределение метелей по акватории, картосхемы приведены на рис. 2.

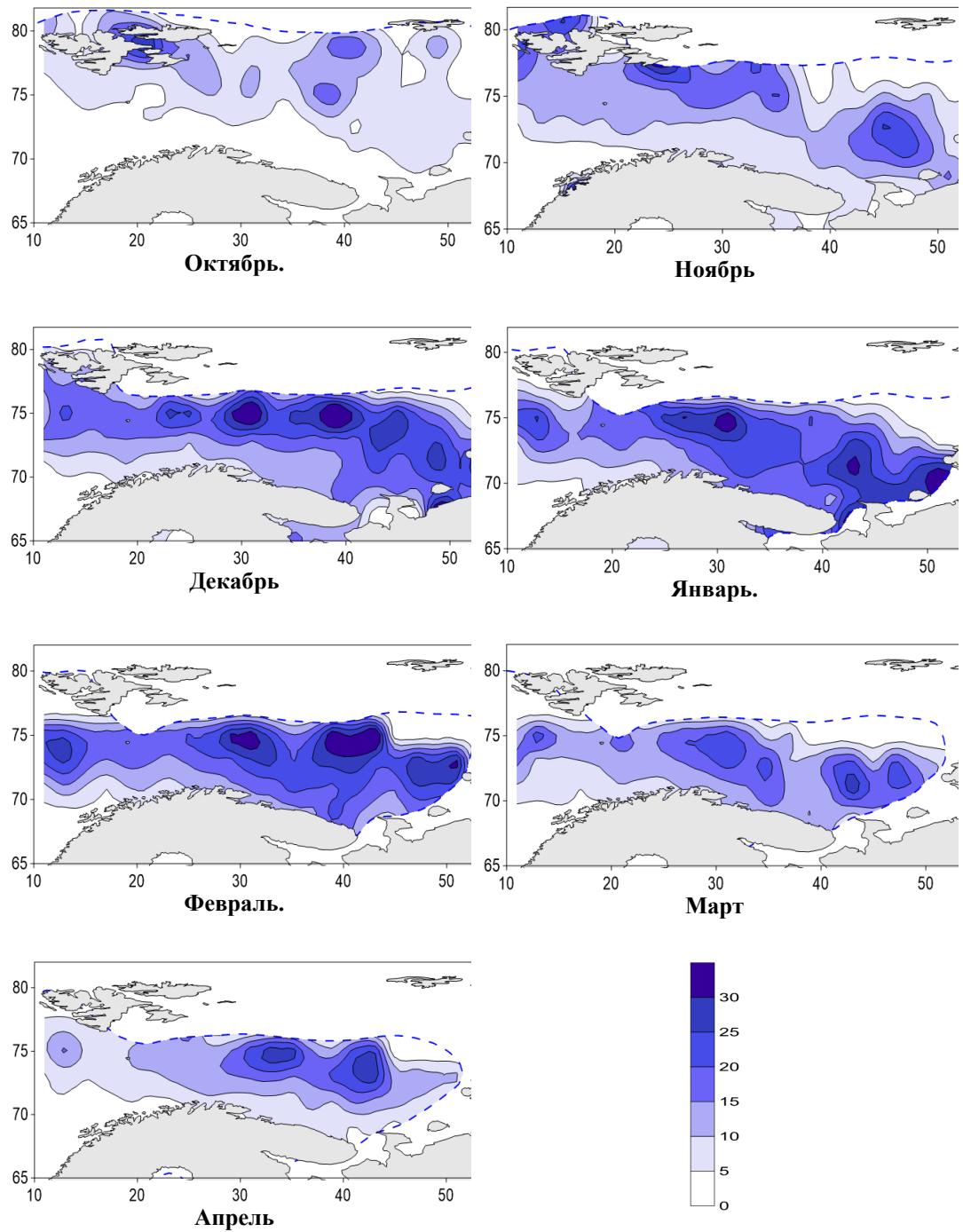


Рис. 2. Распределение повторяемости (%) общих метелей по акватории Баренцева моря с октября по апрель

На рис. 2 видно, что большая часть метелей отмечается в северной и центральной части моря. Зона высокой повторяемости вытянута с северо-запада на юго-восток. Самые высокие её значения наблюдаются с декабря по февраль и достигают более 30 % в центральной части. Наименьшая повторяемость – в юго-западной части моря в районе теплых морских течений.

Число дней с метелью меняется от года к году и зависит от характера развития синоптических процессов.

Чаще всего (81 %) над рассматриваемой акваторией метели приводят к ухудшению видимости до 2–4 км, преобладающая скорость ветра находится в интервале 9–12 м/с (табл. 1). Из анализа табл. 1 можно сделать вывод, что горизонтальная дальность видимости при общих метелях не находится в прямой зависимости от скорости ветра.

Таблица 1. Повторяемость метелей при различных сочетаниях скорости ветра и дальности видимости

Скорость ветра, м/с	Дальности видимости при метелях (в км)									
	<0,05	0,05	0,2	0,5	1	2	4	10	20	>50
7–9	0,09	0,29	0,78	1,30	2,23	4,27	9,21	3,92	1,16	0,02
9–12	0,15	0,44	1,12	2,03	3,33	5,98	12,02	5,23	1,24	0,03
12–15	0,13	0,33	0,86	1,76	2,81	4,73	8,94	3,55	0,73	0,01
15–18	0,06	0,20	0,52	1,15	1,72	2,51	4,22	1,65	0,32	0,02
18–21	0,05	0,13	0,40	0,71	0,98	1,38	1,98	0,74	0,11	0,00
21–24	0,00	0,03	0,17	0,24	0,27	0,39	0,43	0,16	0,03	0,00
24–27	0,00	0,02	0,05	0,07	0,11	0,14	0,18	0,04	0,01	0,00
>27	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,04	0,01	0,00	0,00

Далее проанализирована связь дальности видимости с интенсивностью осадков, которые были разделены на группы в соответствии с критериями кода КН-01: слабые, умеренные, сильные, ливневые. Результаты расчётов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Повторяемость метелей при различных сочетаниях интенсивности осадков и дальности видимости

Интенсивность осадков	Дальность видимости (км)								
	<0,05	0,05	0,2	0,5	1	2	4	10	20
Слабые	0,1	0,2	0,5	0,9	1,6	4,0	11,0	5,4	1,3
Умеренные	0,1	0,3	0,8	1,9	3,4	4,5	5,7	1,3	0,5
Сильные	0,1	0,4	1,1	1,4	1,2	1,1	1,6	0,5	0,1
Ливневые	0,2	0,6	1,6	3,1	5,4	9,9	18,7	6,8	1,6

Метели при ливневых осадках наблюдаются в 48 % случаев, при слабых обложных – в 25 %, при умеренных их повторяемость составляет 18,5 %, и реже всего при сильных обложных – 7,5 %. При слабом снеге чаще всего горизонтальная видимость составляет 2–10 км, при умеренном 1–4 км, при сильном снеге – с одинаковой повторяемостью отмечается видимость от 0,2 до 4 км.

Пользуясь районированием регистра ветра и волнения, где акватория Баренцева моря с учетом ветрового режима и географических особенностей (наличие островов, близость побережья и т. д.) поделена на три района [4], определены основные направления ветра при метелях (рис. 3).

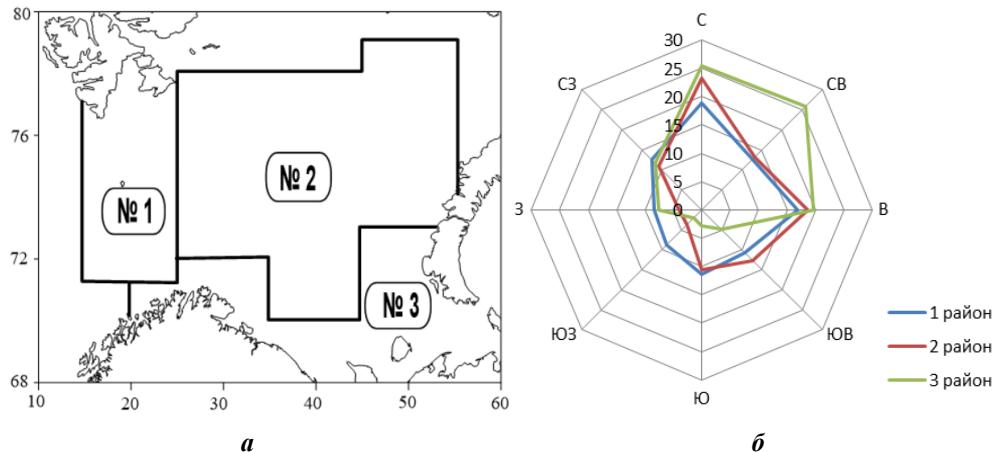


Рис. 3. Границы районов Баренцева моря (а) и розы ветров при метелях по районам (б)

Во всех рассматриваемых районах выделяется сектор с наиболее частыми направлениями ветра – от северного до восточного.

Дополнительно был проведён анализ наблюдаемого при метелях атмосферного давления. В 30 % случаев метели отмечаются при атмосферном давлении от 1000 до 1010 гПа, в 10,3 % – при давлении 980–990 гПа, и в 8,3 % давление составляет 1020–1030 гПа.

Поскольку изучаемый объём данных не позволяет рассмотреть все синоптические ситуации при возникновении метелей, проанализируем те из них, которые вызывают ухудшение видимости до 500 м и менее.

Внутримассовая метель над акваторией Баренцева моря наблюдалась в течение 27 часов: с 20 января 00 UTC до 21 января 06 UTC 2021 г. вблизи побережья Кольского полуострова в точке с координатами $71^{\circ} 54' \text{ с. ш. } 32^{\circ} 36' \text{ в. д.}$

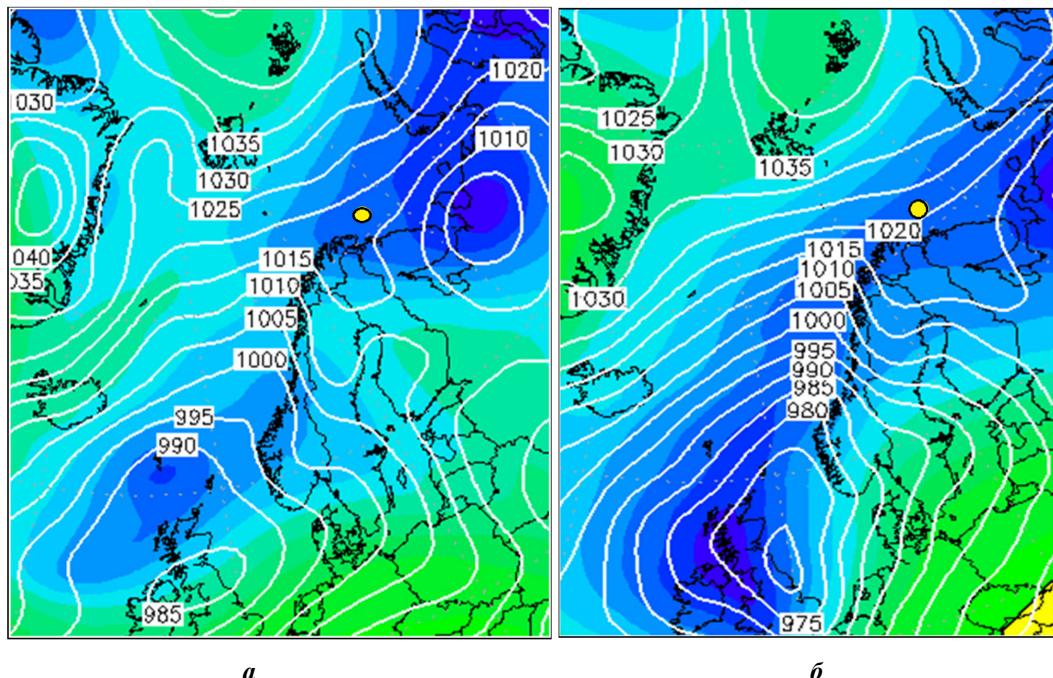


Рис. 4. Совмещенные карты давления на уровне моря (изобары, белые линии) и АТ-500 (изогипсы, цветное поле) 20.01.2021 00 UTC (а) и 21.01.2021 00 UTC (б). Реанализ CFSR [5]. Желтая точка – положение судна в срок наблюдения

На картах рис. 4 видно, что точка наблюдения метели находится в барическом гребне, на южной периферии антициклона, метель внутримассовая. В начале периода метель отмечалась при слабых обложных осадках, температуре воздуха -1°C , восточном ветре 10 м/с, и дальности видимости 4 км. Далее осадки усиливались до умеренных. В 06 UTC 21.01.2021 отмечались сильные осадки, скорость ветра увеличилась до 15 м/с, температура воздуха опустилась до -5°C , видимость ухудшилась до 1 км. Осадки в рассматриваемом случае могут быть связаны с выносом холодной воздушной массы с востока (со стороны Карского моря) на тёплую открытую поверхность Баренцева моря и формированием полей облачности, в том числе конвективного характера за счёт роста неустойчивости воздушной массы. Ниже, на рис. 5 приведено характерное в таком случае поле осадков.

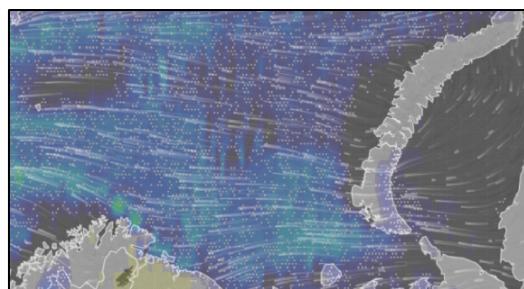


Рис. 5. Поле осадков по данным реанализа модели ICON за 00 UTC 21.01.2021 г.
Цветом показана интенсивность осадков [6]

Метель в передней части циклона и на фронте окклюзии фиксировалась 10 февраля 2009 г. в точке с координатами $69^{\circ} 12' \text{ с. ш.}$ $35^{\circ} 12' \text{ в. д.}$

На картах, представленных на рис. 6, циклон, наблюдавшийся над севером Скандинавии и Норвежским морем, медленно смещался в этот район с юга Балтийского моря, усиливая барический градиент над Баренцевым морем (одновременно над Карским морем располагался антициклон). Циклон глубокий (давление в центре – 980 гПа), в стадии максимального развития, с системой полярного фронта и хорошо сформированным фронтом окклюзии, проходящим от центра циклона вдоль побережья Кольского полуострова до полуострова Канин нос. С фронтом окклюзии связан гребень тепла на карте AT-850 гПа и зона интенсивного снегопада. Метель наблюдалась сначала в передней части циклона, а затем и на фронте окклюзии. В таких синоптических ситуациях в условиях сильного ветра и снегопада могут возникать интенсивные и продолжительные метели над всей акваторией Баренцева моря.

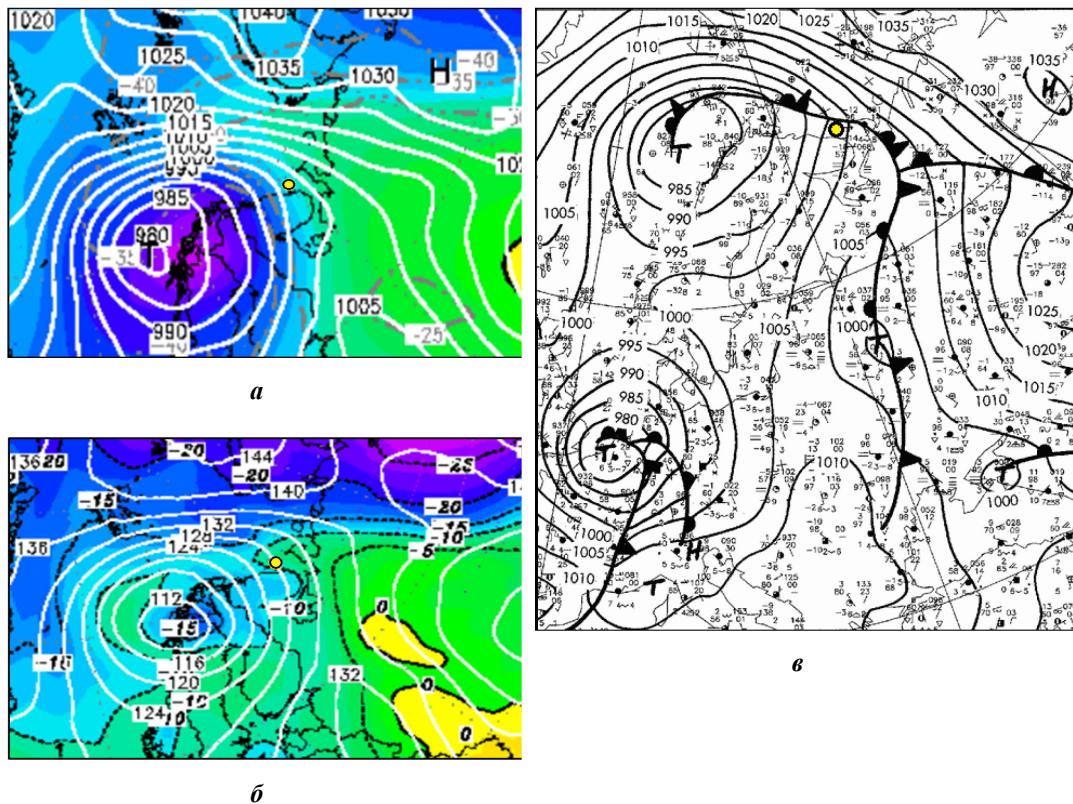


Рис. 6. Совмещенная карта давления на уровне моря (изобары, белые линии) и AT-500 (изогипсы, цветное поле) (а) и карта AT-850 (изогипсы – белые линии, температура воздуха – чёрные пунктирные линии) (б) за 00 UTC 10.02.2009г. Реанализ GFS [5]. Приземная карта с фронтальным анализом (в) за 06 UTC 10.02.2009г. Реанализ DWD [7]. Желтая точка – положение судна в срок наблюдения.

В пункте $72^{\circ} 54'$ с. ш. $17^{\circ} 54'$ в. д. метель ограничивала видимость до 500 м при слабых осадках и до 200 м при сильных осадках. В точке $69^{\circ} 12'$ с. ш. $35^{\circ} 12'$ в. д. в 06 UTC 9 февраля, видимость составила 50 м при ливневых осадках.

Фронтальные метели отмечались 21 ноября 2010 г. в 06 UTC в точке с координатами $71^{\circ} 36'$ с. ш. $25^{\circ} 12'$ в. д. (на холодном фронте) и в точке с координатами $74^{\circ} 54'$ с. ш. $31^{\circ} 36'$ в. д. (на тёплом фронте). На рис. 7 представлена синоптическая ситуация, наблюдавшаяся в тот день, – над акваторией Баренцева моря располагался арктический фронт с волнами, на которых формировались и развивались циклоны, смещающиеся вдоль ведущего потока с северо-запада на юго-восток.

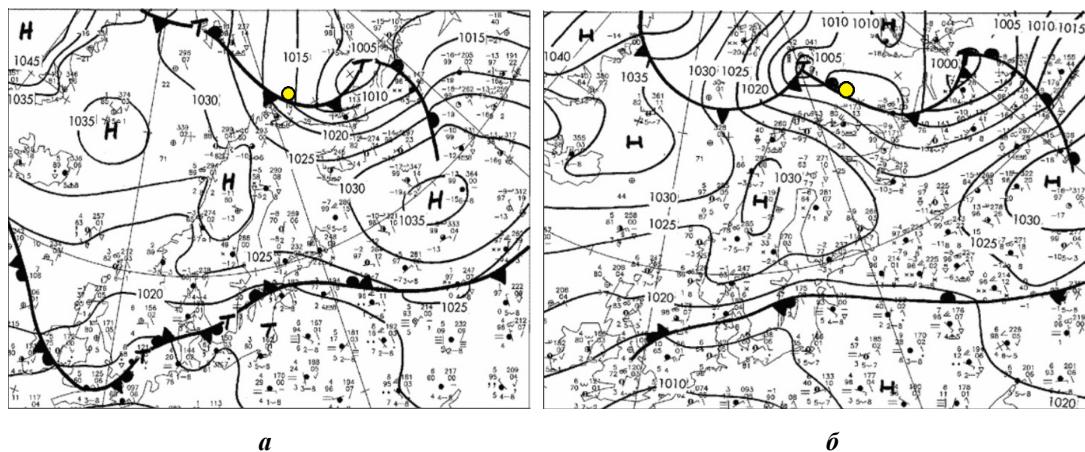


Рис. 7. Приземная карта с фронтальным анализом 21.11.2010 г. за 06 UTC (а) и за 18 UTC (б). Реанализ DWD [7]. Желтая точка – положение судна в срок наблюдения

Метель на холодном фронте наблюдалась только в один срок, ограничение видимости составило 200 м, выпадали умеренные осадки, при северо-западном ветре со скоростью 23 м/с.

В точках с координатами $74^{\circ} 54'$ с. ш. $31^{\circ} 36'$ в. д. и $71^{\circ} 30'$ с. ш. $29^{\circ} 18'$ в. д. в 18 UTC того же дня наблюдалась метель на теплом фронте.

Метели также наблюдались всего в один срок. Видимость ухудшалась до 500 м при ветре южной четверти со скоростью 12–17 м/с и умеренных осадках.

И рассмотрим ещё один случай с интенсивной метелью, в которой дальность видимости понижалась до 50 м. Такие условия наблюдались в 06 UTC 24 марта 2001 г. в точке с координатами $71^{\circ} 12'$ с. ш. $23^{\circ} 12'$ в. д.

По анализу синоптической ситуации, приведённой на рис. 8 можно видеть, что метель наблюдалась на северной периферии циклона над севером Скандинавии и ЕТР. Рассматриваемый циклон являлся частью двуцентровой барической депрессии. В таких системах (многоцентровых барических депрессиях) циклоны движутся против часовой стрелки относительно друг друга. Таким образом, на север ЕТР и Скандинавии он смещался по сложной траектории: сначала с Западной Европы он двигался на восток, затем, пройдя центральные районы ЕТР, он стал подворачивать к северу, затем к северо-западу. За это время он прошёл все стадии своего развития. В анализируемый срок наблюдения циклон был малоподвижным и находился в стадии заполнения: давление в центре выросло с 985 гПа (22 марта) до 1000 гПа. С циклоном

связана система арктического фронта с хорошо выраженным и достаточно протяжённым фронтом окклюзии; на карте АТ-850 ему соответствует гребень тепла, выходящий из центра циклона и направленный на юго-восток. На север Атлантики, со стороны арх. Шпицберген направлен барический гребень от антициклона над СЛО. Очевидно, что сближение этих барических образований привело к повышению градиента давления и усилению ветра, что является необходимым фактором для возникновения метели. Другой фактор – интенсивный снегопад возник (как и в первом рассматриваемом примере) за счёт формирования полей конвективной облачности при движении холодной воздушной массы с северо-востока и дополнительно усилился за счёт влияния фронта окклюзии с востока. В таких случаях над центральной и южной частями акватории Баренцева моря могут образовываться метели со значительным ухудшением дальности видимости.

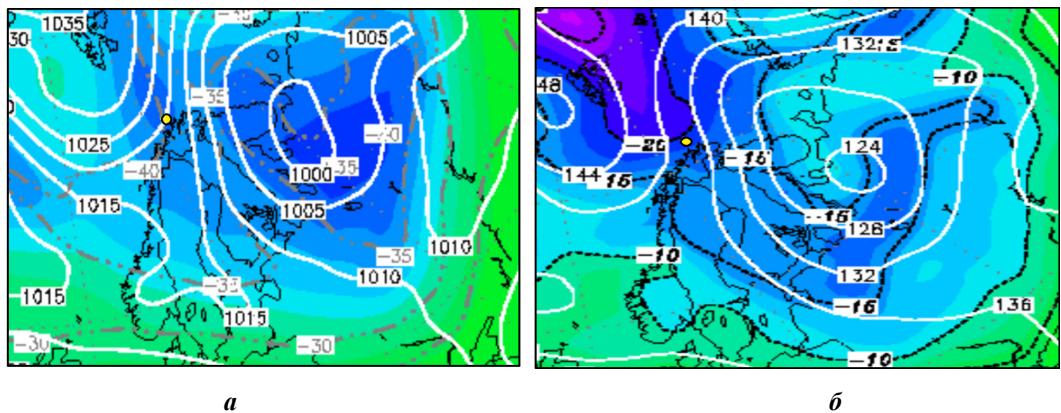


Рис. 8. Совмещенная карта давления на уровне моря (изобары, белые линии) и АТ-500 (изогипсы, цветное поле) (а) и карта АТ-850 (изогипсы – белые линии, температура воздуха – чёрные пунктирные линии, цветное поле) (б) за 00 UTC 24.03.2001 г. Реанализ GFS [6]. Желтая точка – положение судна в срок наблюдения

В настоящее время прогноз метелей над акваториями базируется на прогнозе развития синоптических процессов, учитывая интенсивность снегопада, скорость ветра и температуру воздуха.

Для некоторых районов синоптики разрабатывают собственные методики прогноза метелей [8–10]. По многолетнему ряду наблюдений определяются типовые схемы сочетания высотного термобарического поля и траекторий циклонов, при которых возникают метели. Затем прогностические схемы сравниваются с типовыми, и делается предварительный прогноз возникновения метели. Окончательный вывод формируется после анализа прогностических полей ветра, температуры воздуха и интенсивности снегопада.

Результаты исследования, проведённого в данной работе, могут послужить основой для типизации синоптических процессов, приводящих к возникновению общих метелей над акваторией Баренцева моря и быть дополнительным предиктором их прогнозирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зверев А. С. Синоптическая метеорология. Издание второе, переработанное и дополненное. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 711 с.
2. Климат полярных районов / Пер. с англ. А. Я. Миневич, Н. П. Подобиной. Под ред. физ.-мат. наук, проф. Е. П. Борисенкова. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1973. – 443 с.
3. Национальные центры экологической информации. [Электронный ресурс]/ URL: <https://www.ncei.noaa.gov/data/marine/icoads3.0/enhanced-trim/>
4. Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные / Под ред. И. Н. Давидана, Л. И. Лопатухина, В. А. Рожкова. – Л.: Транспорт, 1974.
5. Wetterzentrale. [Электронный ресурс]/ URL: <https://www.wetterzentrale.de/>
6. Расписание погоды. [Электронный ресурс]/ URL: <https://rp5.ru/>
7. Wetter3.de. [Электронный ресурс]/ URL: wetter3.de/archiv_dwd_dt.html
8. Метод прогноза метелей с заблаговременностью до 36 часов. Методический кабинет Гидрометцентра России. Режим доступа: <http://method.meteorf.ru/methods/short/snow/snow.html>
9. Краткосрочный численный прогноз метелей / Бычкова В. И., Рубинштейн К. Г. // Труды Гидрометцентра России. – 2012. – Вып. 347. – С. 112–127.
10. Метод прогноза видимости в снежной мгле и метели в условиях Арктики. Методический кабинет Гидрометцентра России. Режим доступа: <http://method.meteorf.ru/region/yamb/yamb.html>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

ЕФИМОВА Юлия Викторовна, доцент кафедры Метеорологических прогнозов ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», кандидат географических наук, luluef@mail.ru.

Julia V. EFIMOVA, Associate Professor of the Department of Meteorological Forecasts, Russian State Hydrometeorological University, Candidate of Geographical Sciences, luluef@mail.ru.

ИВАНОВА Ирина Александровна, старший преподаватель кафедры Метеорологических прогнозов ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», ira.nova@mail.ru.

Irina A. IVANOVA, Senior Lecturer at the Department of Meteorological Forecasts of the Russian State Hydrometeorological University, ira.nova@mail.ru.

КОСОВЕР Матвей Дмитриевич, студент ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», jevaphihi@gmail.com.

Matvey D. KOSOVER, student of the Russian State Hydrometeorological University, jevaphihi@gmail.com.

ЛАВРОВА Ирина Викторовна, доцент кафедры Метеорологических прогнозов ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», ведущий научный сотрудник НИОЦ АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», кандидат географических наук, livspb@yandex.ru.

Irina V. LAVROVA, Associate Professor of the Department of Meteorological Forecasts, Russian State Hydrometeorological University, Leading Researcher of Research oceanographic center of the State Research Navigation-Hydrographic Institute, Candidate of Geographical Sciences, livspb@yandex.ru.

ИНФОРМАЦИЯ

Глубокоуважаемые коллеги!

Приглашаем Вас к сотрудничеству в журнале «**Навигация и гидрография**», издаваемом с 1995 г. Государственным научно-исследовательским навигационно-гидрографическим институтом.

В журнале публикуются результаты исследований в области навигации, гидрографии, океанографии, гидрометеорологии, морской картографии, морской геофизики и экологии. Издание освещает концептуальные научные положения и осуществляет оперативную публикацию новейших теоретических исследований, знакомит с передовыми техническими достижениями, с материалами симпозиумов, конференций и хроникой важнейших событий научной жизни в соответствующей предметной области. Статьи журнала рецензируются.

Журнал «Навигация и гидрография» включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Журнал выходит четыре раза в год и в соответствии с Федеральным законом от 29.12.1994 № 77-ФЗ «Об обязательном экземпляре документов» поступает в Российскую книжную палату, крупнейшие библиотеки России и центры научно-технической информации.

Электронные версии выпусков журнала размещаются на сайте Российской государственной библиотеки.

Полный архив журнала в формате PDF доступен на сайте АО «ГНИГИ» www.gningi.ru.

Информация для авторов

Статьи принимаются в формате MS Word с приложением текста на бумаге (шрифт – Times New Roman размером 14, межстрочный интервал 1,5). Все материалы должны быть подписаны автором (авторами).

Объем статьи без аннотации и списка литературы – от 15 до 30 тыс. печатных знаков, включая пробелы.

Название статьи должно в наиболее краткой форме отражать ее содержание.

В статье указывается *индекс УДК*. К работе прилагаются *аннотация, ключевые слова и сведения об авторах на русском и английском языках*.

В аннотации приводятся сведения, которые дополняют название и характеризуют тему статьи, рассмотренную проблему, цель и полученные результаты.

В качестве ключевых приводятся слова или словосочетания из текста статьи, несущие существенную смысловую нагрузку с точки зрения информационного поиска. Выбор ключевых слов должен осуществляться по всему тексту статьи с охватом основных смысловых аспектов ее содержания.

В сведениях об авторах указываются: фамилия, имя, отчество; ученая степень; ученое звание; место работы с указанием полного наименование учреждения и должности; адрес электронной почты.

К рукописи прилагается *сопроводительное письмо* организации, в которой работает автор, и один экземпляр *экспертного заключения* о возможности открытого опубликования представленных материалов.

Для написания формул и символов следует использовать встроенный в пакет MSOffice редактор формул.

Кириллица, греческие буквы, скобки и цифры всегда набираются прямым шрифтом. Латинские буквы набираются курсивом как в формулах, так и в тексте, кроме устойчивых форм (max, min, cos, sin, tg, log и пр.).

Используемые в статье величины и единицы измерения должны соответствовать стандартным обозначениям согласно Международной системе единиц СИ.

Рисунки должны быть вставлены в текст как графический файл, иметь порядковые номера и подписи.

Таблицы должны иметь порядковые номера и названия. Допускается только вертикальная ориентация таблиц, ширина не должна превышать 140 мм.

Список использованной литературы составляется на языке оригинала (исключение – языки с иероглифическим написанием слов) в порядке ссылок на источники по тексту. Ссылки в тексте даются в квадратных скобках, где указывается номер работы по списку. В списке литературы указываются: фамилии и инициалы авторов, полное название книги или статьи, название сборника, город, издательство, год, том, номер, страницы.

Адрес редакции: АО «ГНИНГИ»,
199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Кожевенная линия, 41
Телефон: +7(962)727-18-86
E-mail: info@gningi.ru



Для заметок

НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

№ 2 (75)

Июнь 2024

Главный редактор В. М. Смолин

Научный редактор П. И. Малеев

Редактор И. Ю. Бугрова

Технический редактор С. А. Солодухина

Учредитель и издатель – АО «ГНИНГИ».

199106, г. Санкт-Петербург, Кожевенная линия, д. 41

Телефон: +7(962)727-18-86; E-mail: mail@gningi.ru; www.gningi.ru

Журнал «Навигация и гидрография» включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-43932.

Электронная версия журнала размещена на сайте www.gningi.ru

Цена свободная

Подписано в печать 24.06.2024 г. Формат 84×108/16

Печать цифровая. Усл. печ. л. 15,96. Тираж 100 экз. Заказ № 9/3/2024-23

Отпечатано 28.06.2024 г. в типографии ООО «Цифрофсет»,
199178, г. Санкт-Петербург, 5-я линия В.О., дом 70, литер А, помещение 52/52Н

ISSN 2220-0983 „Навигация и гидрография” № 2 (75) Июнь 2024

АО “ГНИГИ”
2024